

## MODELIZACIÓN DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS CONSIDERANDO LA FRAGMENTACIÓN

**Gerard Matas\*, Nieves Lantada\*, Jordi Corominas\*, Josep A. Gili\*, Roger Ruiz-Carulla y Albert Prades\***

\* División de Ingeniería del Terreno y Geociencias,  
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental  
Universitat Politècnica de Catalunya

### RESUMEN

*Determinar el riesgo al que está expuesto un edificio o una infraestructura debido a los desprendimientos rocosos mediante la Evaluación Cuantitativa de Riesgo requiere estudiar la peligrosidad, que integra la magnitud del fenómeno y la probabilidad de ocurrencia. Hoy en día la mayoría de metodologías disponibles para realizar estudios de peligrosidad no consideran la fragmentación de los bloques durante su propagación por la ladera. Este proceso tiene implicaciones directas en el estudio de la peligrosidad ya que se pueden incrementar el número de fragmentos y las energías cinéticas de los bloques disminuyen al reducirse su tamaño. En esta contribución se presenta el diseño e implementación de un módulo de fragmentación en un programa de simulación de desprendimientos rocosos llamado RockGIS y su aplicación a un caso de estudio.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Un desprendimiento rocoso es un movimiento rápido de masa producido por la separación de una masa rocosa del macizo que cae, rueda y rebota durante su propagación por la ladera. Este fenómeno puede ocurrir de manera aislada o en grupo, pero en cualquier caso siempre hay poca interacción entre los bloques en movimiento (Hung et al. 2014). El estudio de los desprendimientos rocosos se orienta a la determinación del daño potencial sobre las personas, las infraestructuras y los edificios, así como al diseño de estructuras de mitigación. Existen diferentes estrategias para la reducción del riesgo debido a desprendimientos rocosos (Corominas, 2013): (a) reduciendo la peligrosidad mediante trabajos de estabilización en el macizo; (b) interceptando o desviando las trayectorias de los bloques durante su propagación mediante estructuras de contención, que reducen su magnitud, velocidad y alcance; y (c) protegiendo los elementos expuestos. Para las dos últimas opciones, la cinemática de los

bloques, así como su energía cinética, velocidad, altura de paso y probabilidad de alcance deben ser estimadas en las áreas expuestas. Las técnicas modernas para la estimación de estos valores emplean simulaciones computacionales de los desprendimientos para realizar un análisis de las trayectorias de los bloques.

Los modelos de desprendimientos rocosos simulan la cinemática de los bloques, calculando su movimiento por la ladera usando la segunda ley de Newton y despreciando el rozamiento con el aire. Algunos de estos modelos además incluyen de manera explícita la rodadura de los bloques (Agliardi and Crosta, 2003; Lan et al., 2007). El estudio de la interacción de los bloques con la superficie topográfica durante los sucesivos impactos es el mayor reto en la modelización de desprendimientos (Bourrier and Hungr, 2011). Los modelos de propagación se pueden clasificar según las estrategias de simplificación de la realidad y las hipótesis que consideran respecto a los siguientes aspectos (Matas et al. 2017): (i) dimensión espacial; (ii) cinemática de los bloques; (iii) forma de los bloques; (iv) modelización del impacto; (v) consideración de la incertidumbre.

Considerar los bloques irrompibles durante su propagación es una hipótesis común en la mayoría de modelos existentes (Li and Lan, 2015). Sin embargo, la fragmentación es un proceso frecuentemente observado en los desprendimientos y se define como la separación de la masa inicial de roca en trozos más pequeños al impactar contra el terreno (Evans and Hungr, 1993). Esta definición incluye tanto la disgregación de los bloques delimitados por las discontinuidades preexistentes en la masa original como la generación de nuevos fragmentos debido a la rotura de roca matriz (Corominas et al. 2012). Las dos principales consecuencias de la fragmentación son la generación de múltiples fragmentos y la divergencia de las trayectorias de estos fragmentos en el punto de impacto. Después de un impacto en el que se produce la rotura del bloque, la masa inicial genera una serie de fragmentos caracterizada por una distribución de volúmenes (Ruiz-Carulla et al. 2015a). Otras consecuencias observadas son rebotes más altos, velocidades pos-impacto mayores (Agliardi and Crosta, 2003) y la eyección de pequeños fragmentos. Estos efectos físicos pueden cambiar significativamente la manera como los desprendimientos interactúan con el terreno, las estructuras de contención y los edificios expuestos. Los análisis despreciando la fragmentación tienden a sobrestimar tanto la energía cinética como el alcance. Por otra parte, la probabilidad de impacto sobre los elementos expuestos se subestima debido a que durante la rotura de los bloques se producen múltiples trayectorias (Corominas et al. 2012).

Respecto a los últimos estudios sobre la fragmentación, Giacomini et al. (2009) realizaron una serie de experimentos a escala real para estudiar el efecto del ángulo de impacto sobre la fragmentación en el caso de materiales con foliación marcada. En este último estudio, la idea de una energía límite que produzca fragmentación propuesta por Fornaro et al. (1990) no pudo ser confirmada. Recientemente, Gili et al. (2016) realizaron diversos ensayos de fragmentación en caída de bloques a escala real en los que tampoco se pudo confirmar el concepto de energía límite, pero se observó una correlación entre el número de bloques generados durante la rotura y la dimensión fractal de la distribución de volúmenes generada.

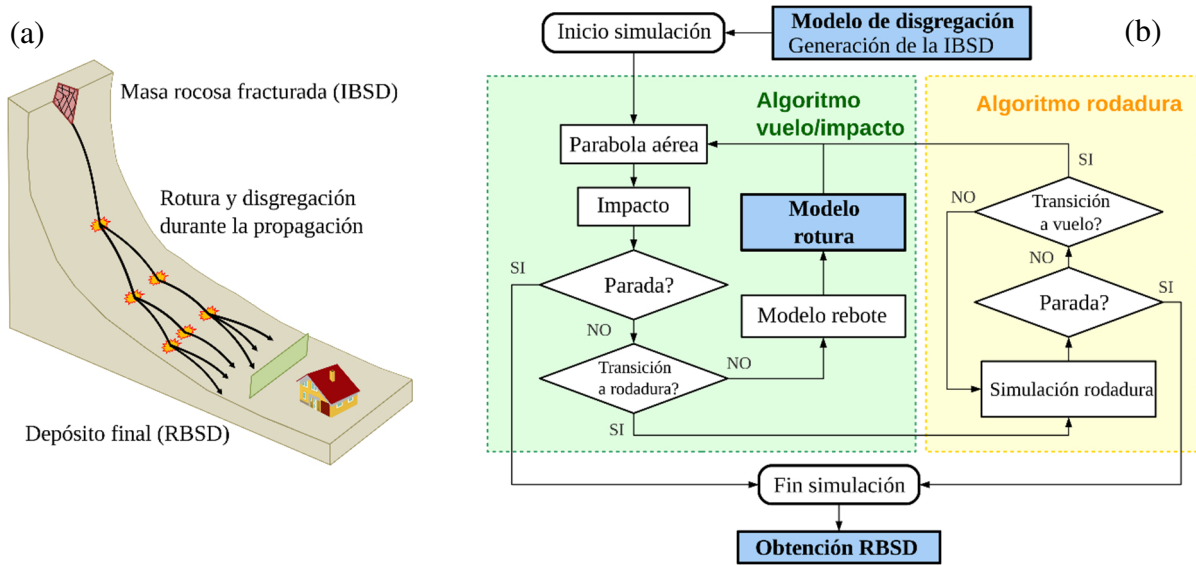
En algunos modelos se ha modelado la disgregación de las masas rocosas a lo largo de las discontinuidades preexistentes empleando el Método de los Elementos Discretos (Cuervo, 2015). Estos modelos requieren definir las discontinuidades preexistentes en la masa rocosa a simular y las leyes que rigen la interacción entre los diferentes fragmentos mediante una aproximación de cuerpo rígido.

Para modelar la rotura, Fornaro et al. (1990) definieron un límite energético a partir del cual los bloques se dividían aleatoriamente en fragmentos más pequeños y la energía cinética se repartía proporcionalmente al volumen de cada uno de ellos. Wang and Tonon (2011) emplearon una red neuronal que reproducía de manera estocástica la fragmentación de un bloque durante un impacto con el terreno alimentada por datos obtenidos con simulaciones mediante Elementos Discretos. En este caso, se emplearon combinaciones de discontinuidades en bloques esféricos con diferentes ángulos de impacto para generar la red neuronal. El modelo de rotura desarrollado por Wang and Tonon (2011) se implementó en el código de simulación de desprendimientos Hy-Stone (Crosta and Agliardi, 2003).

## **2. MARCO CONCEPTUAL DE LA FRAGMENTACIÓN**

Una masa rocosa inestable que se desprende de un talud puede ser maciza o estar formada por un conjunto de bloques de roca intacta delimitados por las discontinuidades preexistentes dependiendo del patrón de fracturación. La distribución volumétrica de los bloques en el macizo se caracteriza mediante la “In Situ Block Size Distriburion” (IBSD). Durante la propagación de la masa ladera abajo, la distribución original puede modificarse debido a la disgregación de la roca por las discontinuidades o por la rotura de la roca matriz. La distribución resultante después de la fragmentación, incluyendo disgregación y rotura, es la llamada “Rockfall Block Size Distribution” (RBSD) (Ruiz-Carulla et al. 2015a). En la Figura 1a se puede observar un esquema del proceso de propagación y fragmentación.

En este trabajo presentamos e implementamos una aproximación estocástica para la consideración de la fragmentación en los modelos de desprendimientos tipo *lumped mass* (toda la masa se considera concentrada en un punto) basados en SIG considerando hipótesis sencillas que pueden ser fácilmente modeladas y ajustadas a casos reales. La aleatoriedad durante los impactos de los bloques con el terreno es una de las principales características de los desprendimientos rocosos, y, consecuentemente, de la fragmentación. Así pues, nos centramos en las variaciones volumétricas que sufre la ISBD durante el proceso de propagación para conseguir representar el fenómeno de la fragmentación de manera global y reproducir las distribuciones finales (RBSD) observadas en campo. Los siguientes párrafos describen el modelo de fragmentación y como ha sido implementado.



**Figura 1.** (a) Esquema de un desprendimiento rocoso fragmentario. (b) Diagrama de simulación de un bloque en un entorno SIG. En las etapas de color azul se considera la fragmentación de los bloques.

En la Figura 1b se muestra el diagrama empleado para la simulación cinemática individual de los bloques y la propuesta de implementación del módulo de fragmentación. El modelo propuesto asume que la disgregación de todos los bloques que forman la ISBD ocurre en el momento en que la masa rocosa se desprende del terreno y que no se requiere energía para la disgregación inicial de la masa. Con esta hipótesis, todos los bloques con sus correspondientes volúmenes son simulados de manera individual. No se considera la posibilidad de que los bloques impacten entre ellos durante la propagación. Así pues, para correr el modelo se necesita definir el volumen de la masa rocosa inicial, que contiene un conjunto de bloques caracterizados por la IBSD.

La conservación de la energía durante un impacto en el que se produce rotura se puede escribir como se muestra en la Ecuación 1 (Giacomini et al. 2009):

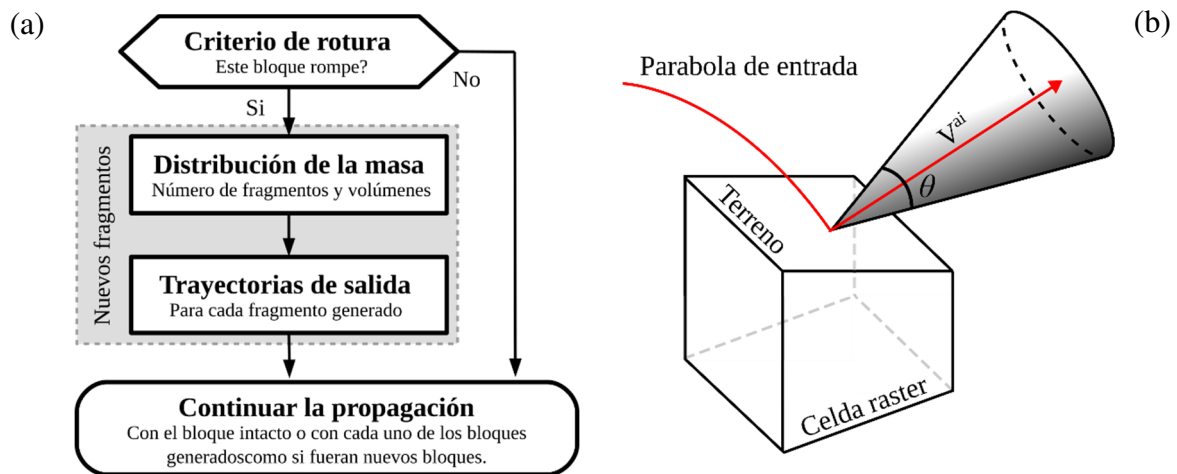
$$E_k^{bi} = E_k^{ai} + E_d + E_b \quad (1)$$

donde  $E_k^{bi}$  es la energía cinética antes del impacto,  $E_d$  la energía disipada por el terreno durante el impacto,  $E_b$  la energía disipada en el proceso de rotura y  $E_k^{ai}$  la suma de la energía cinética de cada uno de los fragmentos resultantes. La hipótesis principal de nuestro modelo de rotura es considerar las pérdidas de energía por impacto con el terreno y rotura del bloque como procesos desacoplados.

Estudios sobre fragmentación de masas rocosas han determinado que la proporción de energía disipada en el impacto por la rotura de los bloques es aproximadamente constante (Giacomini et al. 2009). En nuestro modelo se emplea un coeficiente de pérdida de energía por rotura  $C_b$  para el cálculo de  $E_b$  (Ecuación 2).

$$E_b = C_b \cdot E_k^{bi} \quad (2)$$

Nuestro modelo requiere determinar si en un impacto el bloque rompe o no, la cantidad de energía consumida por el proceso de fragmentación, el número y el tamaño de los fragmentos generados, como se distribuye la energía remanente entre todos los fragmentos y, finalmente, las trayectorias que sigue cada fragmento después de la rotura. La Figura 2a muestra un diagrama de flujo del modelo de rotura propuesto y en los siguientes párrafos se explica en detalle cada uno de los pasos del proceso.



**Figura 2.** (a) Diagrama de flujo del proceso de rotura empleado en el modelo propuesto en la Figura 1b. (b) Cono envolvente de todas las posibles trayectorias que pueden tomar los fragmentos después de la rotura. El eje de revolución del cono sigue la velocidad calculada después del impacto por el modelo de rebote  $V^{ai}$ .

En la aproximación *lumped mass* el rebote se suele definir mediante los coeficientes de restitución normal  $R_n$  y tangencial  $R_t$  (Ecuación 3) que describen la pérdida de velocidad normal y tangencial durante un impacto (Volkwein et al. 2011).

$$R_n = \frac{v_n^+}{v_n^-} \quad \text{y} \quad R_t = \frac{v_t^+}{v_t^-} \quad (3)$$

donde  $v_n^-$  y  $v_t^-$  son la velocidad normal y tangencial antes del rebote mientras que  $v_n^+$  y  $v_t^+$  son las velocidades normal y tangencial después del rebote.

El criterio de rotura determina si un bloque se rompe o no durante un impacto. En el modelo RockGIS se define mediante una energía cinética de impacto límite. Este concepto fue propuesto por Fornaro et al. (1990). Como primera aproximación, cuando más energético es el impacto, mayor es la probabilidad de rotura. Se emplea una ratio para permitir estadísticamente que alguno de los bloques sobreviva a pesar de llegar a la energía límite.

La distribución de la masa entre los diferentes fragmentos generados sigue una ley potencial (Ecuación 4). La idea de emplear leyes potenciales para la distribución de la masa proviene de una serie de ensayos de caída de bloques a escala real realizados en una cantera (Gili et al.

2016) que tenían por objetivo mejorar el conocimiento del proceso de fragmentación y de los modelos de distribuciones fractales propuestos por Ruiz-Carulla et al. (2015b).

$$P_i = c \cdot V^{-b} \quad (4)$$

donde  $c$  y  $b$  son los parámetros que definen la forma de la ley potencial,  $V$  es el volumen de los bloques en metros cúbicos y  $P_i$  es la frecuencia relativa acumulada.

Cuando se cumple el criterio de rotura se generan de manera aleatoria fragmentos siguiendo una ley potencial hasta que la suma de los volúmenes de todos los fragmentos es igual al volumen del bloque original. Se ha empleado la metodología descrita en Moya et al. (2013).

Existen diferentes aproximaciones para repartir la energía entre los nuevos fragmentos. La conservación de la energía y del momento deben satisfacerse con las hipótesis tomadas. Después de que la pérdida energética debida a la rotura, la velocidad de los fragmentos tiene que cumplir la Ecuación 5.

$$\frac{1}{2} m_0 v_0^2 = \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 \quad (5)$$

donde  $m_0$  y  $v_0$  son la masa y la velocidad del bloque antes de la rotura y  $m_i$  y  $v_i$  son las masas y las velocidades de cada uno de los fragmentos resultados de la fragmentación.

Las trayectorias de cada uno de los fragmentos después de la rotura del bloque original se suponen contenidas en un cono. El eje generatriz o de revolución de este cono coincide con el vector velocidad de salida calculada mediante el modelo de rebote y a cada fragmento se le asigna una trayectoria aleatoria dentro del mismo. La abertura de este cono se define mediante el ángulo  $\theta$  (Figura 2b).

### 3. CASO DE ESTUDIO

#### Datos

El modelo de fragmentación presentado en esta contribución ha sido testado con un desprendimiento que ocurrió en un macizo de caliza en la Sierra del Cadí, cerca del pueblo de Vilanova de Banat en noviembre de 2011. Estudios anteriores sobre este evento (Ruiz-Carulla, et al., 2015a) estimaron la masa movilizada en 10,000 m<sup>3</sup>, unas dimensiones del área fuente de 40 metros de ancho y unos 40 metros de altura y un espesor máximo de 14m con forma de cuña. Esta masa se fragmentó significativamente durante su propagación generando una cobertura de bloques frescos (Young Debris Cover, de ahora en adelante YDC) que cubrió un área de aproximadamente 30,000m<sup>2</sup>. Se observó que algunos bloques grandes aislados (Large Scattered Blocks, de ahora en adelante LSB) tuvieron un alcance mayor que la YDC. En Ruiz-Carulla et al. (2015b) la RBSD de este evento se obtuvo midiendo los bloques contenidos en parcelas representativas de zonas con características similares a la YDC. Se midieron sistemáticamente los LSB mayores de aproximadamente 0.5 m<sup>3</sup>. En el trabajo citado, la IBSD se obtuvo mediante una Red Discreta de Fracturas generada a partir de un

modelo digital de superficie previo a la rotura, obtenido mediante fotogrametría digital. En este trabajo hemos empleado la citada IBSD como datos de entrada para realizar las simulaciones. Los parámetros del modelo RockGIS se han ajustado de manera que la RBSD resultante de las simulaciones se ajustara a la medida en campo, así como su centro de gravedad y otros criterios de comparación comentados en secciones posteriores.

### Calibración

Para calibrar el modelo se debe ajustar tanto el alcance de los bloques y los fragmentos generados durante la propagación como la distribución espacial de volúmenes. Como se trata de un proceso acoplado, el ajuste se ha realizado variando los parámetros que afectan a la propagación de los bloques, como los coeficientes de restitución, y los parámetros que definen la rotura de los bloques (límite energético, coeficientes  $b$  y  $c$  y la abertura del cono  $\theta$ ). Los coeficientes de restitución se varían en cada impacto de manera aleatoria un 15% respecto la media para darle un comportamiento estocástico al problema y considerar así las variaciones locales de la rugosidad y otras incertidumbres asociadas al terreno. El valor de 15% fue elegido de manera que las trayectorias tuvieran cierta variabilidad entre simulaciones manteniendo los demás parámetros constantes, pero sin modificar el comportamiento global de los resultados.

Se testaron diversas combinaciones de parámetros fijando intervalos de variación de cada uno de ellos y se seleccionó la combinación que mejor se ajustaba a los siete criterios de ajuste siguientes:

- Posición del centro de gravedad de la distribución de bloques
- Histograma de alcance de los bloques
- Límites de la YDC sobre la superficie de la ladera
- Dispersión lateral de las trayectorias
- Número total de bloques generados
- Distribución de volúmenes de los fragmentos generados
- Numero de bloques y volúmenes que cruzan una línea de referencia (una pista forestal presente en la zona de estudio).

La combinación de parámetros finalmente seleccionada mediante este proceso es un compromiso entre todos los criterios mencionados. Los valores de los parámetros más relevantes se muestran en la Tabla 1.

	$R_n$ [-]	$R_t$ [-]	$E_{\text{limite}}$ [kJ]	$P_{br}$ [-]	$c$ [-]	$b$ [-]	$\theta$ [°]
Bosque	0,2	0,4	8000	0,7	0,02	1,0	10°
Canchal	0,37	0,5					
Roca	0,52	0,7					

**Tabla 1.** Valores de los parámetros empleados para las simulaciones en RockGIS.

## Resultados

Para analizar el evento se han realizado cinco simulaciones considerando la fragmentación. Los parámetros de la Tabla 1 se emplearon permitiendo pequeñas variaciones estocásticas de los mismos y de las condiciones iniciales (posición y velocidad inicial). También se realizaron cinco simulaciones más considerando únicamente la disgregación inicial de la ISBD manteniendo todos los parámetros que afectan a la propagación constantes y desactivando el módulo de rotura para evaluar la influencia de la consideración de la rotura. La Figura 3 muestra la posición donde pararon los bloques en dos simulaciones calculadas en RockGIS: sin considerar la rotura (3a), considerando la fragmentación (3b) y los datos de campo (3c). El tamaño de los círculos es proporcional al volumen de los bloques.

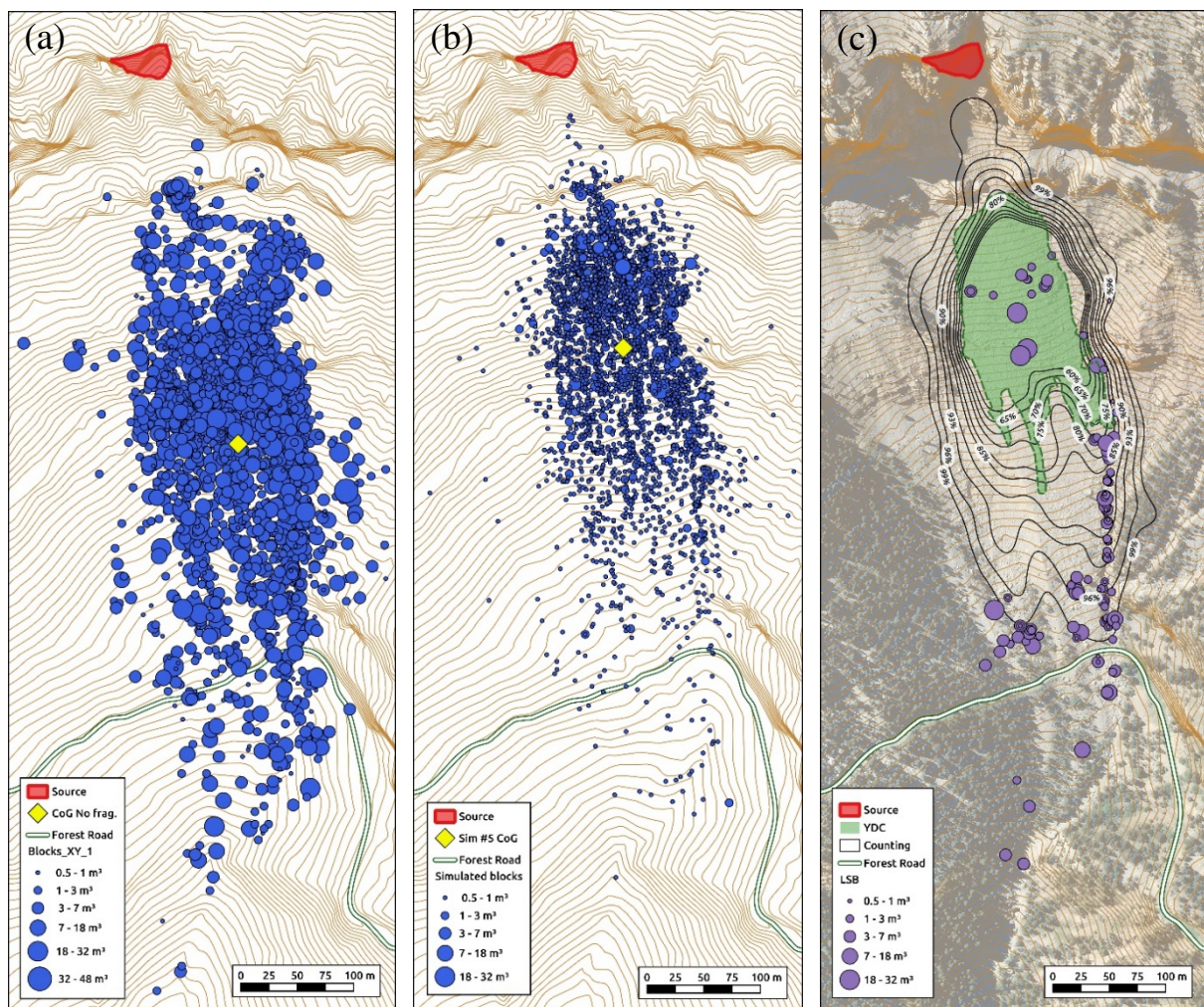
En las simulaciones en las que no se considera la rotura de los bloques la distribución de volúmenes no cambia y por lo tanto el centro de gravedad de la distribución en términos de masa (c.g) tiene un mayor alcance que en las simulaciones considerando la rotura ya que el volumen de los bloques no se reduce durante la propagación. Las simulaciones sin fragmentación mostraron un incremento medio de alcance de 79 m respecto al c.g. medido.

Para comparar cuantitativamente los resultados obtenidos en RockGIS, la posición del c.g. del depósito generado en las cinco simulaciones considerando fragmentación se ha comparado con el c.g. obtenido en el inventario realizado por Ruiz-Carulla (2015a). Las distancias entre el c.g. medido en campo y las simulaciones fueron 1.57, 1.18, 2.82, 2.36 y 5.67 metros para las simulaciones 1 a 5 respectivamente.

En la Figura 3b se observa que el alcance de los bloques simulados es parecido al que se observó en campo. La dispersión lateral de las trayectorias de los bloques también es similar. Para una mejor visualización de la acumulación de los bloques simulados se ha elaborado un mapa de polígonos que contienen un cierto porcentaje de bloques con respecto al total de fragmentos generados. La Figura 3c muestra estos polígonos superpuestos con los datos de campo. Se observa que el perímetro de la YDC es muy similar al contorno del polígono que contiene el 80% de los bloques simulados. Además, la mayoría de los LSB se queda dentro del polígono que contiene el 99% de los bloques. Este estudio de densidad de paradas difumina el efecto de los bloques con mayor alcance ya que no son numéricamente representativos respecto al total (menos del 1%).

Para comparar los alcances obtenidos en RockGIS en la Figura 4a se muestra los histogramas en número total de bloques de las cinco simulaciones considerando fragmentación comparadas con la medida en campo. Nótese que el alcance de los datos de campo ha sido subestimado ya que se ha tenido que considerar un alcance igual al centro geométrico de los polígonos en que se clasificó el depósito durante el inventario. Esto puede explicar porque en esta figura se observa más alcance en el histograma de las simulaciones. También es importante considerar que las simulaciones generaron una media de 84584 bloques mientras que en el inventario se estimaron 60066 bloques. Estas diferencias pueden deberse a que el programa genera bloques pequeños que en el inventario no pudieron medirse.

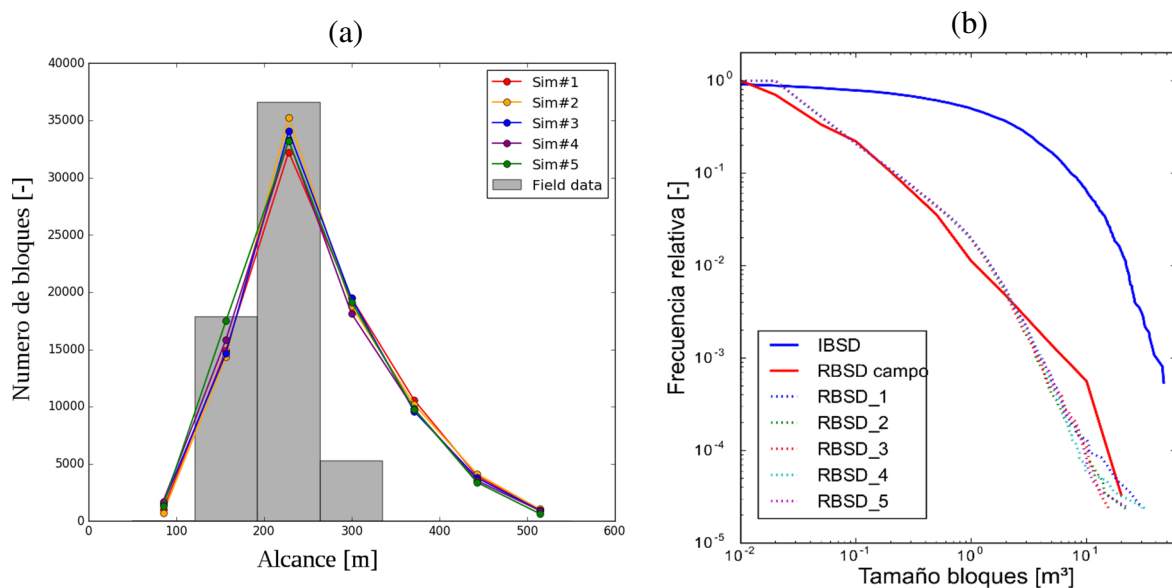




**Figura 3.** Posición final de los bloques obtenida con RockGIS sin fragmentación (a) y con fragmentación (b). Los bloques más pequeños de  $0.5 \text{ m}^3$  se han ocultado para una mejor visualización. (c) Mapa de densidad de bloques acumulados en la simulación #5 considerando fragmentación superpuesta con la YDC y la LSB medidas en campo por Ruiz-Carulla et al. (2015a). En los contornos se muestra en porcentaje de bloques que paran dentro de los polígonos.

Para tener otra medida cuantitativa de la precisión del modelo se consideró una línea de control superpuesta a una pista forestal presente en la zona de estudio para comparar los bloques que la cruzaron durante el evento con los bloques que la cruzaron en las simulaciones. El número total de bloques mayores de  $0.5 \text{ m}^3$  y el volumen total acumulado que cruzaron la pista forestal en las simulaciones son parecidos a los medidos en campo. Durante la realización del inventario los bloques pequeños fuera de la YDC no fueron medidos y solo los bloques mayores de  $0.5 \text{ m}^3$  se midieron en general. Esto puede explicar las diferencias en el número total de bloques entre el inventario y las simulaciones (en las que los bloques más pequeños si se tienen en cuenta).

La Figura 4b muestra las cinco RBSD obtenidas con RockGIS considerando fragmentación versus la RBSD y la IBSD medidas en campo. Las RBSD obtenidas son muy parecidas entre ellas. Además, coinciden en el dominio que correspondiente a la ley potencial empleada para la distribución de la masa entre los diferentes fragmentos durante la rotura (con parámetros  $c=0.02$  y  $b=1$ ) pero difieren en la cola de la curva que representa los volúmenes mayores. Esto puede explicarse debido a la aleatoriedad del proceso de generación de fragmentos y de la energía límite para generar rotura. En una simulación un bloque puede romper mientras que en las mismas condiciones de impacto en otra simulación puede sobrevivir.



**Figura 4. (a)** Comparación entre histogramas de alcance de los bloques en las cinco simulaciones considerando fragmentación con los datos de campo. **(b)** RBSD obtenida en las cinco simulaciones con RockGIS versus la RBSD estimada en campo. La IBSD se midió en campo y se usó la misma para todas las simulaciones. Los dos ejes se encuentran en escala logarítmica.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta contribución hemos presentado una aproximación estocástica para considerar la fragmentación en el estudio de desprendimientos rocosos y la hemos implementado en el código RockGIS. Este código simula la propagación de los bloques por la ladera considerando una aproximación *lumped mass* en un espacio tridimensional definido por un Modelo Digital de Elevaciones y realiza el cálculo del rebote en cada impacto mediante el uso de coeficientes de restitución dependiendo de la cobertura del suelo.

Para analizar el proceso de fragmentación, se considera la disgregación de la masa mediante el sistema de juntas preexistentes antes de iniciar la propagación con la simulación individual de cada uno de los bloques presentes en el macizo (IBSD). Durante la propagación, en cada

impacto del bloque contra el terreno se aplica un modelo de rotura con las siguientes características: (i) se emplea una energía límite como criterio de rotura para decidir si rompe o no; (ii) cuando ocurre la rotura se pierde parte de la energía durante el proceso; (iii) la generación de los fragmentos y la distribución de la masa después de la rotura se realizan siguiendo leyes potenciales; (iv) la energía remanente se reparte entre los fragmentos proporcionalmente a su masa; (v) las trayectorias de salida después de la rotura se suponen inscritas dentro de un cono. Hemos calibrado el modelo con el inventario de campo de un evento ocurrido en Vilanova de Banat en 2011 (Ruiz-Carulla, et al., 2015a). Este inventario incluye la posición de los bloques grandes aislados (LSB) y una estimación de los bloques en la zona de cobertura de bloques frescos (YDC) mediante la extrapolación de muestras. En el proceso de calibración se consideraron tanto el alcance de los bloques como la distribución de volúmenes de los fragmentos obtenida (RBSD). Para comprobar la aleatoriedad del proceso se realizaron cinco simulaciones con los parámetros constantes y se pudo comprobar que todas dieron resultados similares.

El modelo propuesto es capaz de representar el proceso de fragmentación, así como el alcance de los bloques durante su propagación. El modelo tiende a subestimar ligeramente el alcance de los bloques más grandes ya que en las simulaciones se obtuvieron alcances menores. El número total de bloques que cruzó la pista forestal usada para la calibración fue muy parecido a los datos de campo (entre -10% y +21%). En trabajos futuros el modelo debe ser testado en diferentes litologías y condiciones topográficas. También se probarán nuevas metodologías para la distribución de la masa entre los fragmentos como la presentada en Ruiz-Carulla et al. (2017).

## 5. AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer al Ministerio de Economía y Competitividad el soporte económico del proyecto de investigación RockRisk (BIA2013-42582-P), la beca FPI del primer autor (BES-2014-069795) y la beca FPU del quinto autor (FPU13/04252).

## REFERENCIAS

- Agliardi F, Crosta GB (2003) High resolution three-dimensional numerical modelling of rock falls. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 40/4: 455–471.
- Bourrier F, Hungr O (2011) Rockfall dynamics: a critical review of collision and rebound models. In: Lambert S, Nicot F (eds) *Rockfall engineering* ISTE Ltd and John Wiley and Sons Inc: 175–203. doi:10.1002/9781118601532.ch6.
- Corominas J (2013) Avoidance and Protection Measures. In: Shroder JF (ed) *Treatise on Geomorphology*, 7: 259-272. San Diego: Academic Press.
- Corominas J, Mavrouli O, Santana D, Moya J (2012) Simplified approach for obtaining the block volume distribution of fragmental rockfalls. In: Eberhardt E, Froese C, Turner AK, Leroueil S (eds) *Landslides and engineered slopes*, 2: 1159-116.

- Cuervo S (2015) Modélisation des éboulements rocheux par la méthode des éléments discrets: application aux événements réels. Dissertation, Université de Grenoble. Retrieved from [www.theses.fr/2015GREAI066.pdf](http://www.theses.fr/2015GREAI066.pdf)
- Evans S, Hungr O (1993) The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal* 30: pp 620-636.
- Fornaro M, Peila D, Nebbia M (1990) Block falls on rock slopes - application of a numerical simulation program to some real cases. *Proceedings of the 6th International Congress IAEG*. Rotterdam: Balkema: 2173-80.
- Giacomini A, Buzzi O, Renard B, Giani G (2009) Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46: 708-715.
- Gili JA, Ruiz R, Matas G, Corominas J, Lantada N, Núñez MA, Mavrouli O, Buill F, Moya J, Prades A, Moreno S (2016) Experimental study on rockfall fragmentation: in situ test design and firsts results. In: Aversa S, Cascini L, Picarelli L, Scavia C (eds) *Landslides and engineered slopes*, 2: 983-990.
- Hungr O, Leroueil S, Picarelli L (2014) The Varnes classification of landslide types—an update. *Landslides*, 11: 167-194. doi:10.1007/s10346-013-0436-y.
- Lan H, Derek Martin C, Lim CH (2007) RockFall analyst: a GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling. *Computer Geoscience* 33(2): 262-279
- Li L, Lan H (2015) Probabilistic modeling of rockfall trajectories: a review. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 1: 1-14.
- Matas G, Lantada N, Corominas J, Gili JA, Ruiz-Carulla R, Prades A (2017) RockGIS: A GIS-based model for the analysis of fragmentation in rockfalls. *Landslides* (in press) doi:10.1007/s10346-017-0818-7
- Moya J, Corominas J, Mavrouli O (2013). A geomorphologic and probabilistic approach to the number and size of blocks of fragmental rockfalls, 8th IAG International Conference on Geomorphology, Paris. Abstracts volume: 660.
- Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2017) A fractal fragmentation model for rockfalls, *Landslides* (in press) doi: 10.1007/s10346-016-0773-8
- Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2015a) A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits, *Landslides*, 12 (4): 815-825.
- Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2015b) An empirical approach to rockfall fragmentation. *EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium*, Schubert (ed): 151-156.
- Volkwein A, Schellenberg K, Labiouse V, Agliardi F, Berger F, Bourrier F, Dorren LKA, Gerber W, Jaboyedoff M (2011) Rockfall characterisation and structural protection - a review. *Natural Hazards and Earth System Science*, 11: 2617-2651.
- Wang Y, Tonon F (2011) Discrete Element Modeling of Rock Fragmentation upon Impact in Rock Fall Analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 44: 23-35.