

FRAGMENTACIÓN FRACTAL EN DESPRENDIMIENTOS

R. Ruiz-Carulla (1), J. Corominas (2)

(1) y (2) Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona
Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)
roger.ruiz@upc.edu
jordi.corominas@upc.edu

RESUMEN

Se presenta el fenómeno de la fragmentación en desprendimientos rocosos, su análisis y un modelo para entender y reproducir la fragmentación. En 2017 se publicó una primera versión del modelo de fragmentación fractal “Rockfall Fractal Fragmentation Model” que ha sido mejorado en diversos aspectos. Este comunicado describe el fenómeno de la fragmentación en desprendimientos rocosos y sus implicaciones en la definición del peligro y el riesgo asociados a los desprendimientos rocosos. Se muestran un conjunto de inventarios de desprendimientos rocosos donde se observa un comportamiento claramente fractal de la distribución de volúmenes de bloques en los depósitos. Se propone un conjunto de mejoras para el modelo de fragmentación fractal y se ajustan los parámetros del modelo para reproducir los casos inventariados. Las mejoras del modelo permiten generar distribuciones de fragmentos que siguen leyes fractales “scale-variant” o “scale-invariant”, es decir, que se ajusta a una ley potencial (recta en escala doble logarítmica) o pueden adaptar-se en función del tamaño de fragmento respectivamente. Las mejoras también permiten garantizar el balance de masa y condicionar los parámetros del modelo a las superficies nuevas generadas. Los resultados muestran una relación entre la energía potencial en el primer impacto y la nueva superficie generada, así como con los parámetros del modelo de fragmentación. Este modelo se ha implementado en el simulador de caída de bloques RockGIS que permite realizar simulaciones en 3D considerando o no la fragmentación y analizar así sus implicaciones sobre la peligrosidad en términos de multi-impacto y zona afectada. Finalmente, estos nuevos resultados en términos de peligrosidad tienen consecuencias en los análisis cuantitativos del riesgo asociados a desprendimientos rocosos.

1. INTRODUCCIÓN

La presente comunicación se centra en el artículo titulado “*Analysis of Rockfalls by Means of a Fractal Fragmentation Model*” publicado en *Rock Mechanics and Rock Engineering* en 2019 (Ruiz-Carulla R. & Corominas J., 2019). El citado artículo es el nudo de la tesis doctoral del primer autor (Ruiz-Carulla R. 2018), y es la segunda parte del artículo “*A fractal fragmentation model for rockfalls*” (Ruiz-Carulla et al, 2017). Se trata de la actualización del modelo de fragmentación fractal para desprendimientos rocosos que se mejora (permitiendo comportamiento *scale-invariant* y *scale-variant*, así como la mejora en el balance de masa), se calibra con los inventarios de siete desprendimientos rocosos, y se prepara para ser implementado en el simulador de caída de bloques RockGIS desarrollado en la tesis doctoral de Matas (Matas 2020) a partir de las correlaciones observadas entre la energía de impacto, las superficies nuevas de rotura generadas y los parámetros del modelo de fragmentación fractal.

2. LA FRAGMENTACIÓN EN DESPRENDIMIENTOS

La fragmentación del macizo rocoso es la reducción de tamaño de partículas debido a una acción externa. Es de interés en la industria de la minería, particularmente para las actividades de perforación y voladuras porque afecta el costo de excavación y la carga de operaciones. Una voladura eficiente debe evitar voladura o rotura mecánica de los fragmentos de roca (Kulatilake et al. 2010; Sanchidrián et al. 2014). La fragmentación de rocas es relevante para el rendimiento y la eficiencia de la mecánica excavadoras, tuneladoras y el consumo de herramientas de corte (Gong et al. 2005; Bakar et al. 2014). En la naturaleza, la fragmentación de la roca se encuentra asociada a la colisión de meteoritos, asteroides y granos interestelares, el emplazamiento de depósitos volcánicos, o como resultado de la actividad tectónica. La fragmentación también ocurre durante la propagación de avalancha de rocas (Locat et al. 2006; Crosta et al. 2007; Davis et al. 1999) y en desprendimientos de rocas (Giacomini et al. 2009; Wang y Tonon 2010; Crosta et al. 2015). A pesar del creciente número de estudios sobre los desprendimientos de rocas, la fragmentación como consecuencia del impacto en el suelo de rocas es poco conocida.

Un desprendimiento rocoso consiste en un volumen de roca que se desprende de un acantilado y que puede ser un bloque individual o un conjunto de bloques ya precortados y delimitados en el macizo. En este último, la intersección de juntas define bloques individuales, cuya distribución de volúmenes es la In-situ Block Size Distribución (IBSD) (Lu y Latham 1999; Elmouti y Poropat 2012). Como resultado de los impactos, los fragmentos de roca producidos en un desprendimiento aparecen dispersos a lo largo de la ladera. Cuando el desprendimiento es de suficientes dimensiones, se puede formar una cubierta de escombros más o menos continua a la que nombramos Young Debris Cover (YDC). La distribución de volúmenes de los fragmentos producidos por un desprendimiento de rocas es la Rockfall Block Size Distribution (RBSD).

Davis et al. (1999) restringieron la fragmentación a la rotura de las rocas en piezas más pequeñas. Aquí, usamos la fragmentación como un término más genérico que incorpora la rotura y la disgregación, es decir, el incremento del número de fragmentos debido a la rotura de un bloque rocoso, o la disgregación de un conjunto de bloques ya precortados por el sistema de discontinuidades del macizo rocoso. (Ruiz-Carulla et al. 2017).

Los análisis cuantitativos de peligros y riesgos asociados a los desprendimientos de rocas requieren la cuantificación de la fragmentación. El impacto de la masa de desprendimiento de rocas sobre la superficie del suelo da como resultado la producción de un número de piezas más pequeñas que se mueven como cuerpos rígidos independientes, con diferentes velocidades, y a menudo trayectorias divergentes. Debido a esto, la fragmentación afecta tanto el alcance como la energía de los nuevos fragmentos (Agliardi et al. 2009) y la probabilidad de alcance con los elementos en riesgo (Corominas et al. 2019). Análisis de caída de rocas basados en la suposición de grandes masas de rocas ininterrumpidas o sin rotura producirá resultados poco realistas (Okura et al. 2000; Dorren 2003). El análisis de la fragmentación de desprendimientos ha sido abordado empíricamente mediante pruebas a escala real (Giacomini et al. 2009; Gili et al. 2016), y en el laboratorio (Bowman y Take 2015). Los resultados mostraron la complejidad en la predicción de la distribución del tamaño de los fragmentos basados en los umbrales de energía de impacto de bloques de roca individuales. Por otro lado, las simulaciones numéricas con elementos discretos métodos resaltan que la alta energía cinética asociada a pendientes pronunciadas aumenta la intensidad de la fragmentación (Zhao et al. 2017).

Perfect (1997), describió la fragmentación como un fenómeno natural que puede caracterizarse por medio de fractales. En el presente trabajo presentamos las mejoras del modelo de fragmentación fractal de Ruiz-Carulla et al. (2017), que reproduce los procesos de disgregación y rotura en desprendimientos mediante la calibración de siete desprendimientos fragmentarios inventariados.

3. MODELO DE FRAGMENTACIÓN FRACTAL

El modelo de fragmentación fractal tiene por objetivo transformar un volumen de bloque inicial o una distribución de volúmenes de bloques inicial (IBSD, In-situ Block Size Distribution), en una distribución de volúmenes de bloques (o fragmentos) final producida por un desprendimiento (RBSD, Rockfall Block Size Distribution). La siguiente figura muestra el planteamiento de la fragmentación como la generación de una distribución de volúmenes (RBSD) a partir de un único volumen inicial o de una distribución inicial (IBSD), ambas distribuciones representadas con volúmenes de bloque ordenadas de menor a mayor y en término de número acumulado. Se evidencia que la fragmentación, como es lógico, reduce el volumen de los bloques creando un número mayor de fragmentos de tamaños menores (flechas verdes).

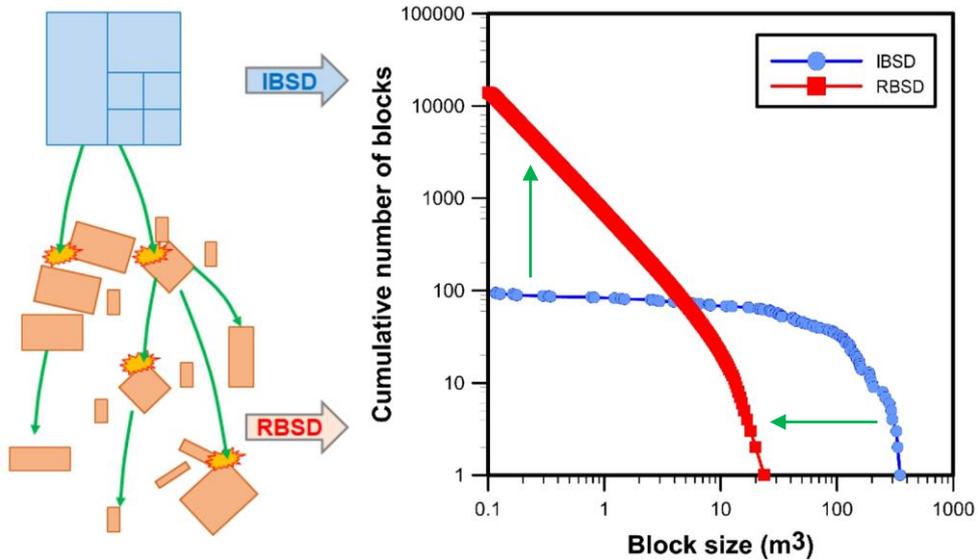


Figura 1: Fragmentación descrita como transformación de una IBSD a una RBSD.

La siguiente figura esquematiza el modelo de fragmentación fractal propuesto en (Ruiz-Carulla et al. 2017) donde se pueden consultar los detalles, pero que a grandes rasgos, se trata de redistribuir el volumen de un bloque siguiendo una ley fractal, que no es más que una ecuación potencial con normas de generación de bloques iterativas, controladas por un parámetro geométrico “b” y por una probabilidad de rotura o proporción afectada “P”, y que ambas definen una dimensión fractal tal y como define Perfect (1997).

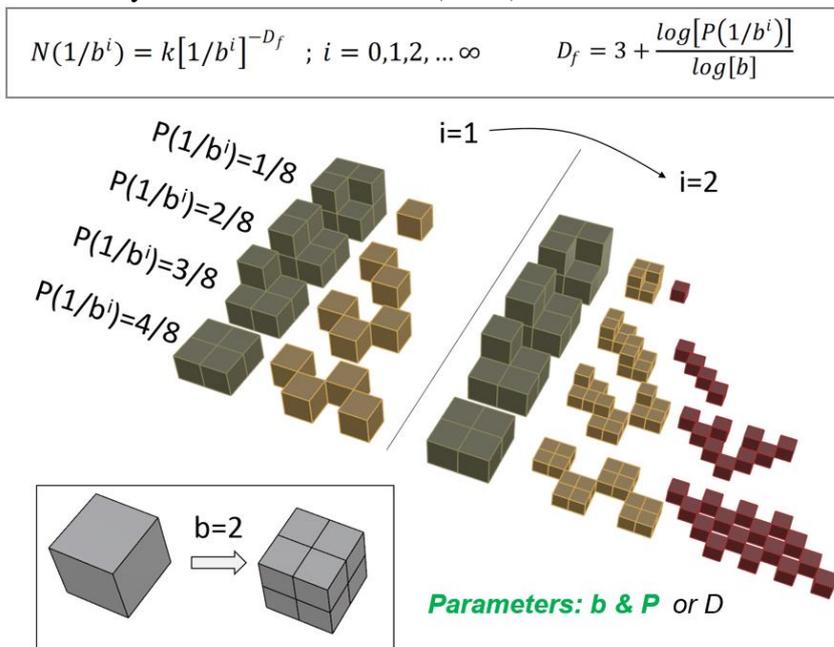


Figura 2: Esquema del modelo de fragmentación fractal (Ruiz-Carulla et al 2017).

El esquema anterior muestra algunos problemas, como que, en cada iteración, todos los fragmentos generados tienen el mismo volumen, mientras que en la realidad lo que se observa es una distribución de volúmenes decreciente constante, y no volúmenes iguales, que además pueden dificultar cumplir el balance de masa. A la vez, las distribuciones observadas en nuestros inventarios de desprendimientos, muestran que las distribuciones de bloques no siguen exactamente una ley potencial (una línea recta en escala doble logarítmica de número acumulado de bloques versus tamaño de bloque), sino que se observa una curvatura a medida que se reduce el volumen de bloque. Este fenómeno es ampliamente descrito en la teoría fractal y el mismo Perfect (1997) propuso una formulación “*scale-variant*” para reproducirla, en contraposición a la formulación “*scale-invariant*” mostrada que mantenía las mismas proporciones en todos los órdenes de magnitud. Así, la siguiente figura muestra la formulación “*scale-variant*” propuesta por Perfect (1997) que añade un parámetro “*r*” y que se incorpora en el modelo de fragmentación fractal, y substituye la “*P*” de probabilidad de rotura por la “*q*” probabilidad de supervivencia o “*Sr*” de ahora en adelante.

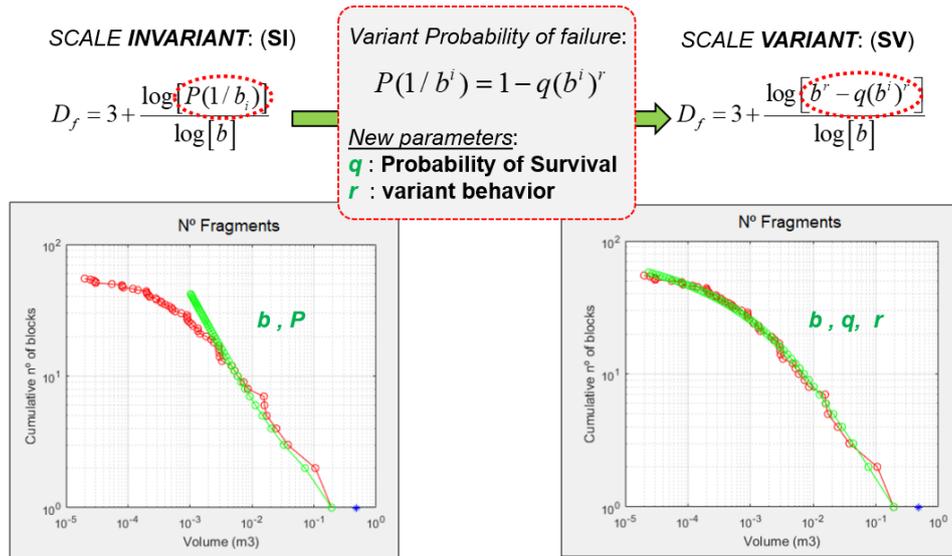


Figura 3: Parámetros y formulación “*scale-invariant*” y “*scale-variant*” y su representación gráfica.

La incorporación de la formulación “*scale-variant*” permite reproducir distribuciones de fragmentos con curvaturas muy diversas a partir de un solo bloque inicial como se muestra en la siguiente figura de resultados del modelo, donde los puntos rojos son distribuciones de bloques reales medidos en ensayos de fragmentación a escala real (Ruiz-Carulla et al 2020), y los puntos verdes son los resultados del modelo de fragmentación fractal calibrando los parámetros a partir de un volumen inicial conocido representado por el punto azul.

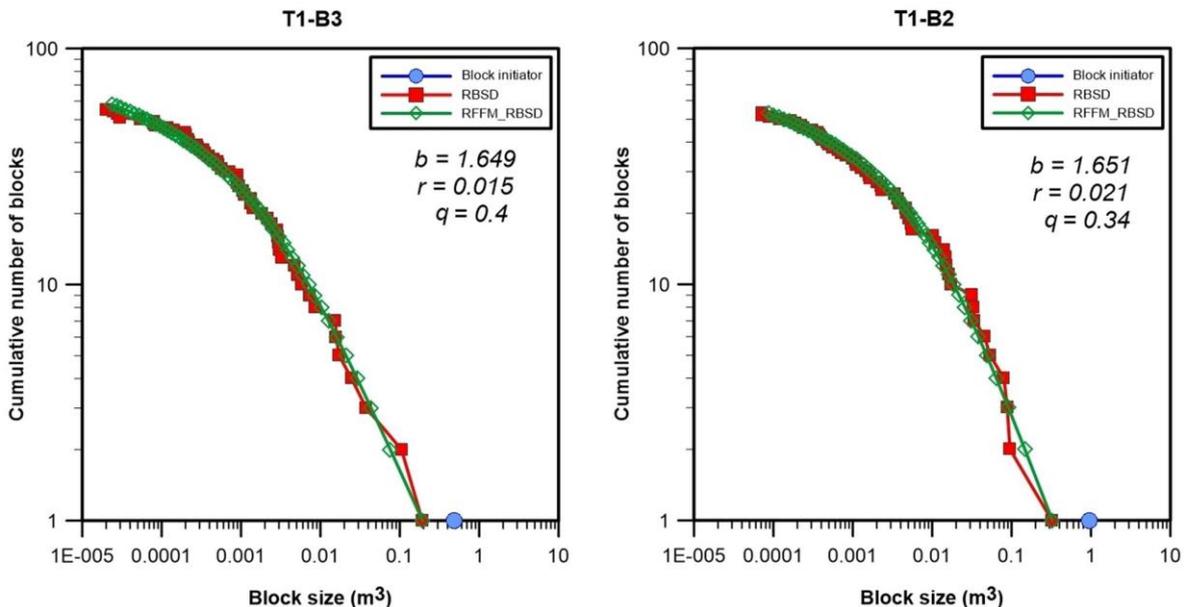


Figura 4: Resultados de la calibración con datos reales del modelo de fragmentación fractal con “*scale-variant*”.

4. APLICACIÓN Y CALIBRACIÓN EN DESPRENDIMIENTOS INVENTARIADOS

Para calibrar los parámetros del modelo de fragmentación fractal y analizar también su bondad y capacidad de reproducir distintos desprendimientos rocosos fragmentarios, se realiza un exhaustivo inventario de siete desprendimientos siguiendo las metodologías descritas en (Ruiz-Carulla et al, 2015; Ruiz-Carulla R, 2018). En resumen, se miden todos los fragmentos del depósito si es posible con una cinta métrica midiendo 3 longitudes asimilándolo a un prisma para obtener su volumen, o se realizan parcelas de medida y se extrapola la distribución. Se realizan vuelos de dron para obtener, con técnicas fotogramétricas, los modelos 3D de cada escenario y poder medir las geometrías, caracterizar el patrón de discontinuidades, reconstruir en 3D el volumen desprendido, y estimar en cada caso la IBSD cortando el volumen reconstruido con las juntas identificadas explícitamente, es decir, allí donde se encuentran. Así, para cada desprendimiento inventariado, se dispone de la IBSD y de la RBSD para calibrar los parámetros del modelo de fragmentación y analizar su relación con características de cada desprendimiento.

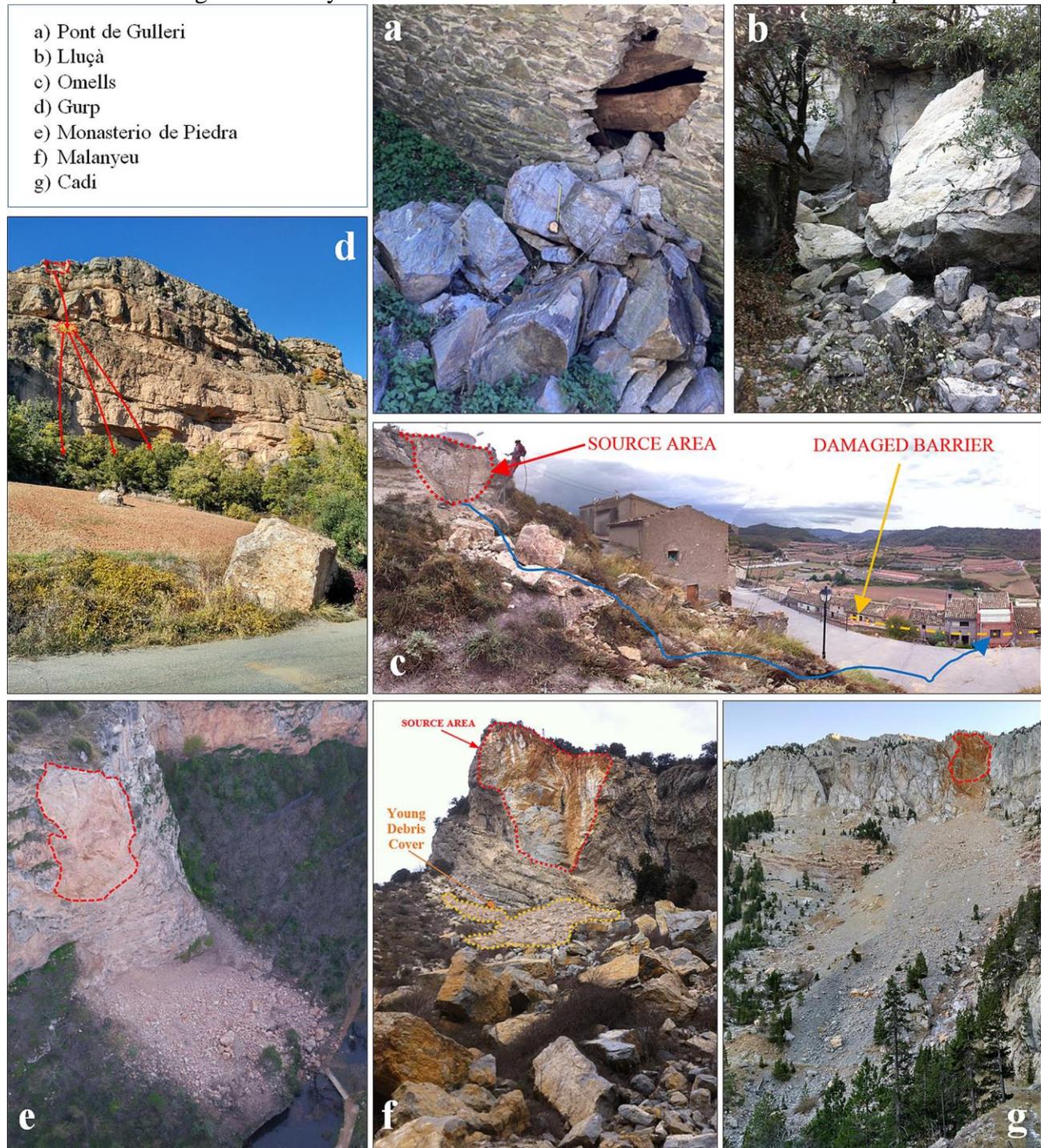


Figura 5: Fotografías de los siete desprendimientos inventariados.

La siguiente tabla resume de los datos más relevantes de los inventarios realizados.

Rockfall	PdG	Omells	Lluçà	Gurp	MdP	Malanyeu	Cadi
Tipo de rotura	Planar	Planar	Vuelco	Vuelco	Planar	Vuelco	Planar
Litología	Esquisto	Arenisca	Arenisca	Conglomerado	Calcárea	Calcárea	Calcárea
Volumen total RBSD (m ³)	2.6	4.2	10.7	100	900	4350	6351
Volumen total IBSD (m ³)	2.6	4.2	10.7	100	997	4945	7663
RMR	76	64	72	82	70	74	60
Densidad (kg/cm ³)	2.72	2.35	2.46	2.69	2.5	2.64	2.68
Resist. Tracción (MPa)	6.53	2.03	2.07	5.47	10.00	7.03	12.10
UCS (MPa)	32.17	21.38	21.77	38.36	35	13.33	35.29
E young (MPa)	17,385	5185	730	74,831	20,000	12,992	22,761
Poisson	0.27	0.006	0.18	0.21	0.1	0.05	0.07
Nº de bloques estimados en la RBSD	116	48	78	500	10,790	28,788	60,980
Nº de bloques medidos en la RBSD	116	48	78	500	2256	2721	1524
Vol. Mínimo medido (m ³)	0.0001	0.0007	0.0007	0.001	0.001	0.0001	0.01
Vol. Máximo medido (m ³)	0.28	1.1	8.5	22	27	445	31
Superficie de cicatriz 3D (m ²)	9.55	15	32	87	578	2120	3532
Altura escarpe (m)	15	3.3	6.8	100	50	70	150
Altura primer impacto (m)	12	1	0.6	39	35	10	50
Altura del CdG (m)	13	5	2.8	110	60	80	230
Altura total de caída (m)	13	14.5	6.6	150	70	100	520
Alcance máximo (m)	5	22	9.2	152	70	130	710
Alcance del volumen máximo (m)	5	3	5.6	152	40	80	200
Ángulo de alcance (°)	69	33	36	45	45	38	36
Ancho del depósito (m)	2.5	15	5	40	50	80	130
Área del depósito (m ²)	5	300	45	2000	4200	6000	44,000

Tabla 1: Resumen de datos de los siete desprendimientos inventariados.

La siguiente figura muestra los modelos 3D de cada desprendimiento, representado las zonas afectadas por pendientes, menos el caso de Lluçà donde se representa por altura de bloque.

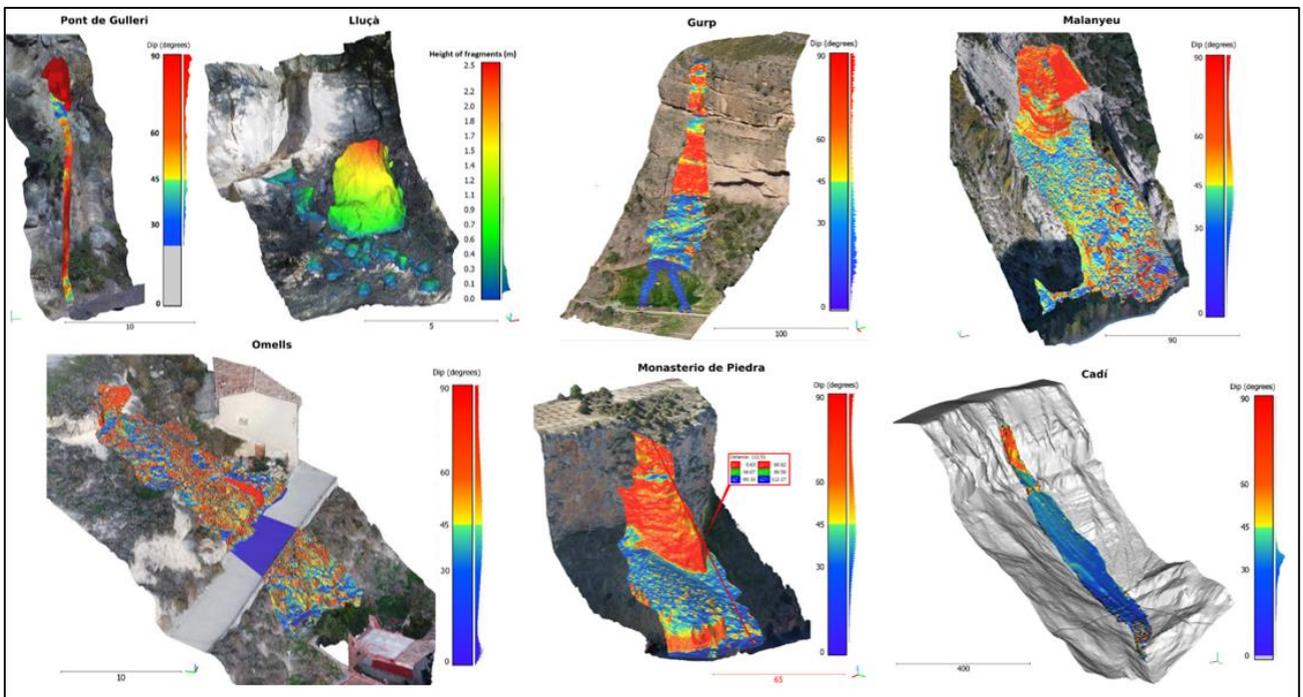


Figura 6: Modelos 3D de los desprendimientos inventariados.

La siguiente figura muestra dos ejemplos, el del desprendimiento de Monasterio de Piedra y el de Malanyeu, de la reconstrucción del volumen de rotura y la generación de la IBSD cortando el volumen con las discontinuidades identificadas en el macizo en la zona de la cicatriz.

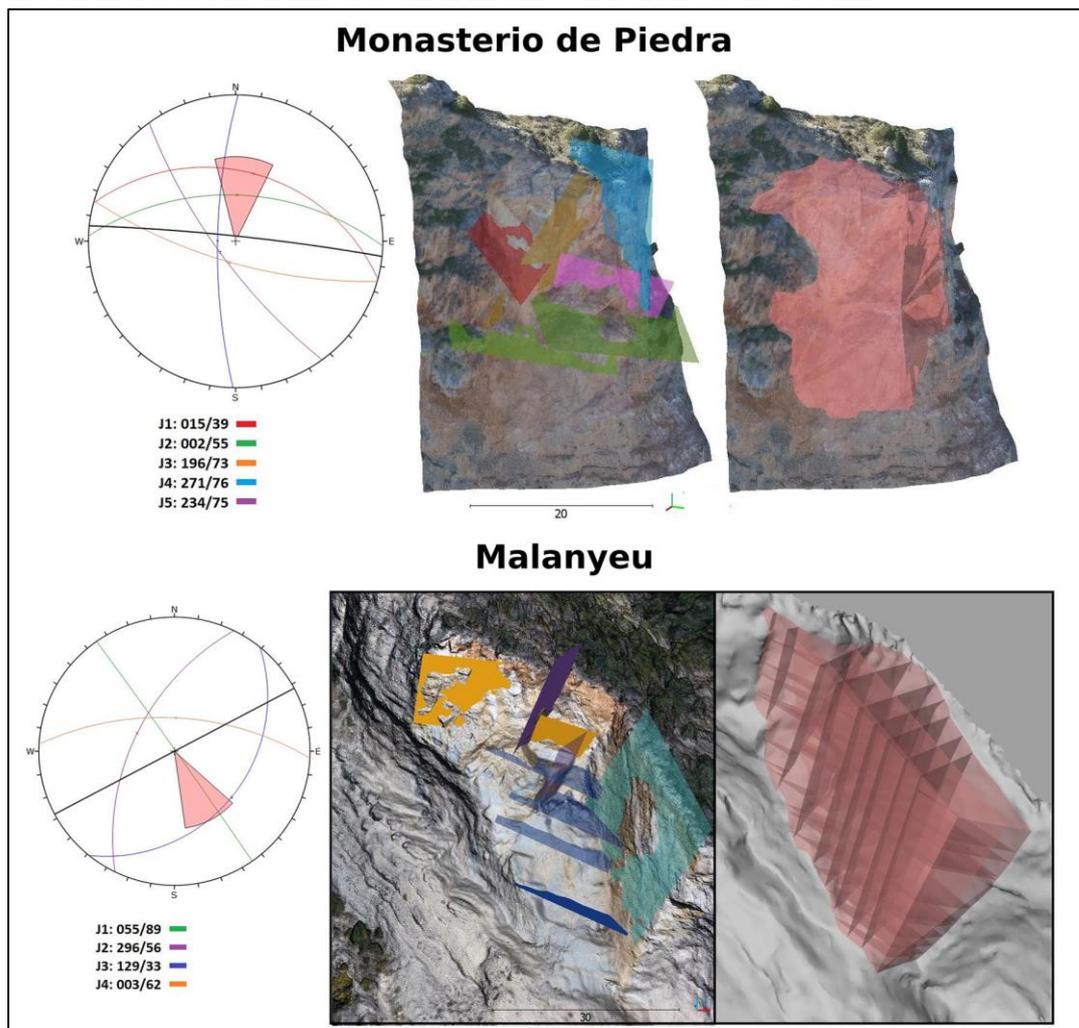


Figura 7: Ejemplos de reconstrucción de volumen desprendido y de su corte con las juntas identificadas en el macizo para obtener la IBSD, en los caos de Monasterios de Piedra y de Malanyeu.

Disponer de las distribuciones de volúmenes de bloques de cada desprendimiento (RBSD) es algo poco común, ya que en general no se inventarían con tanto detalle los desprendimientos. Y menos aún, la reconstrucción del volumen desprendido y la estimación de la distribución de bloques antes de la rotura (IBSD). Esta información es muy valiosa para el estudio, análisis e interpretación del fenómeno de la fragmentación por sí solo, pero más aún cuando se puede utilizar para calibrar los parámetros del modelo de fragmentación fractal propuesto.

La siguiente figura muestra, primero, todas la RBSD obtenidas, y a continuación, para cada desprendimiento, la IBSD (en azul), la RBSD (en rojo) y la distribución que genera el modelo de fragmentación fractal (RFFM, en verde) ajustando los parámetros para conseguir los resultados más próximos posibles a la realidad medida. La bondad de los ajustes obtenidos se describe en detalle en Ruiz-Carulla et al 2019, pero se puede resumir en que los valores de la χ^2 reducida obtenida, que mide la diferencia entre la distribución RBSD real y la distribución propuesta por el modelo (RFFM), se encuentra en valores en 10^{-4} y 10^{-2} , así como su superposición a simple vista.

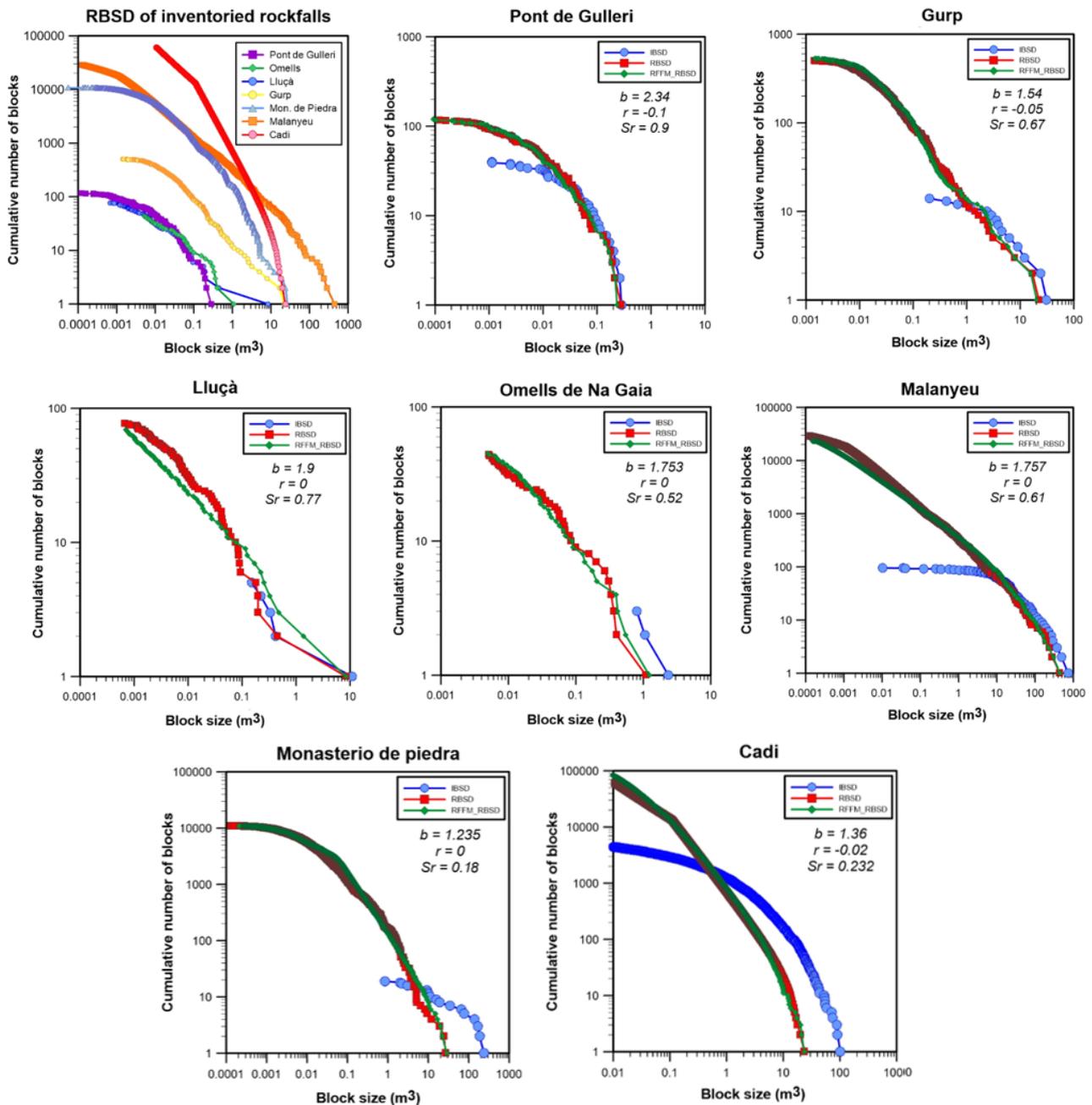


Figura 8: Distribuciones de volumen de bloques en los depósitos de los desprendimientos inventariados (RBSD); y calibración del modelo de fragmentación fractal en cada desprendimiento, con la IBSD estimada (en azul), la RBSD medida (en rojo) y los resultados generados por el RFFM (en verde) calibrando los parámetros para ajustarse a los datos reales medidos en campo.

5. DISGREGACIÓN Y ROTURA: NUEVAS SUPERFÍCIES GENERADAS

Al principio se ha descrito el término fragmentación, indicando que engloba dos mecanismos distintos: 1) la disgregación de los bloques rocosos que ya se encuentran precortados por las discontinuidades presentes en el macizo rocosos; y 2) la rotura, que implica que de un bloque se generan un numero de fragmentos de volúmenes inferiores al volumen del bloque inicial. En este sentido, la disgregación no supone generar nuevas superficies o caras, mientras que la rotura implica la generación de nuevas caras frescas para poder separar los bloques en nuevos fragmentos. Entonces, se puede medir la proporción de disgregación y de rotura, así como la intensidad de la rotura, en función de la cantidad de nuevas superficies generadas.

Se dispone del área inicial de todos los bloques de las IBSD ya que son bloques explícitamente reconstruidos en 3D, con formas irregulares, y de los que se listan su superficie envolvente de cada bloque 3D. También se dispone del área total de todos los bloques medidos en las RBSD, aunque en este caso con la hipótesis de prismas regulares. Finalmente, la nueva área generada es la diferencia entre la inicial y la total final tal y como se ejemplifica en la siguiente figura para un solo bloque y que se aplica a las distribuciones IBSD y RBSD completas. Entonces, se puede representar cada desprendimiento por su área total de bloques (superficies de las caras de los bloques en el depósito) sobre su volumen total de desprendimiento, y que parte de esta ya existía en la IBSD y que parte se ha generado debido a la rotura de bloques generando nueva área (nuevas caras). En la siguiente figura se muestran tales proporciones y se representa el porcentaje o proporción de nuevas áreas (NA) sobre área total (TA). La proporción NA/TA es un indicador de la violencia del desprendimiento y de la cantidad de energía que se ha destinado a generar nuevas superficies, y se puede relacionar con los parámetros del modelo de fragmentación Sr y b.

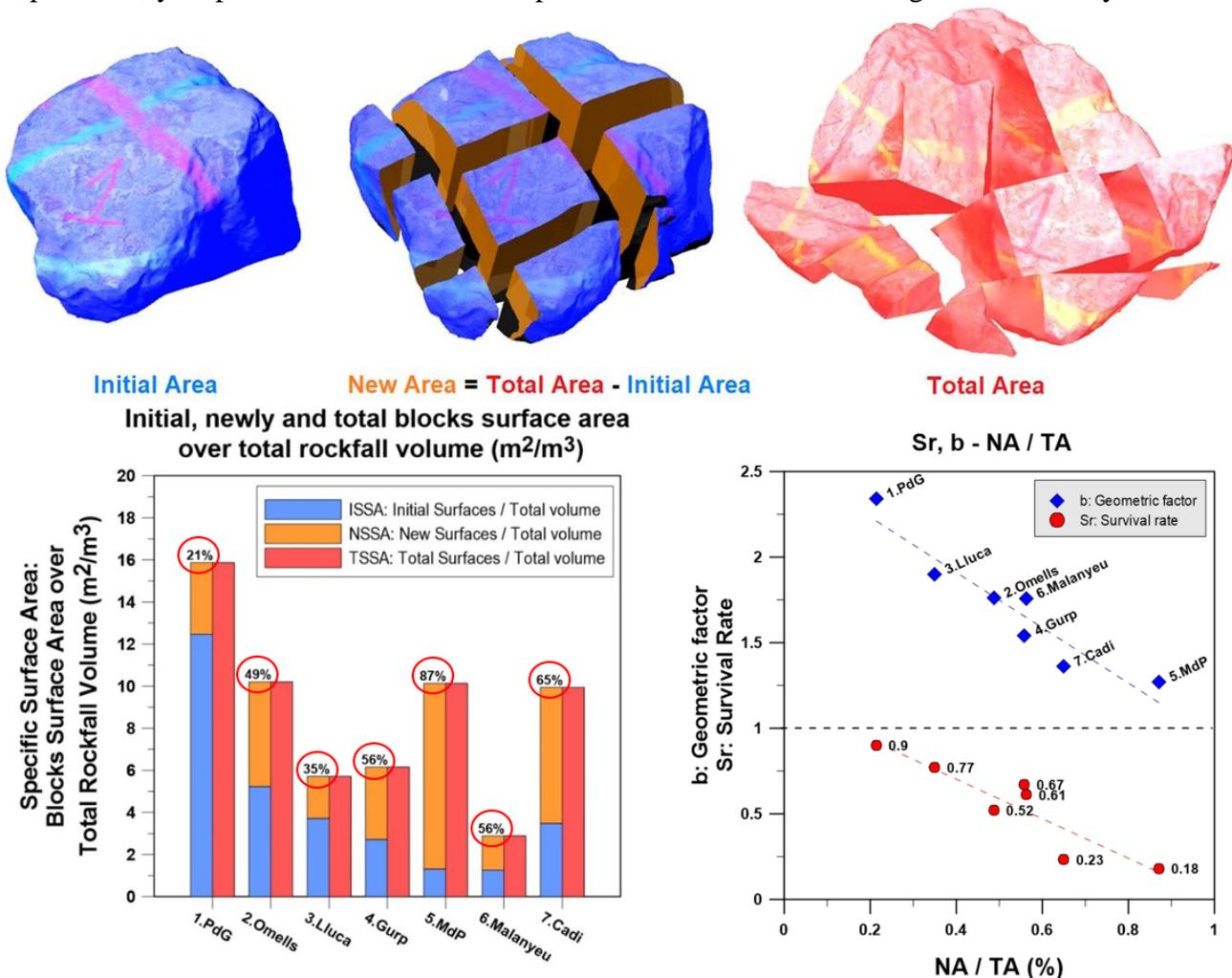


Figura 9: Conceptos de área inicial, total y nueva generada. Desprendimientos según su área de bloques específica: total, inicial y nueva generada, y su relación con los parámetros del modelo.

Se realizan un conjunto de análisis de todos los descriptores recogidos en los desprendimientos, y se identifican algunas buenas correlaciones, entre ellas, una ley potencial entre la energía potencial en el punto del primer impacto (cambio de pendiente del perfil del terreno) y la cantidad de nuevas superficies generadas. Esto parece lógico ya que las distintas teorías de creación y propagación de fracturas relacionan las magnitudes de energía y las de nuevas área generadas.

En este punto, se plantea un esquema (Figura 10) para determinar un cierto rango de los parámetros del modelo en función de la energía potencial del primer impacto, que es un valor que se puede estimar conociendo la geometría del terreno (con un perfil 2D para medir altura es suficiente), y el volumen potencialmente inestable. Así, a partir de la identificación y delimitación de un volumen potencialmente inestable, se puede estimar su masa con un valor de densidad de la roca en cuestión, y se puede estimar una IBSD a partir de la caracterización del patrón de discontinuidades en la zona del volumen potencialmente inestable. Con la IBSD se obtiene el área inicial de los bloques (IA). Con la estimación de la energía potencial en el primer impacto más relevante, se estima la cantidad de nueva área generada (NA) con la relación empírica encontrada que se muestra en la figura siguiente. Como el área total será el área inicial más el área nueva ($TA=IA+NA$), ya dispondremos de la relación NA/TA , y se pueden utilizar las relaciones empíricas encontradas que relacionan la proporción NA/TA con los parámetros del modelo de fragmentación “b” y “Sr”. Estos parámetros se utilizan en el modelo conjuntamente con al IBSD como datos de entrada y se obtiene la RBSD que produciría el volumen potencialmente inestable identificado en el caso de rotura y producir un desprendimiento.

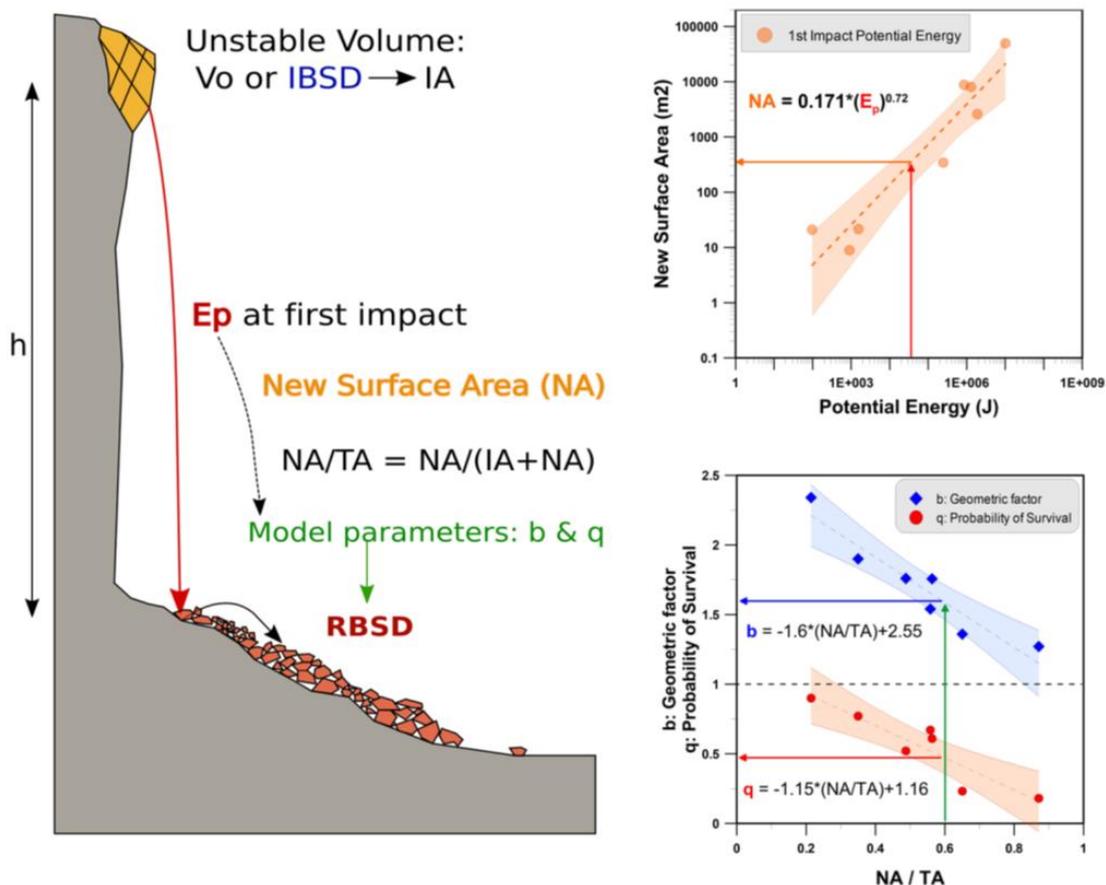


Figura 10: Esquema de estimación de los parámetros “Sr” y “b” del modelo de fragmentación a partir de la proporción NA/TA que se obtiene de la IBSD y de la energía potencial en el primer impacto.

6. IMPLEMENTACIÓN EN UN SIMULADOR DE DESPRENDIMIENTOS: ROCKGIS

Como es evidente que el esquema anterior no es trivial ni de fácil aplicabilidad, y teniendo en cuenta que el modelo de fragmentación fractal propuesto solo trabaja con los estadios inicial y final (IBSD y BRSD) sin incorporar en ningún lugar la cinemática y la distribución espacial del fenómeno, es evidente que lo necesario es un simulador de propagación de desprendimiento con

un módulo activable de fragmentación basado en el modelo propuesto y las relaciones obtenidos. En este marco, Matas (2020) desarrolla el simulador RockGIS que implementa el modelo de fragmentación fractal y el esquema anterior, modificando los parámetros del modelo (S_r y b) en función de la energía de cada impacto que se calcula durante la propagación. Así, el código RockGIS es la herramienta más avanzada de la que disponemos para ajustar a la vez los puntos de parada (el alcance de un desprendimiento) y la distribución de bloques considerando o no la fragmentación, que conlleva relevantes efectos en las trayectorias y en las energías de impacto.

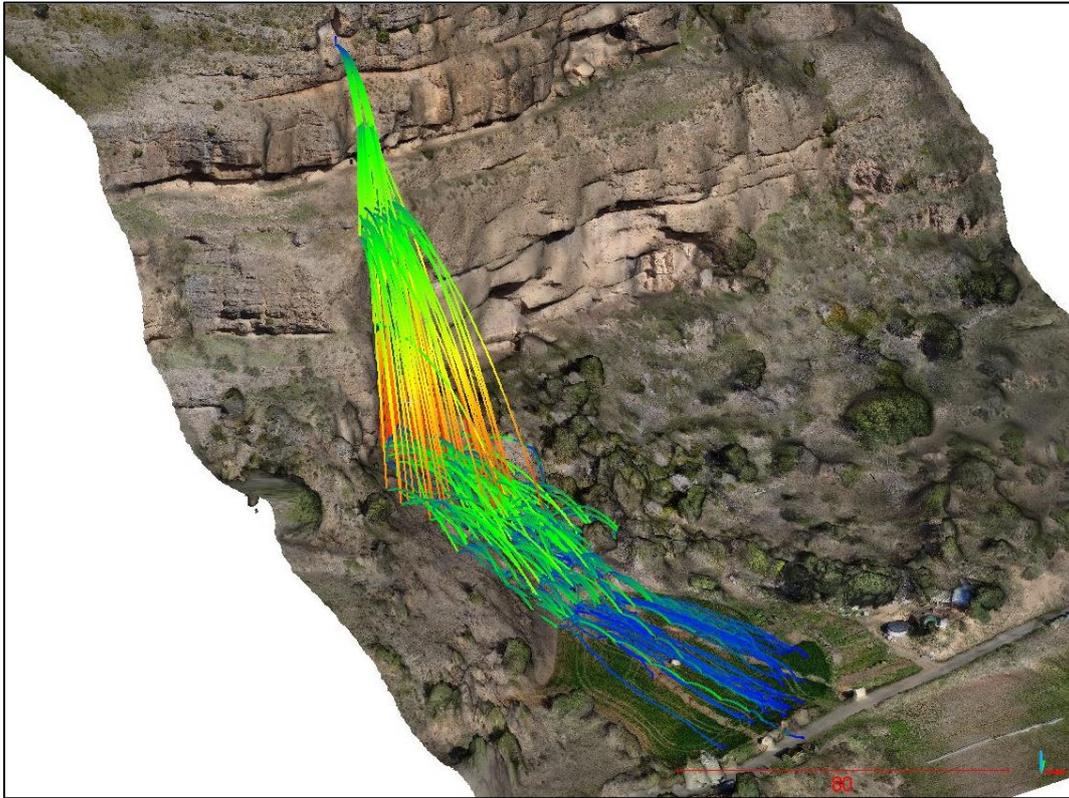


Figura 11: Resultados obtenidos con el simulador RockGIS en el desprendimiento de Gurp con fragmentación.

7. CONCLUSIONES

El presente trabajo muestra la aplicación del modelo de fragmentación fractal para desprendimientos en siete casos inventariados. Los resultados muestran que el modelo es capaz de reproducir muy bien las distribuciones de bloques medidas en los depósitos de los desprendimientos inventariados. El modelo presenta algunas mejoras respecto al presentado en 2017, de modo que ahora puede ajustar perfectamente el balance de masa y puede reproducir distribuciones de bloques siguiendo un esquema “*scale-variant*” que varía en función del orden de magnitud de los bloques. Los inventarios exhaustivos midiendo miles de bloques en depósitos, así como las ventajas de trabajar sobre modelos 3D obtenidos mediante el vuelo de dron y la reconstrucción fotogramétrica, han permitido una cantidad y calidad de información sin la cual no habría sido posible la calibración del modelo de fragmentación ni la obtención de las relaciones entre la energía potencial en el primer impacto, la nueva área generada y los parámetros del modelo. Esta información ha sido fundamental para la implementación del modelo de fragmentación en el simulador RockGIS, que es la herramienta más avanzada de la que disponemos para ajustar a la vez la cinemática de la propagación de desprendimientos (hasta donde llegan los bloques) combinada con la distribución de volúmenes de los bloques o fragmentos al poder reproducir la rotura de los bloques en los impactos.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido desarrollado en el marco del Proyecto de Investigación “Avances en el análisis cuantitativo del riesgo de caída de rocas (QRA) incorporando desarrollos en geomática (GeoRisk)” con referencia PID2019-103974RB-I00, financiado por MCIN/AEI/10.13039/501100 011033, Ministerio de Ciencia e Innovación (MCIN) y la Agencia Estatal de Investigación (AEI).

REFERENCIAS

- Agliardi F, Crosta G, Frattini P (2009) Integrating rockfall risk assessment and countermeasure design by 3D modelling techniques. *Nat. Hazards Earth Syst Sci* 9:1059–1073. <https://doi.org/10.5194/nhess-9-1059-2009>
- Bakar MZ, Gertsch LS, Rostami J (2014) Evaluation of fragments from disc cutting of dry and saturated sandstone. *Rock Mech Rock Eng* 47:1891–1903
- Bowman ET, Take AW (2015) The runout of chalk cliff collapses in England and France—case studies and physical model experiments. *Landslides* 12(2):225–239. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0472-2>
- Corominas J, Matas G, Ruiz-Carulla R (2019) Quantitative analysis of risk from fragmental rockfalls. *Landslides* 16(1):5–21. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-1087-9>
- Crosta GB, Frattini P, Fusi F (2007) Fragmentation in the Val Pola rock avalanche, Italian Alps. *J Geophys Res* 112:F01006
- Crosta GB, Agliardi F, Frattini P, Lari S, Lollino G (2015) Key issues in rock fall modeling, hazard and risk assessment for rockfall protection. *Eng Geol Soc Territ* 2:43–58. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_4
- Davies TR, McSaveney MJ, Hodgson KA (1999) A fragmentation spreading model for long-runout rock avalanches. *Can Geotech J* 36:1096–1110
- Dorren LKA (2003) A review of rockfall mechanics and modeling approaches. *Prog Phys Geogr* 27(1):69–87
- Elmouti MK, Poropat GV (2012) A method to estimate in situ block size distribution. *Rock Mech Rock Eng* 45(3):401–407
- Giacomini A, Buzzi O, Renard B, Giani GP (2009) Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces. *Int J Rock Mech Min Sci* 46:708–715
- Ruiz-Carulla R., J. Corominas, J. A. Gili, G. Matas, N. Lantada, J. Moya, A. Prades, M.A. Núñez-Andrés, F. Buill and C. Puig (2020) Analysis of fragmentation of rock blocks from real-scale tests. *Geosciences*, 10 (8), 308, Special Issue "Rockfall Hazard(abrir en una ventana nueva)", <https://doi.org/10.3390/geosciences10080308>
- Gong QM, Zhao J, Jiao YY (2005) Numerical modeling of the effects of joint orientation on rock fragmentation by TBM cutters. *Tunn Undergr Space Technol* 20(2):183–191. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2004.08.006>
- Kulatilake PSHW, Qiong W, Hudaverdi T, Kuzu C (2010) Mean particle size prediction in rock blast fragmentation using neural networks. *Eng Geol* 114:298–311. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.05.008>
- Locat P, Couture R, Leroueil S, Locat S (2006) Fragmentation energy in rock avalanches. *Can Geotech J* 85(20060135):830–851. <https://doi.org/10.1139/T06-045>
- Lu P, Latham JP (1999) Developments in the assessment of in situ block size distributions of rock masses. *Rock Mech Rock Eng* 32:29–49. <https://doi.org/10.1007/s006030050042>
- Matas G. (2020) Modelling fragmentation in rockfalls. Tesis doctoral del programa de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Ingeniería de Ingeniería Civil y Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya. UPC-BarcelonaTech).
- Okura Y, Kitahara H, Sammori T, Kawanami A (2000) The effects of rockfall volume on runout distance. *Eng Geol* 58(2):109–124
- Perfect E (1997) Fractal models for the fragmentation of rocks and soils: a review. *Eng Geol* 48:185–198
- Ruiz-Carulla, R. & Corominas, J. (2019). Analysis of Rockfalls by Means of a Fractal Fragmentation Model. *Rock Mech Rock Eng* <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01987-2>
- Ruiz-Carulla R. (2018) Rockfall analysis: Failure, fragmentation and propagation characterization. Tesis doctoral del programa de Ingeniería del Terreno. Dpto. de Ingeniería de Ingeniería Civil y Ambiental (Universitat Politècnica de Catalunya. UPC-BarcelonaTech).
- Ruiz-Carulla R., Corominas J. and Mavrouli O. (2017) A fractal fragmentation model for rockfalls. *Landslides* doi:10.1007/s10346-016-0773-8 Full paper Editorial versión <http://rdcu.be/mncX>. Best Paper Award of Landslides 2017
- Ruiz-Carulla R, Corominas J, Mavrouli O (2015) A methodology to obtain the block size distribution of fragmental rockfall deposits. *Landslides* 12(4):815–825. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0600-7>
- Sanchidrián JA, Ouchterlony F, Segarra P, Moser P (2014) Size distribution functions for rock fragments. *Int J Rock Mech Min Sci* 71:381–394
- Wang Y, Tonon F (2010) Discrete element modelling of rock fragmentation upon impact in rock fall analysis. *Rock Mech Rock Eng* 44:23–35
- Zhao T, Crosta GB, Utili S, De Blasio FV (2017) Investigation of rock fragmentation during rockfalls and rock avalanches via 3-D discrete element analyses. *J Geophys Res Earth Surf* 122:678–695.