

EFECTO DE LOS INCENDIOS FORESTALES EN LA OCURRENCIA DE DESPRENDIMIENTOS ROCOSOS

ROBERTO SARRO (1), IGNACIO PÉREZ-REY (2), ROBERTO TOMÁS (3), LEANDRO R. ALEJANO (4), LUIS ENRIQUE HERNÁNDEZ-GUTIÉRREZ (5) y ROSA MARÍA MATEOS (1)

(1) Grupo de Investigación de Observación de la Tierra, Riesgos geológicos y Cambio Climático
Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC)
r.sarro@igme.es; rm.mateos@igme.es

(2) Laboratorio de Geotecnia
Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
ignacio.perez@cedex.es

(3) Departamento de Ingeniería Civil
Universidad de Alicante
roberto.tomas@ua.es

(4) Departamento de Recursos Naturales e Ingeniería Ambiental
Universidad de Vigo
alejano@uvigo.es

(5) Instituto Volcanológico de Canarias (INVOLCAN)
geologoluis@gmail.com

RESUMEN

Comprender las condiciones que producen los desprendimientos de rocas durante y después de un incendio forestal, es un gran reto al que se expone la comunidad científica, con el fin de precisar el riesgo por este tipo de eventos. El aumento de desprendimientos de rocas asociados con los incendios forestales está relacionado con varios factores, que afectan tanto al macizo rocoso donde se ubican las áreas fuente, como al área de propagación y a la zona de alcance. En cuanto a las áreas fuente, el efecto de los incendios forestales se focaliza, principalmente, en la alteración del macizo rocoso y sus propiedades: meteorización térmica, apertura de grietas, o la disminución de la resistencia de la roca. En el área de propagación se produce la pérdida de vegetación y un cambio en las condiciones del material del talud. Además, las propias actividades de extinción pueden desestabilizar bloques, y las temperaturas extremas que se alcanzan deterioran las medidas de protección instaladas.

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son muy frecuentes en climas semiáridos y áridos, especialmente en los meses de verano cuando se concentran varios factores: altas temperaturas, fuertes vientos y escasas precipitaciones. Durante los incendios, las temperaturas pueden alcanzar cerca de los 400 grados centígrados, provocando importantes efectos físicos y químicos tanto en el suelo como en el macizo rocoso (Wotton et al., 2012). Según el Informe Anual de Incendios Forestales en Europa, Oriente Medio y Norte de África de 2019 (San Miguel et al., 2020), España, Portugal y Polonia son los países europeos con más incendios forestales. En las últimas cinco décadas, España ha registrado cerca de

600.000 incendios forestales que afectaron a unos 7,5 Mha. Durante los últimos años se ha producido una disminución tanto en el número de incendios como en la extensión de la superficie quemada. Sin embargo, la ocurrencia de grandes incendios forestales (aquellos cuya área afectada es superior a 500 ha) sigue siendo alta. Las características de los incendios forestales están cambiando peligrosamente, debido principalmente a alteraciones de las condiciones climáticas asociadas al calentamiento global, influyendo en la frecuencia, la gravedad y el alcance de los incendios forestales.

Además de los efectos ambientales propios de los incendios forestales, durante estos eventos también se produce un efecto en cascada de otros procesos como los movimientos del terreno, aumentando principalmente la frecuencia de flujos de derrubios (Cannon et al., 2010; Santi et al., 2013; Staley et al., 2018) y los desprendimientos de rocas (De Graff & Gallegos, 2012). Estos procesos post-incendio aumentan el riesgo para las infraestructuras y las personas dentro del área quemada. Diferentes estudios desarrollados durante la última década han analizado la ocurrencia de flujos de derrubios en zonas que habían sufrido incendios (Carabella et al., 2019; Cui et al., 2019; Nyman et al., 2011; Parise & Cannon, 2012). Después de un incendio forestal, se produce una alteración de las condiciones hidrológicas y del suelo al cambiar las tasas de evapotranspiración e infiltración, lo que aumenta la probabilidad de que se produzca un flujo de derrubios (Rengers et al., 2020). Este tipo de movimientos de laderas suelen ser muy peligrosos dada su extraordinaria rapidez y poder destructivo, siendo capaces de causar daños significativos y numerosas muertes con un solo evento (Dowling & Santi, 2014).

En el caso de los desprendimientos de rocas, se ha observado que existen muy pocos estudios que se centren en los efectos de los incendios forestales en la ocurrencia de este tipo de movimientos. Los desprendimientos de rocas también son fenómenos muy peligrosos debido a las altas velocidades y elevadas energías que los bloques alcanzan durante su caída. Esto explica a menudo la dificultad de tomar acciones preventivas lo suficientemente rápidas y efectivas, así como de diseñar medidas adecuadas de protección y mitigación (Jaccard et al., 2020; Sarro et al., 2014). Comprender las condiciones que conducen a los desprendimientos de rocas durante y después de un incendio forestal en diferentes contextos geológicos es crucial, dada la frecuencia de estos procesos en zonas montañosas, acantilados costeros y taludes (Sarro et al., 2018, 2020).

Hay algunos estudios en la bibliografía científica que informan del aumento de la caída de rocas durante y después de los incendios forestales (Gehring & Maringer, 2020; Melzner et al., 2019; Sarro et al., 2021). Esto ocurre por la confluencia de la fragmentación de las rocas por altas temperaturas, cambios en las condiciones mecánicas de las rocas y pérdida de la capacidad natural protectora que ofrece la vegetación. Así, en los suelos granulares se producen variaciones químico-mineralógicas: deshidratación, dihidroxilación u oxidación; mientras que en las rocas se presentan efectos mecánicos por dilatación térmica (Gomez-Heras et al., 2009). A esto se une, las consecuencias que tienen los incendios sobre la propia ladera, acelerando la erosión y modificando la topografía original (Rammer et al., 2015; Stoffel et al., 2006), lo que puede cambiar significativamente las trayectorias de los bloques durante su caída (Vick et al., 2019).

En este trabajo se revisan los efectos que producen los incendios forestales en la ocurrencia de desprendimientos de rocas. Para ello se ha seguido el esquema que se muestra en la Figura 1. Así, se han diferenciado tres zonas: el área desprendida o fuente donde se originan los desprendimientos de rocas, el área de propagación, que es la zona donde los bloques se mueven ladera abajo, y la zona de afectación potencial o de alcance, donde se detiene la mayoría de los bloques y sus fragmentos.

En cuanto al área fuente, los efectos post incendio que sufren los macizos rocosos que están directamente relacionados con los procesos que inician los desprendimientos, destacan la degradación térmica de la roca, o la generación de nuevas grietas y esfuerzos. La zona de propagación también se modifica, debido a la pérdida de vegetación que se produce por el fuego. La vegetación es extremadamente importante de cara a minimizar los efectos de los desprendimientos, reduciendo la velocidad y las alturas de rebote de las rocas durante su caída. En consecuencia, cuando se llevan a cabo simulaciones numéricas para conocer el riesgo por desprendimientos y evaluar las trayectorias seguidas por los bloques, es necesario considerar la perdida de esta vegetación y, principalmente, como varían el valor de los coeficientes de restitución y fricción. Por último, otro aspecto a tener en cuenta durante estos fenómenos, es como aumenta el impacto social y económico producido por desprendimientos de rocas asociados a incendios forestales.

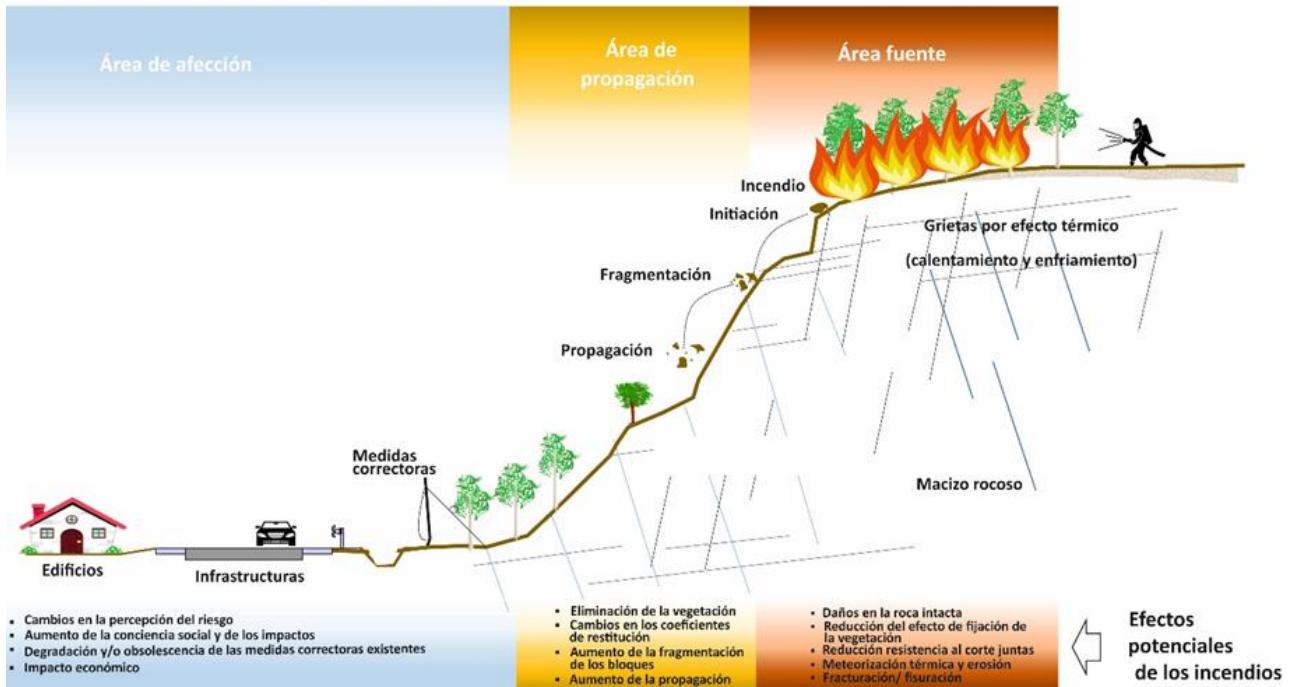


Figura 1. Diagrama que muestra los principales efectos de los incendios forestales en la ocurrencia de desprendimientos rocosos, desglosando las áreas principales donde se producen esos efectos (modificado de Sarro et al., 2021).

2. EFECTOS DE LOS INCENDIOS SOBRE EL MACIZO ROCOSO: LAS AREAS FUENTE

Las altas temperaturas alcanzadas durante los incendios forestales pueden afectar de manera relevante a la matriz rocosa. La expansión térmica de los minerales constituyentes origina un aumento de las superficies de contacto entre ellos provocando cambios estructurales que afectan la resistencia de la roca (David et al., 1999; Hajpál & Török, 2004). Además, procesos como la deshidratación o la descarbonización pueden dar lugar a cambios relevantes en las propiedades mecánicas de las rocas (Sygała et al., 2013; Zhao, 2016). Los cambios químicos también provocan transformaciones polimórficas, fusión e incluso la desaparición de ciertos minerales (Gómez-Heras et al., 2009; Vázquez et al., 2015). Estos procesos están detrás del desarrollo de nuevas microfisuras y de la coalescencia y agrandamiento de las existentes que son responsables de importantes cambios en las propiedades físicas y mecánicas de las rocas después de un incendio. Por ejemplo, la pérdida de resistencia, especialmente en compresión, ha sido estudiada para granitos y areniscas, observándose disminuciones de hasta el 80% de su resistencia a la compresión simple cuando se alcanzan temperaturas de entre 800 a 1000 °C.

El efecto que produce la temperatura sobre las rocas ha sido ampliamente estudiado en ensayos de laboratorio (Biró et al., 2019; Liu & Xu, 2014; Yin et al., 2016). Estos estudios han evaluado los cambios en las propiedades químicas, físicas y mecánicas de las rocas cuando se las somete a un calentamiento controlado. La mayoría de estos estudios utilizan muestras regulares de roca intacta calentada en un horno siguiendo curvas de calentamiento estándar. Estas curvas de calentamiento suelen presentar tres etapas principales: una curva de calentamiento inicial, entre 1 a 15 °C/min, que comienza a temperatura ambiente y alcanza valores típicos de 200 a 1000 °C (esta parte de la curva representaría el inicio del incendio); una segunda etapa con temperatura constante durante un intervalo de tiempo que varía de 1 a 24 h (esta parte de la curva representa la duración del incendio); y una última etapa, el proceso de enfriamiento, reproducido de diferentes maneras: a veces enfriando las muestras dentro del horno a temperatura ambiente para simular el enfriamiento lento y natural de la roca, y otras realizándose de manera más rápida, sumergiendo las muestras en agua o incluso aplicando nitrógeno líquido para provocar un choque térmico que

reproduzca las operaciones de extinción.

El efecto del método de enfriamiento también es un factor de importancia en los macizos rocosos afectados por incendios forestales. Existen estudios previos en los que se señala que la reducción de los parámetros elásticos y de resistencia de las rocas es más relevante en muestras enfriadas con agua (enfriamiento rápido) que en muestras enfriadas al aire (enfriadas lentamente), ya que la densidad de grietas aumenta debido al choque térmico repentino (Kumari et al., 2017; Zhang et al., 2016).

Por otra parte, el efecto de la temperatura sobre la resistencia al corte ha sido escasamente estudiado. Algunos estudios se han focalizado en analizar la resistencia al corte de discontinuidades de roca que fueron sometidas a tratamientos térmicos a diferentes temperaturas (hasta 800 °C) mediante ensayos de corte directo (Khamrat et al., 2018; Kim & Jeon, 2019). Los resultados obtenidos muestran una disminución gradual de la resistencia máxima al corte a medida que aumenta la temperatura en condiciones normales de carga. Sin embargo, este efecto térmico se reducía gradualmente a medida que aumentaba la tensión normal. También se ha estudiado la variación del ángulo de fricción básico de granitos con el tratamiento térmico y distintos métodos de enfriamiento (Tang et al., 2022) observando un aumento del ángulo de fricción con la temperatura por la alteración de la superficie de contacto de las probetas empleadas para realizar los ensayos de tilt test.

Los incendios forestales afectan principalmente a los macizos rocosos expandiendo las partes externas provocando tensiones internas que superan la resistencia a la tracción de las fracturas existentes en las rocas. La presencia de matriz en las rocas detríticas provoca un efecto amortiguador de las dilataciones de los cristales minerales. Sin embargo, en macizos rocosos, la ausencia de matriz y el mayor empaquetamiento de los cristales aumentan los esfuerzos entre ellos a medida que se dilatan y se produce el efecto de agrietamiento. Considerando macizos rocosos con porosidad y formación mineral similar, se ha concluido que aquellos con una composición carbonatada son menos sensibles a la acción del fuego que los de composición silícea.

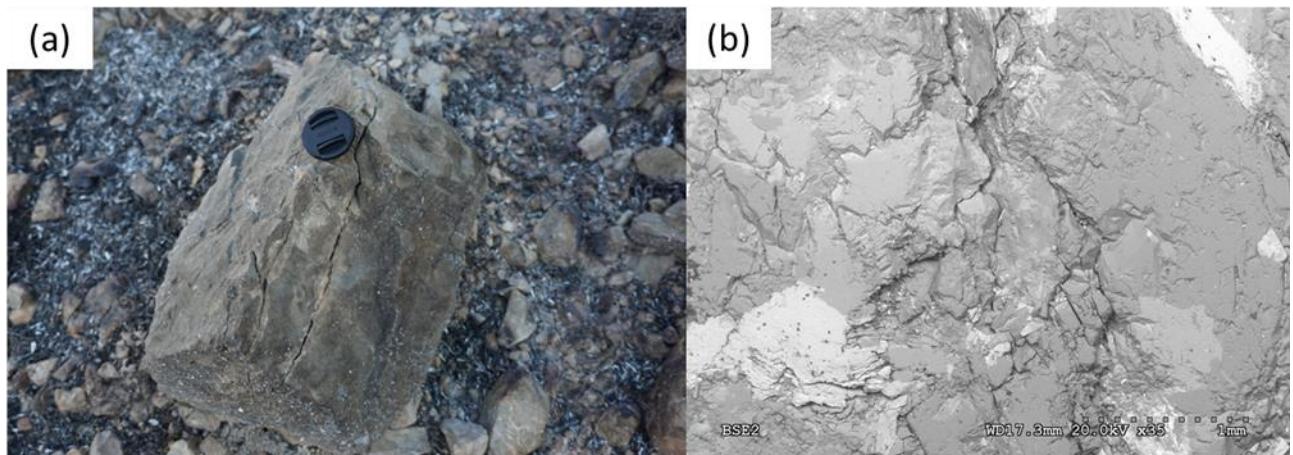


Figura 2. a) Fracturas en una roca caliza afectado por un incendio forestal en la sierra de Foncalent (Alicante, SE de España) con baja carga térmica. b) Imagen de microfisuras obtenida por microscopio electrónico de barrido en una probeta de granito procedente de las proximidades de Vila Real (N de Portugal), calentada en laboratorio hasta 600°C y enfriada por inmersión en agua en el Laboratorio de Mecánica de Rocas de la Universidad de Alicante.

3. CAMBIOS EN LA PENDIENTE: ZONA DE PROPAGACIÓN

Una de las consecuencias más visibles de los incendios forestales en relación al área de propagación es la eliminación de la cobertura vegetal, sin embargo, no es la única. Debido a las acciones de los incendios se llegan a producir variaciones en las propiedades del suelo y las rocas, que llega a modificar factores relevantes y/o parámetros de entrada que posteriormente tienen un papel relevante al aplicar modelos numéricos con los que evaluar la estabilidad de taludes.

3.1 Perdida de vegetación

La vegetación (en términos generales, árboles y arbustos) actúa como una barrera natural de protección frente a los desprendimientos de rocas. La vegetación no solo disminuye la intensidad de los desprendimientos de rocas, reduciendo la energía y la velocidad de las rocas que caen, sino que también reduce la frecuencia de los daños que pueden producirse debido a este tipo de eventos (Dupire et al., 2016; Moos et al., 2017). En el papel que juega la vegetación frente a los desprendimientos, intervienen el conjunto de partes de la misma, desde la barrera natural que conforman las copas y los troncos, hasta el papel extremadamente importante que tienen las raíces en la capacidad de retención del suelo.

Como resultado, el peligro de producirse desprendimientos de rocas en una ladera vegetada debe analizarse centrándose tanto en las características de la vegetación existente como en la dinámica de los desprendimientos de rocas. Cuando se producen los incendios forestales, se pierde la defensa natural que aporta la vegetación. Así, los incendios suelen causar daños importantes en los árboles, y queman por completo vegetación baja como los arbustos. Cuando las que se queman son las raíces que progresan entre las discontinuidades de las rocas, lo que se produce es una aceleración de los procesos de meteorización física.

Los efectos que un incendio forestal puede tener sobre la vegetación dependen principalmente de la intensidad y duración que haya tenido el fuego. Así, la recuperación total del medio después de un incendio, y en consecuencia de esa barrera natural frente a los desprendimientos, puede llevar desde unos pocos años hasta varias décadas, dependiendo de las condiciones climáticas.

3.2. Aumento de la ocurrencia de desprendimientos

Las características geomecánicas de un macizo se determinan, entre otras, por el número del conjunto de discontinuidades que se distribuyen por el macizo rocoso, así como la naturaleza de su relleno y la presencia o ausencia de agua (Lopez-Saez et al., 2016). Durante un incendio forestal, estas características se alteran drásticamente. Como hemos comentado anteriormente, se produce una degradación en las propiedades de la matriz rocosa que reduce la resistencia de la roca y aumenta la fracturación del material tanto con la desagregación del macizo rocoso inicial como con la rotura de los bloques durante su caída (es decir, aumenta la fragmentación). Como se ha expuesto, el aumento de desprendimientos de rocas después de un incendio forestal no solo está asociado con los efectos sobre el macizo rocoso sino también con la pérdida de vegetación. Dorren et al. (2006) expusieron que la energía alcanzada por los bloques caídos se veía reducida por la vegetación debido principalmente a: su rotación y traslación sobre las raíces (terreno más rugoso y con mayor fricción), su deformación al golpear en el tronco del árbol, y por la penetración de la roca durante el impacto. Por supuesto, con respecto a estas consideraciones, hay que tener en cuenta que existe una relación entre el tipo de bosque y su capacidad de retención (tanto en con respecto al número de bloques como a su volumen). Algunos estudios (Dorren et al., 2004; Jancke et al., 2013) sugieren que en zonas boscosas, se produce una reducción del 26% en la velocidad de las rocas caídas y la altura máxima de rebote disminuye en un 75%.

3.3. Influencia en los parámetros de modelización

La simulación numérica puede ayudar a determinar las trayectorias que siguen los desprendimientos de rocas, estimando el comportamiento cinemático que pueden seguir los bloques desprendidos. Los parámetros de entrada más importantes al realizar simulaciones numéricas de desprendimientos de rocas son los coeficientes de restitución y los coeficientes de fricción dinámica. El primero depende básicamente del ángulo de impacto y de las propiedades del suelo/roca, y el segundo determina la fuerza en sentido contrario al deslizamiento del bloque. El valor del coeficiente de fricción depende no solo de la forma de la roca sino también de las características de la superficie de la ladera. Ambos coeficientes cuantifican el control de la cantidad de energía perdida durante el impacto de un bloque sobre la superficie del talud. La estimación de los coeficientes de restitución y fricción es una tarea compleja que aún no se encuentra estandarizada. Esto se debe a la dificultad de calibrar y validar los parámetros del suelo en los diferentes modelos. Esta dificultad se agrava, si la simulación se realiza en una zona quemada, en la que el efecto del fuego es un factor a tener en cuenta en la calibración de estos

parámetros.

La severidad del impacto de los incendios forestales sobre la ladera depende de la duración, intensidad y frecuencia de los incendios. En el caso de incendios de baja intensidad, en los que las temperaturas alcanzadas no son muy elevadas, la afección a la vegetación es baja y sólo se ve dañada la capa más externa del suelo. Sin embargo, durante los incendios de alta intensidad, en los que las temperaturas alcanzadas son más elevadas, se produce un importante deterioro e eliminación de la cobertura vegetal que puede dar lugar a importantes alteraciones en las propiedades del suelo.

A pesar de la variación de los parámetros de entrada, la literatura sobre modelización de desprendimientos contempla pocos estudios que tengan en cuenta cómo varían los coeficientes de restitución y el coeficiente de fricción dinámica después de los incendios forestales. Uno de los pocos estudios, lo llevó a cabo (Sabatakakis et al., 2015), y en él se calcularon los valores de los coeficientes de restitución en cinco desprendimientos en el oeste de Grecia teniendo en cuenta zonas quemadas. Los resultados obtenidos mostraron que los valores de los coeficientes se reducían entre un 15% o 25% después del incendio. En España, un ejemplo lo tenemos en el estudio realizado por (Pérez-Rey et al., 2019) en Chandebrito (Pontevedra, España), en el que también se tuvo en cuenta la superficie quemada a la hora de calibrar los parámetros de restitución utilizados en la simulación de desprendimientos (Figura 3).

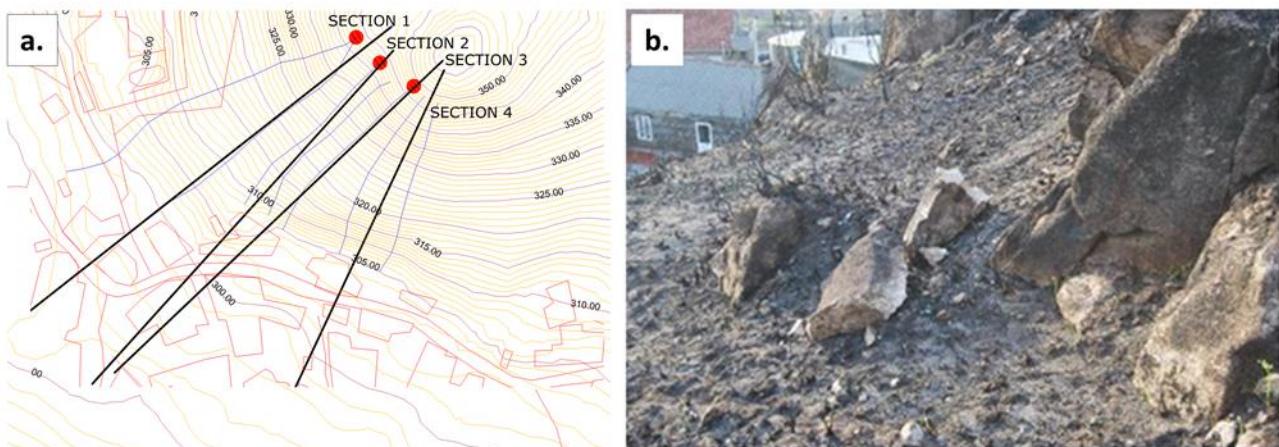


Figura 3. a) Algunas de las secciones tomadas para la realización de las simulaciones de caída de bloques en 2 dimensiones; b) Efecto del incendio en el macizo rocoso, en la fotografía pueden verse fragmentos de roca desprendidos debido a las altas temperaturas (modificado de Pérez Rey et al., 2019).

4. AFECCIÓN POTENCIAL DURANTE Y DESPUÉS DEL INCENDIO FORESTAL

4.1. Extinción de incendios y desprendimientos rocosos

Como bien es sabido, la extinción de incendios forestales es una actividad compleja, que conlleva que los bomberos y retenes contra incendios, tengan que exponerse a un alto riesgo. A pesar de que se realizan muchos estudios sobre la exposición de los bomberos a gases o altas temperaturas durante la extinción de un incendio, poco se sabe sobre la exposición de los bomberos a los desprendimientos de rocas. El principal dato estadístico para evaluar el efecto de los desprendimientos de rocas en las actividades de extinción de incendios es el número de víctimas mortales. En los EE.UU., los datos proporcionados por la Administración de Incendios de los EE.UU. (USFA) muestran una tendencia general al alza en el número de fatalidades. En el período comprendido entre el 01/01/2000 y el 01/10/2019, hubo 99 heridos mortales en incendios forestales. Entre las causas de estos decesos, situada en cuarto lugar (16,2%), se encuentra las relacionadas con golpes contundentes por rocas. Y casi el 70% de estas muertes ocurrieron durante la extinción del incendio forestal (U.S. Fire Administration, 2020).

En España, falta información sobre este tipo de estadística; la información oficial registra únicamente 3 muertes causadas por impactos de rocas durante los últimos 10 años. Sin embargo, según información directa recopilada de entrevistas y cuestionarios realizados a bomberos españoles, sí que existe confirmación de que algunas actuaciones desarrolladas durante la

extinción del fuego desencadenan desprendimientos de rocas. Las principales causas son: a) la desestabilización bloques al extender las mangueras; b) el movimiento del equipo de extinción de incendios (p. ej., camiones de bomberos) y el personal cerca de los bordes de taludes; c) el impacto del agua proyectada en taludes y acantilados por mangueras o medios aéreos.

4.2 Impacto en infraestructuras

La vulnerabilidad a los desprendimientos de rocas se puede evaluar para diferentes elementos en riesgo: población, edificios, infraestructuras, áreas ambientales o patrimonio cultural. Para ello es necesario conocer las características de estos procesos, los factores desencadenantes y la distribución espacial y temporal de los desprendimientos. En muchos casos se utilizan elementos de protección para hacer frente al riesgo de desprendimiento de rocas, como bulones, mallas de cables, hormigón proyectado o barreras dinámicas de protección (que suelen incluir sistemas de cables, anclajes y disipadores de energía).

Sin embargo, cuando se produce un incendio, estas medidas de protección pueden verse afectadas y/o dañadas por las altas temperaturas alcanzadas. Uno de los principales efectos de los incendios forestales sobre las barreras de protección es la afectación de los cables y disipadores de energía, cambiando sus propiedades de fricción/apriete con los anclajes. En esos casos, es necesario reemplazar cables, disipadores de energía y redes. Las altas temperaturas también pueden afectar a los otros elementos como las redes y pernos, haciendo que pierdan su capacidad de sujeción, y en consecuencia su capacidad como medida de protección.

4.3. Impactos económicos y sociales

Los desprendimientos de rocas son unos de los peligros naturales que mayores daños personales y materiales causan. Los impactos económicos de los desprendimientos de rocas se pueden clasificar en dos categorías: (a) impactos económicos directos que conllevan trabajos de protección, mitigación, etc. y (b) impactos económicos indirectos, como los daños que estos pueden producir sobre viviendas, personas, o el propio medio (Vessely et al., 2017). El impacto social generalmente solo se aborda mediante estadísticas sobre pérdidas económicas relacionadas con casas dañadas o pérdida de infraestructura, o inversión en medidas de protección contra ellas. No hay referencias a medidas de impacto social que no estén asociadas a una cuantificación de pérdidas económicas, dejando de lado otra forma de valoración como es la evaluación de la percepción del riesgo. La percepción de riesgo es uno de los principales factores que condicionan el comportamiento de las personas y por lo tanto tiene un impacto decisivo en la capacidad de mitigación, protección y recuperación de la comunidad. Esta percepción se encuentra influenciada por las formas en que se analiza, evalúa y gestiona el riesgo. Por ello, una comunicación fluida y ofrecer una información adecuada a los ciudadanos es fundamental.

Los incendios forestales provocan por sí mismos un impacto social, aumentando la sensación de vulnerabilidad. Cuando los incendios se producen en zonas abruptas o montañosas con bosques que cubren macizos rocosos propensos a sufrir desprendimientos, esta percepción se amplifica una vez extinguido el fuego. La amplificación del riesgo se refleja no solo en los efectos adversos producidos por los incendios forestales, sino también en la evidencia de encontrarse expuestos a otros riesgos. Un ejemplo de estos problemas en España, se pudo comprobar en el incendio forestal ocurrido en la zona de Chandebrito (Pontevedra, España) tras la ocurrencia de un incendio forestal. Motivado por una solicitud general de los habitantes de la zona, quienes trasladaron a las autoridades sus preocupaciones sobre la posible ocurrencia de desprendimientos de rocas, se realizó un estudio de riesgo a desprendimientos, lo que condujo a la instalación de varias medidas de protección.

5. CONCLUSIONES

Los desprendimientos de rocas pueden desencadenarse por una gran variedad de procesos naturales, como la lluvia, el estrés térmico cíclico, la actividad sísmica, etc. Sin embargo, existe escasa bibliografía sobre la influencia que tienen los incendios forestales en la ocurrencia de desprendimientos de rocas. El cambio climático y la expansión del desarrollo humano están

fomentando el efecto adverso de los incendios forestales sobre las personas y sus bienes, desencadenando diferentes efectos en cascada, incluidos desprendimientos de rocas. Por ello, es necesario desarrollar nuevas herramientas y métodos para identificar y cuantificar los peligros potenciales que plantean los desprendimientos de rocas en áreas quemadas teniendo en cuenta los escenarios de cambio climático.

Los incendios pueden inducir cambios físicos y químicos en los macizos rocosos, aumentando la fragmentación de la roca y disminuyendo la resistencia de la roca y las discontinuidades.

La trayectoria de caída de rocas (run-out) también se modifica cuando se pierde la vegetación. Los bosques son extremadamente importantes como medida de protección frente a los desprendimientos de rocas, ya que los árboles reducen la velocidad y la altura de rebote de las rocas que caen. En la modelización de caída de rocas, la pérdida de vegetación tiende a repercutir en los parámetros utilizados, en particular los coeficientes de restitución. La comparación de simulaciones previas y posteriores al incendio sería una herramienta eficaz para evaluar como varía el riesgo en taludes rocosos afectados por el fuego.

Se debe prestar especial atención a como son las características del incendio forestal (intensidad, duración, etc.) con el objetivo de buscar correlaciones con la intensificación de la actividad de la caída de rocas. Comparar las cartografías de la intensidad y la severidad del fuego con el inventario de caída de rocas (antes y después del incendio forestal) ayudaría a comprender su correlación.

Por otra parte, hay que considerar que las medidas de estabilización y protección pueden verse muy deterioradas por las altas temperaturas y pueden perder su funcionalidad. Por lo que sería recomendable una evaluación post-incendio de estos elementos.

Tampoco hay que olvidar, el aumento que puede producirse en la conciencia social después de un incendio forestal, al evidenciar otro tipo de peligros como los desprendimientos de rocas.

Por último, las acciones de extinción de incendios pueden aumentar la actividad de caída de rocas. Los bomberos y las autoridades de emergencia deben desarrollar estrategias para reducir el riesgo de caída de rocas durante los incendios forestales en colaboración con la comunidad científica.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer a las empresas Paramassi y V-Traverca por ceder el uso de sus imágenes de desprendimientos de rocas provocados por incendios forestales y de barreras dinámicas afectadas por el fuego. Se agradece extensivamente al Consorcio Provincial de Bomberos de Alicante (España) por su apoyo y valiosa información.

REFERENCIAS

- Biró, A., Hlavička, V., & Lublóy, É. (2019). Effect of fire-related temperatures on natural stones. *Construction and Building Materials*, 212, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.333>
- Cannon, S. H., Gartner, J. E., Rupert, M. G., Michael, J. A., Rea, A. H., & Parrett, C. (2010). Predicting the probability and volume of postwildfire debris flows in the intermountain western United States. *GSA Bulletin*, 122(1–2), 127–144. <https://doi.org/10.1130/B26459.1>
- Carabella, Miccadei, Paglia, & Sciarra. (2019). Post-Wildfire Landslide Hazard Assessment: The Case of The 2017 Montagna Del Morrone Fire (Central Apennines, Italy). *Geosciences*, 9(4), 175. <https://doi.org/10.3390/geosciences9040175>
- Cui, Y., Cheng, D., & Chan, D. (2019). Investigation of Post-Fire Debris Flows in Montecito. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.3390/ijgi8010005>
- David, C., Menéndez, B., & Darot, M. (1999). Influence of stress-induced and thermal cracking on physical properties and microstructure of La Peyratte granite. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, 4(36), 433–448.
- De Graff, J. V., & Gallegos, A. J. (2012). The Challenge of Improving Identification of Rockfall Hazard after Wildfires. *Environmental & Engineering Geoscience*, 18(4), 389–397. <https://doi.org/10.2113/gsegeosci.18.4.389>
- Dorren, L. K. A., Berger, F., & Putters, U. S. (2006). Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), 145–153. <https://doi.org/10.5194/nhess-6-145-2006>
- Dorren, L. K. A., Maier, B., Putters, U. S., & Seijmonsbergen, A. C. (2004). Combining field and modelling

- techniques to assess rockfall dynamics on a protection forest hillslope in the European Alps. *Geomorphology*, 57(3–4), 151–167. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(03\)00100-4](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(03)00100-4)
- Dowling, C. A., & Santi, P. M. (2014). Debris flows and their toll on human life: A global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 201. *Nat Hazards*, 203–227. <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0907-4>
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J.-M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., & Curt, T. (2016). The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity. *Forest Ecology and Management*, 382, 269–279. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.020>
- Gehring, E., & Maringer, J. (2020). Disturbance calls for disaster: Why forest fires increase landslides and rockfall hazards. *Research Outreach*, 112, 122–125. <https://doi.org/10.32907/RO-112-122125>
- Gomez-Heras, M., McCabe, S., Smith, B. J., & Fort, R. (2009). Impacts of Fire on Stone-Built Heritage. *Journal of Architectural Conservation*, 15(2), 47–58. <https://doi.org/10.1080/13556207.2009.10785047>
- Hajpál, M., & Török, Á. (2004). Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat. *Environmental Geology*, 46(3), 311–322. <https://doi.org/10.1007/s00254-004-1034-z>
- Jaccard, C.-J., Abbruzzese, J. M., & Howald, E. P. (2020). An evaluation of the performance of rock fall protection measures and their role in hazard zoning. *Natural Hazards*, 104(1), 459–491. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04177-4>
- Jancke, O., Berger, F., & Dorren, L. K. A. (2013). Mechanical resistance of coppice stems derived from full-scale impact tests. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(9), 994–1003. <https://doi.org/10.1002/esp.3381>
- Khamrat, S., Thongrapha, T., & Fuenkajorn, K. (2018). Thermal effects on shearing resistance of fractures in Tak granite. *Journal of Structural Geology*, 111, 64–74. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2018.03.011>
- Kim, T., & Jeon, S. (2019). Experimental Study on Shear Behavior of a Rock Discontinuity Under Various Thermal, Hydraulic and Mechanical Conditions. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52(7), 2207–2226. <https://doi.org/10.1007/s00603-018-1723-7>
- Kumari, W. G. P., Ranjith, P. G., Perera, M. S. A., Chen, B. K., & Abdulagatov, I. M. (2017). Temperature-dependent mechanical behaviour of Australian Strathbogie granite with different cooling treatments. *Engineering Geology*, 229, 31–44. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.09.012>
- Liu, S., & Xu, J. (2014). Mechanical properties of Qinling biotite granite after high temperature treatment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 71, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2014.07.008>
- Lopez-Saez, J., Corona, C., Eckert, N., Stoffel, M., Bourrier, F., & Berger, F. (2016). Impacts of land-use and land-cover changes on rockfall propagation: Insights from the Grenoble conurbation. *Science of The Total Environment*, 547, 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.12.148>
- Melzner, S., Shtober-Zisu, N., Katz, O., & Wittenberg, L. (2019). Brief communication: Post-wildfire rockfall risk in the eastern Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(12), 2879–2885. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-2879-2019>
- Moos, C., Dorren, L., & Stoffel, M. (2017). Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(2), 291–304. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-291-2017>
- Nyman, P., Sheridan, G. J., Smith, H. G., & Lane, P. N. J. (2011). Evidence of debris flow occurrence after wildfire in upland catchments of south-east Australia. *Geomorphology*, 125(3), 383–401. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.10.016>
- Parise, M., & Cannon, S. H. (2012). Wildfire impacts on the processes that generate debris flows in burned watersheds. *Natural Hazards*, 61(1), 217–227. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9769-9>
- Pérez-Rey, I., Riquelme, A., González-deSantos, L. M., Estévez-Ventosa, X., Tomás, R., & Alejano, L. R. (2019). A multi-approach rockfall hazard assessment on a weathered granite natural rock slope. *Landslides*, 16(10), 2005–2015. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01208-5>
- Rammer, W., Brauner, M., Ruprecht, H., & Lexer, M. J. (2015). Evaluating the effects of forest management on rockfall protection and timber production at slope scale. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 30(8), 719–731. <https://doi.org/10.1080/02827581.2015.1046911>
- Rengers, F. K., McGuire, L. A., Oakley, N. S., Kean, J. W., Staley, D. M., & Tang, H. (2020). Landslides after wildfire: Initiation, magnitude, and mobility. *Landslides*. <https://doi.org/10.1007/s10346-020-01506-3>
- Sabatakis, N., Depoutis, N., & Vagenas, N. (2015). Evaluation of Rockfall Restitution Coefficients. In G. Lollino, D. Giordan, G. B. Crosta, J. Corominas, R. Azzam, J. Wasowski, & N. Sciarra (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory—Volume 2* (pp. 2023–2026). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09057-3_359
- San Miguel, J., Durrant, T., Boca, R., Maianti, P., Liberta` G., Artes, T., Jacome, D., Branco, A., De Rigo, D.,

- Ferrari, D., Pfeiffer, H., Grecchi, R., Nuijten, D., & Leray, T. (2020). *Forest fires in Europe, Middle East and North Africa 2019*. Publications Office of the European Union. <http://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fdbbf4ee-1a63-11eb-b57e-01aa75ed71a1/language-en>
- Santi, P., Cannon, S., & DeGraff, J. (2013). 13.16 Wildfire and Landscape Change. In J. F. Shroder (Ed.), *Treatise on Geomorphology* (pp. 262–287). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374739-6.00365-1>
- Sarro, R., Mateos, R. M., García-Moreno, I., Herrera, G., Reichenbach, P., Laín, L., & Paredes, C. (2014). The Son Poc rockfall (Mallorca, Spain) on the 6th of March 2013: 3D simulation. *Landslides*, 11(3), 493–503. <https://doi.org/10.1007/s10346-014-0487-8>
- Sarro, R., Mateos, R. M., Reichenbach, P., Aguilera, H., Riquelme, A., Hernández-Gutiérrez, L. E., Martín, A., Barra, A., Solari, L., Monserrat, O., Alvioli, M., Fernández-Merodo, J. A., López-Vinielles, J., & Herrera, G. (2020). Geotechnics for rockfall assessment in the volcanic island of Gran Canaria (Canary Islands, Spain). *Journal of Maps*, 16(2), 605–613. <https://doi.org/10.1080/17445647.2020.1806125>
- Sarro, R., Pérez-Rey, I., Tomás, R., Alejano, L. R., Hernández-Gutiérrez, L. E., & Mateos, R. M. (2021). Effects of Wildfire on Rockfall Occurrence: A Review through Actual Cases in Spain. *Applied Sciences*, 11(6), 2545. <https://doi.org/10.3390/app11062545>
- Sarro, R., Riquelme, A., García-Davalillo, J. C., Mateos, R. M., Tomás, R., Pastor, J. L., Cano, M., & Herrera, G. (2018). Rockfall simulation based on UAV photogrammetry data obtained during an emergency declaration: Application at a cultural heritage site. In *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs10121923>
- Staley, D. M., Tillery, A. C., Kean, J. W., McGuire, L. A., Pauling, H. E., Rengers, F. K., & Smith, J. B. (2018). Estimating post-fire debris-flow hazards prior to wildfire using a statistical analysis of historical distributions of fire severity from remote sensing data. *International Journal of Wildland Fire*, 27(9), 595. <https://doi.org/10.1071/WF17122>
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L. K. A., Perret, S., & Kienholz, H. (2006). Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *Forest Ecology and Management*, 225(1–3), 113–122. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.12.030>
- Sygała, A., Bukowska, M., & Janoszek, T. (2013). High Temperature Versus Geomechanical Parameters of Selected Rocks – The Present State of Research. *Journal of Sustainable Mining*, 12(4), 45–51. <https://doi.org/10.7424/jsm130407>
- Tang, Z. C., Peng, M. H., & Xiao, S. (2022). Basic friction angle of granite fracture after heating and rapid cooling treatments. *Engineering Geology*, 302, 106626. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106626>
- U.S. Fire Administration. (2020). *Firefighters fatalities report*. <https://apps.usfa.fema.gov/firefighter-fatalities/fatalityData/reportBuilder>
- Vázquez, P., Shushakova, V., & Gómez-Heras, M. (2015). Influence of mineralogy on granite decay induced by temperature increase: Experimental observations and stress simulation. *Engineering Geology*, 189, 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.01.026>
- Vessely, M., Richrath, S., & Weldemicael, E. (2017). Economic Impacts from Geologic Hazard Events on Colorado Department of Transportation Right-of-Way. *Transportation Research Record*, 2646(1), 8–16. <https://doi.org/10.3141/2646-02>
- Vick, L. M., Zimmer, V., White, C., Massey, C., & Davies, T. (2019). Significance of substrate soil moisture content for rockfall hazard assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(5), 1105–1117. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-1105-2019>
- Wotton, B. M., Gould, J. S., McCaw, W. L., Cheney, N. P., & Taylor, S. W. (2012). Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. *International Journal of Wildland Fire*, 21(3), 270. <https://doi.org/10.1071/WF10127>
- Yin, T., Shu, R., Li, X., Wang, P., & Liu, X. (2016). Comparison of mechanical properties in high temperature and thermal treatment granite. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26(7), 1926–1937. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(16\)64311-X](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(16)64311-X)
- Zhang, W., Sun, Q., Hao, S., & Wang, B. (2016). Experimental Study on the Thermal Damage Characteristics of Limestone and Underlying Mechanism. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(8), 2999–3008. <https://doi.org/10.1007/s00603-016-0983-3>
- Zhao, Z. (2016). Thermal Influence on Mechanical Properties of Granite: A Microcracking Perspective. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49, 747–762. <https://doi.org/10.1007/s00603-015-0767-1>