

# Aplicación del magnetismo de rocas al estudio del impacto de los incendios sobre las pizarras del Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (España)

*Magnetic analysis of slates from Courel Mountains UNESCO Global Geopark (Spain) for determining maximum temperatures of forest fires*

Sara Torres-López<sup>1\*</sup>, Miguel Gómez-Heras<sup>1</sup> y Daniel Ballesteros<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geología y Geoquímica, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, [sara.torres@uam.es](mailto:sara.torres@uam.es), [miguel.gomezheras@uam.es](mailto:miguel.gomezheras@uam.es)

<sup>2</sup> Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel, Rúa do Courel 21, 27320 Quiroga, Lugo.

<sup>3</sup> Departamento de Geodinámica, Universidad de Granada, Campus de Fuentenueva s/n 18071 Granada, [sballesteros@ugr.es](mailto:sballesteros@ugr.es)

\*Corresponding author

## ABSTRACT

Spain is the country in Europe most affected by forest fires and they are increasingly frequent. Therefore, it is important characterizing the effects on rocks of temperature increase, particularly in contexts in which geological heritage could be affected. This paper presents the study of rock magnetism as a potential technique to know the effects of temperature increase. This technique allows knowing mineralogy, mineralogical transformations associated with temperature and time, as well as the maximum temperatures reached during a fire.

**Key-words:** Courel Mountains, Rock Magnetism, fires, geological heritage, maximum temperatures

## RESUMEN

España es el país más afectado por incendios forestales de Europa y su frecuencia va aumentando. Por tanto, es importante caracterizar los efectos que el aumento de temperatura genera sobre las rocas, especialmente en contextos en los que el patrimonio geológico pueda verse afectado. Este trabajo presenta el estudio de magnetismo de rocas como una potencial técnica para conocer los efectos producidos por el aumento de temperatura. Esta técnica permite conocer la mineralogía, transformaciones mineralógicas asociadas a la temperatura y tiempo, así como la temperatura máxima alcanzada durante un incendio.

**Palabras clave:** Montañas do Courel, magnetismo de rocas, incendios, patrimonio geológico, temperaturas máximas

Geogaceta, 76 (2024), 83-86

<https://doi.org/10.55407/geogaceta100801>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 06/07/2023

Fecha de revisión: 19/04/2024

Fecha de aceptación: 07/06/2024

## Introducción

España es el país con mayor número de incendios forestales y superficie quemada de toda Europa según European Forest Fire Information System (<https://effis.jrc.ec.europa.eu/>), siendo Galicia una de las regiones más afectadas. La emergencia climática y los eventos hidrometeorológicos extremos, cada vez más frecuentes, hacen necesario prestar atención a los daños generados por los incendios en los materiales geológicos.

Un área de especial interés es el deterioro que los incendios pueden generar sobre los materiales asociados al patrimonio geológico, dado que el deterioro físico que sufren las rocas durante un incendio puede hacer peligrar la integridad de Lugares de Interés Geológico (LIG).

El Geoparque Mundial de la UNESCO de Montañas do Courel es una zona donde este problema es especialmente importante ya que una parte importante

de su territorio ha sufrido incendios en los últimos años, afectando a LIG como los Pliegues de Cuarcita Armoricana en las Traviesas.

En las últimas dos décadas, se han realizado numerosos estudios sobre los efectos del aumento de la temperatura sobre las propiedades mecánicas y los cambios mineralógicos que se producen en diferentes tipos de rocas debido al aumento de temperatura que se genera en un incendio, sobre todo en la literatura asociada al patrimonio cultural (p.ej. Gómez-Heras et al., 2009; Kompanikova et al., 2014; Ozguven y Ozcelik, 2014; Vazquez et al., 2022; Sánchez-Roda et al., 2023). Sin embargo, no existen muchos estudios que aborden esta problemática en el contexto del patrimonio geológico.

Aunque debido a la baja conductividad térmica de las rocas, los efectos más notables a corto plazo de un incendio se circunscriben a una capa externa no muy gruesa, las consecuencias de los cambios

mineralógicos y texturales pueden acelerar la meteorización a largo plazo (Gómez-Heras et al., 2009).

Aunque las cenizas e hidrocarburos generados durante un incendio son factores muy importantes a tener en cuenta para entender el comportamiento a largo plazo de las rocas (McCabe et al., 2010), gran parte de los cambios texturales y mineralógicos son proporcionales al aumento de la temperatura. Así, la determinación de las temperaturas máximas que podría haber alcanzado durante un incendio son un buen proxy para comprender el efecto que un incendio puede tener sobre los materiales geológicos.

Para la estimación de las temperaturas alcanzadas sobre rocas quemadas en incendios se han utilizado diversos métodos, como la acotación por rangos de cambios de fases minerales (p.ej., Vázquez et al., 2022), la termoluminiscencia (Sanjurjo-Sánchez et al., 2016) o la susceptibilidad magnética (Sánchez-Roda et al., 2022).

El objetivo de este trabajo es explorar nuevos métodos para inferir las temperaturas alcanzadas por los incendios en el contacto entre la cobertera vegetal y el sustrato rocoso con base en las propiedades magnéticas de las rocas.

### Contexto Geológico

El Geoparque Mundial de la UNESCO Montañas do Courel (2019) se corresponde con un área montañosa de 678 km<sup>2</sup> de extensión, situada al sur de la Provincia de Lugo (NO de España; Fig. 1a). El sustrato geológico está dominado por pizarras y cuarcitas paleozoicas afectadas por pliegues y fallas variscas (Fig. 1b), así como fallas alpinas responsables del levantamiento del relieve actual y la fuerte incisión fluvial (ver Ballesteros et al., 2022).

Todos los años, las Montañas do Courel y su patrimonio geológico son víctimas de los incendios forestales. Tan solo durante el siglo XXI, el fuego ha arrasado el 33% del territorio (Fig. 1C), las áreas de matorral y pinares ocupan el 54 y 14% del Geoparque, respectivamente, frente a los bosques caducifolios (14%) y los cultivos, praderas y zonas urbanas (6%) (Ballesteros et al., 2022).

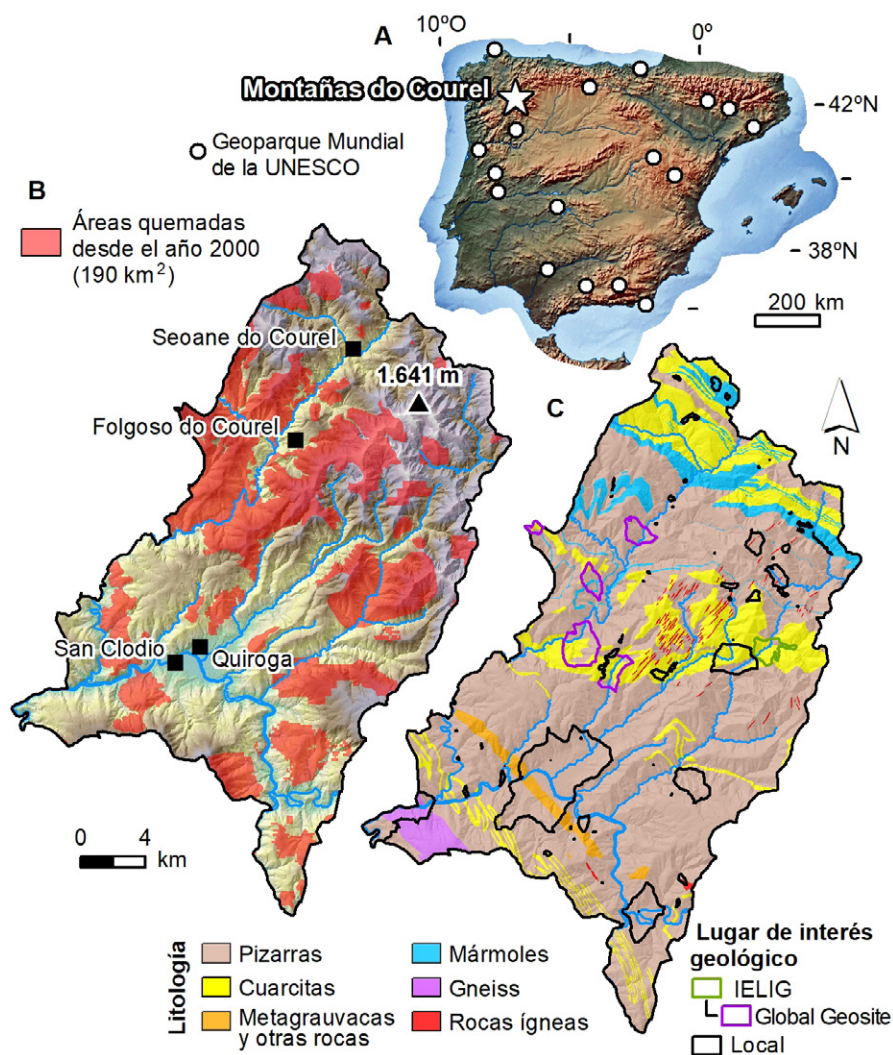
### Análisis de mineralogía magnética

Los experimentos de magnetismo de rocas permiten determinar los minerales ferromagnéticos contenidos en la roca, su estabilidad magnética y las transformaciones sufridas a causa del aumento de temperatura.

Todos los experimentos de magnetismo de rocas se han realizado con una balanza de traslación de campo variable (VFTB, variable field translation balance) en el laboratorio de paleomagnetismo de la Universidad de Burgos. Cada muestra analizada fue pulverizada (300-400 mg) con un mortero de ágata.

#### Experimentos realizados

Se han realizado cuatro experimentos de magnetismo de rocas a dos especímenes de pizarra, uno de ellos era una pizarra afectada por el incendio de 2021 y el otro una pizarra no afectada. Ambas muestras son pizarras granudas grises de la Formación Luarca (Ordovícico Medio), relacionadas con el 37% de los LIG del Geoparque (Fig. 1b). La muestra afectada



**Fig.1. (a) Geoparques Mundiales de la UNESCO en la Península Ibérica. (b) Lugares de interés geológico (LIG) incluidos en el Inventario Español de Lugares de Interés geológico (IELIG), algunos de ellos declarados Global Geosite, y en el inventario del Geoparque, proyectados sobre el mapa litológico (Ballesteros et al., 2022). (c) Áreas quemadas del Geoparque Montañas do Courel desde el año 2000 según el Sistema Europeo de Información sobre Incendios Forestales, programa Copernicus de la Unión Europea. Ver figura en color en la web.**

Fig.1. (a) UNESCO Global Geoparks in the Iberian Peninsula. (b) Sites of Geological Interest (LIG) included in the Spanish Inventory of Sites of Geological Interest (IELIG), some of them declared Global Geosites, and in the local inventory of the Geopark, projected on the lithological map (Ballesteros et al. al., 2022). (c) Burnt areas of the Courel Mountains Geopark since 2000 according to the European Information System on Forest Fires, Copernicus program of the European Union. See color figure in the web.

por el fuego se recogió en un pinar arrasado por el incendio de tipo superficie y copas de San Clodio de septiembre 2021 (Fig. 1c), mientras que la otra muestra se extrajo antes del incendio que afectó la localidad de muestreo al año siguiente.

Se ha sometido a las muestras a los siguientes experimentos:

Curvas de adquisición progresiva de la magnetización remanente isoterma (IRM). Tipo de mineral y concentración.

Ciclos de histéresis ( $\pm 1T$ ). Estados de dominio y granulometría.

Curvas *Back-field*. Coercitividad del mineral.

Curvas termomagnéticas (miden

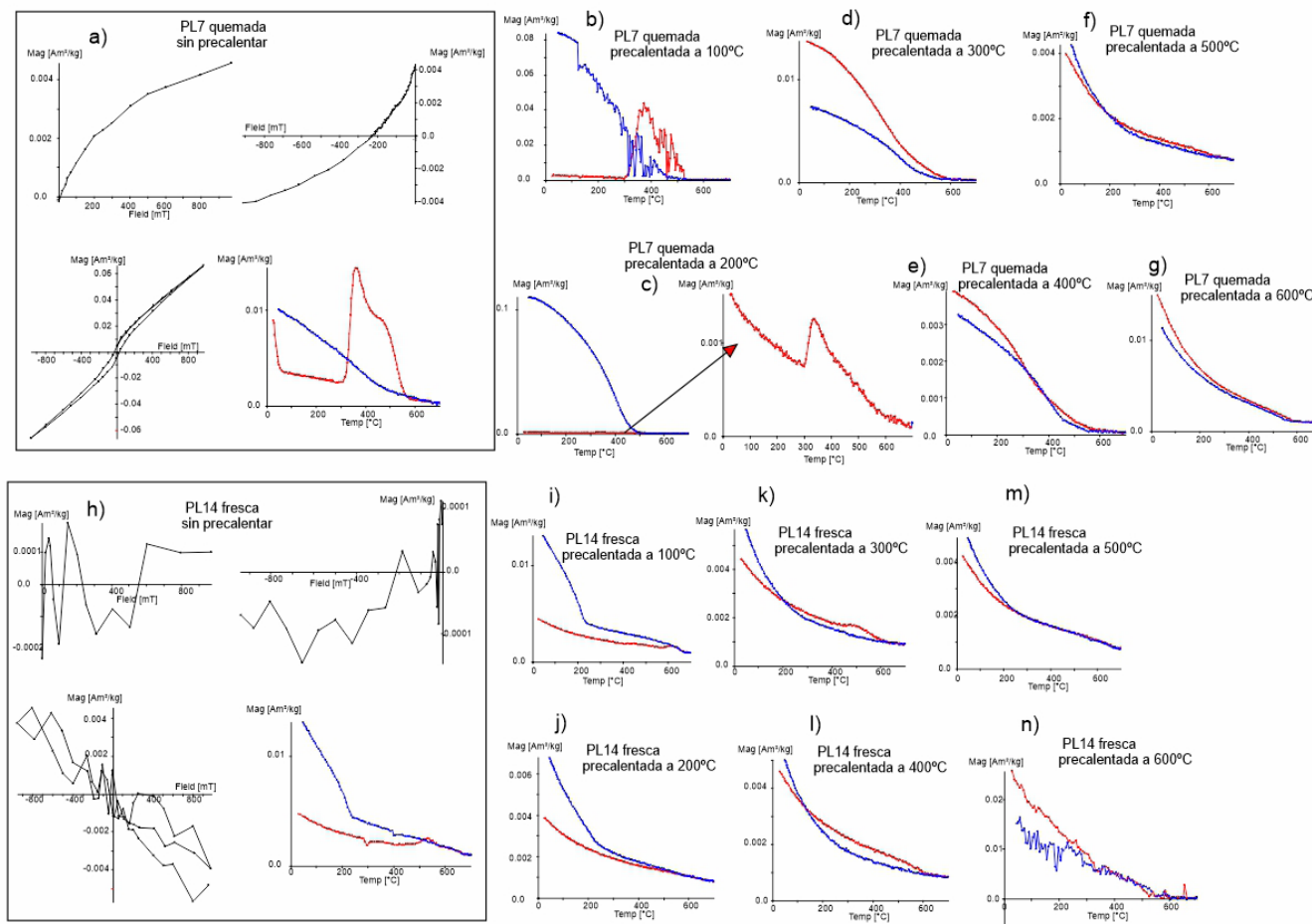
la magnetización de saturación (Ms) en función de la temperatura (T) hasta 700°C en aire. Temperaturas de Curie y transformaciones mineralógicas.

Para la interpretación de los datos se ha utilizado el programa *RockMag Analyzer* (Leonhardt, 2006).

### Resultados

Se han realizado todos los experimentos en dos muestras de pizarras, una de ellas afectada por el incendio y la otra no.

En la Fig. 2 se puede observar los experimentos realizados en las dos mues-



**Fig.2 a)** curva de adquisición de la IRM. Curva Back.field. Curva hysteresis loop. Curva termomagnética de calentamiento (rojo) y enfriamiento (azul). Pizarra quemada sin precalentar. **b,c,d,e,f,g)** Curvas termomagnética de calentamiento (rojo) y enfriamiento (azul) a diferentes temperaturas. Pizarra quemada.

**Fig.2 h)** curva de adquisición de la IRM. Curva Back.field. Curva hysteresis loop. Curva termomagnética de calentamiento (rojo) y enfriamiento (azul). Pizarra quemada sin precalentar. **i,j,k,l,m,n)** Curvas termomagnética de calentamiento (rojo) y enfriamiento (azul) a diferentes temperaturas. Pizarra fresca . Ver figura en color en la web.

Fig.2 a) IRM acquisition curve. Back.field curve. Hysteresis loop curve. Thermomagnetic heating (red) and cooling (blue) curve. Burnt slate without pre-heating. b,c,d,e,f,g) Thermomagnetic heating (red) and cooling (blue) curves at different temperatures. Burnt slate.

Fig.2 h) IRM acquisition curve. Back.field curve. Hysteresis loop curve. Thermomagnetic heating (red) and cooling (blue) curve. Burnt slate without pre-heating. i,j,k,l,m,n) Thermomagnetic heating (red) and cooling (blue) curves at different temperatures. cool slate. See color figure in the web.

tras. Fig. 2a superior izquierda muestra la curva de adquisición de la IRM que no se satura a campo de 1T. Este comportamiento indica, probablemente, la presencia de goetita. En la Fig. 2a superior derecha se representa la curva de back-field por debajo de -200 mT, la cual es indicativa de minerales de alta coercitividad compatible con la goetita.

La histéresis presenta forma típica de mezcla entre magnetita y goetita y, por último, en la Fig. 2a inferior derecha observamos las curvas termomagnéticas. La curva de calentamiento (en rojo) muestra caída alrededor de 80 °C, T<sup>o</sup> de Curie de la goetita, además, se observa alteración y creación de minerales a partir de 350°C, esto implica que esa muestra no ha superado esa temperatura durante el incendio. Se observa un aumento de magnetización a partir de 300 grados y

tres caídas de la magnetización: a 420°C posiblemente maghemita, o lepidocrocita una segunda caída a 580°C indicativa de magnetita, en parte generada durante el calentamiento en el horno y una tercera caída a 700°C de hematites que enmascara en la IRM y en el back-field a la magnetita. Las curvas de calentamiento y enfriamiento no son reversibles por lo que se ha producido una alta transformación mineralógica debido al calentamiento. Si comparamos los resultados obtenidos con una muestra de pizarra sin estar afectada por el incendio observamos: en la Fig. 2h) la muestra presenta mucho ruido, baja magnetización y coercitividad en la curva de back-field. La curva de calentamiento muestra la presencia de paramagnéticos y generación de un pequeño porcentaje de magnetita.

Dado que las muestras de partida son

diferentes realizamos los mismos cuatro experimentos con calentamientos y enfriamientos controlados mediante hornos con apantallamientos de  $\mu$ - metal que permiten un aislamiento casi total del campo magnético ambiental. Hemos empleado los desmagnetizadores térmicos TD48-SC y TD48-DC (ASC). Se han calentado las muestras y realizado los experimentos a 100, 200, 300, 400, 500 y 600°C, con el fin de determinar el comportamiento y evolución de los minerales a partir de la temperatura controlada.

En la figura 2b observamos que toda la goetita ha sido destruida tras precalentar la muestra a 100°C, esto indica que el incendio no supero, al menos en la muestra, los 80°C. En las fig. 2b y 2c se observa como se sigue formando magnetita, mientras que a partir de los 300°C comienza a ser reversible la curva de



enfriamiento indicando menos transformación. A partir de los 400 °C y durante los 500 y 600°C (fig. 2e, f y g) se observa que la roca presenta un comportamiento paramagnético (curva cóncava) y generación de hematites por transformación de la magnetita. Lo que se observa es una constante formación de magnetita a partir del calentamiento en la pizarra fresca y generación de maghemita y/o lepidocrocita a partir de precalentamiento de 200°C en la pizarra quemada.

Con respecto a la muestra fresca en las sucesivas curvas correspondientes a su precalentamiento (fig. i,j,k,l,m y n), se observa que sigue predominando los paramagnéticos y generando pequeños porcentajes de magnetita

En rocas con paramagnéticos es típico que no se pierda la magnetización de la muestra a pesar del calentamiento.

## Discusión

El uso de diferentes técnicas para entender cómo se comporta un material geológico al someterlo a altas temperaturas es crucial para entender el deterioro que puede generar un incendio sobre ellos, dado que muchos de los efectos generados a partir de un incendio tienen que ver con el aumento de temperatura.

Este conocimiento del comportamiento de los materiales tiene utilidad para poder establecer estrategias de protección o restauración del elemento litológico del patrimonio geológico. Este elemento es especialmente importante cuando el valor patrimonial de determinado lugar geológico puede perderse si los materiales que lo forman se ven modificados composicional, textural o estructuralmente.

El estudio del magnetismo de rocas nos ofrece un método con el cual poder estimar las temperaturas alcanzadas en los incendios de una manera muy precisa, observando las transformaciones y/o alteraciones mineralógicas con la temperatura y el tiempo. Así, esta técnica se suma a otras utilizadas hasta ahora como: acotación por rangos de cambios de fases minerales (p.ej. Vázquez et al., 2022), la termoluminiscencia (Sanjurjo-Sánchez et al., 2016) o la susceptibilidad magnética (Sánchez-Roda et al., 2022).

Este estudio es una aproximación al

uso del magnetismo de las rocas para el conocimiento de como las altas temperaturas alcanzadas durante un incendio afectan a los materiales. No obstante, este estudio demuestra el potencial de usar más técnicas relacionadas con el magnetismo para determinar no solo la mineralogía y las máximas temperaturas alcanzadas, sino también transformaciones mineralógicas, tamaño de grano y estado de dominios. Un aspecto importante es controlar la distancia a la superficie de la roca en contacto con el fuego, debido a que las rocas presentan una baja conductividad y, a pocos milímetros o centímetros se pierde el efecto de la temperatura en la mineralogía. No tener esos datos limita las interpretaciones sobre las temperaturas estimadas durante el incendio.

## Conclusiones

Se ha determinado la presencia de mineralogía ferromagnética distinta entre el mismo material afectado por un incendio y sin afectar. Se han establecido tipos de minerales y temperaturas de transformación.

Se ha determinado que la temperatura alcanzada en el incendio por las pizarras muestreadas afectadas por el incendio de San Clodio en 2021 fue inferior a 100 grados. Esto es compatible con el tipo de incendio, fundamentalmente de tipo copas y, en menor medida, de superficie. Sin embargo, es posible que la superficie en contacto directo con el fuego alcanzase temperaturas superiores.

Los ensayos realizados sobre la muestra no afectada por el incendio, muestra unos patrones diferentes a la muestra incendiada. Consideramos que la falta de muestras y control sobre la localización exacta de las muestras y su relación de posición con el fuego han limitado el alcance del estudio.

## Contribución de los autores

Torres-López: Conceptualización, Metodología, Adquisición de datos Ensayos de laboratorio, Interpretación de resultados, Figuras (2), Redacción del manuscrito, Revisión del manuscrito.

Gomez-Heras: Conceptualización, Redacción del manuscrito, Revisión del

manuscrito.

Ballesteros: Muestreo, Figuras (1), Revisión del manuscrito.

## Agradecimientos

Al Geoparque de Montañas do Courel (Contrato de asistencia técnica a estudios para la evaluación de los efectos del incendio de septiembre de 2021 del área Rairos-Montaña do Lor (Geoparque de Courel)) y los proyectos PIC2020-116896RB-C21 y PIC2020-116896RB-C22 del MCIN/AEI/10.13039/501100011033.

Al grupo de Paleomagnetismo de la Universidad de Burgos por facilitarnos el uso del laboratorio.

## Referencias

- Ballesteros, D., Caldevilla, P., Vila, R., Barros, X.C., Rodríguez-Rodríguez, L., et al. (2022). *Geoheritage* 14, 41. <https://doi.org/kg5t>
- European Forest Fire Information System (EFFIS). <https://effis.jrc.ec.europa.eu/reports-and-publications>
- Gomez-Heras, M., McCabe, S., Smith, B.J. y Fort, R. (2009) *Journal of Architectural Conservation* 15(2), 47-58. <https://doi.org/gm3tm4>
- Kompaniková, Z., Gomez-Heras, M., Michňová, J., Durmeková, T. y Vlčko, J. (2014). *Environmental Earth Sciences* 72(7), 2569-2581. <https://doi.org/f6hvnd>
- Leonhardt, R. (2006). *Computers and Geosciences* 32(9), 1420-1431
- McCabe, S., Smith, B.J. y Warke, P.A. (2010). *Engineering Geology* 115, 217-225. <https://doi.org/djx3qm>
- Ozguven, A. y Ozcelik, Y. (2014). *Engineering Geology* 183, 127-136. <https://doi.org/f6wct8>
- Sánchez-Roda, A., Oliva-Urcia, B. y Gómez-Heras, M. (2022). *Applied Sciences* 12(19), 10033. <https://doi.org/kf4m>
- Sánchez-Roda, Gómez-Heras, M. A. Oliva-Urcia, B., (2023). *Geogaceta* 73,75-78. <https://doi.org/10.55407/geogaceta95403>
- Sanjurjo-Sánchez, J., Gómez-Heras, M., Fort, R., Álvarez de Buergo, M., Benito, R. I. y Bru, M.A. (2016). *Microchemical Journal* 127, 247-255. <https://doi.org/f8pwpj>
- Vázquez, P., Benavente, D., Montiel, D. y Gomez-Heras, M. (2022). *Applied Sciences* 12(1), 188. <https://doi.org/h3z6>