

Análisis del riesgo de crioclastia en España: situación actual y tendencia futura

Risk analysis of cryoclastic weathering in Spain: current situation and future trend

Carlos G. Morales Rodríguez¹, M^a Teresa Ortega Villazán¹ y Javier Martínez-Martínez^{2,*}

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Valladolid.

carlos.morales@uva.es, maite@uva.es

² CN Instituto Geológico y Minero de España (CN IGME-CSIC). Calle La Calera, 1. 28760 Tres Cantos (Madrid).

javier.martinez@igme.es

*Corresponding author

ABSTRACT

This study analyzes the variability of cryoclastic weathering risk in Spain, establishing the context for research focused on the deterioration and erosion of rocks and building materials due to freeze-thaw processes in cold climates. The results are derived from the analysis of climate series from 84 meteorological stations of the AEMET (State Meteorological Agency) network over the last 30 years. The intensity of cryoclastic weathering is quantified using different parameters based on the number of times per year that the daily minimum temperature exceeds a defined threshold. The results show that, in general terms, freeze-thaw transitions are more frequent in mountain areas and in the interior of the northern half of the Iberian Peninsula, reaching more than 100 transitions per year. Their incidence is minimal in both oceanic climate regions and coastal Mediterranean and semi-arid areas. The geographical distribution of cryoclastic weathering risk may vary slightly depending on the parameter considered. The temporal evolution of this risk is also addressed by analyzing the trend of each parameter. Although the general trend in Spain indicates a decrease in the number of annual freeze-thaw transitions, some regions show positive trends, suggesting an increasing risk of cryoclastic weathering.

Key-words: frost weathering, freeze-thaw, erosion, climate change, frost.

RESUMEN

Este trabajo analiza la variabilidad del riesgo de crioclastia en España, estableciendo el contexto para estudios centrados en el deterioro y erosión de rocas y materiales de construcción por procesos de hielo/deshielo en climas fríos. Los resultados se obtienen a partir del análisis de las series climáticas de 84 estaciones meteorológicas de la red AEMET durante los últimos 30 años. La intensidad de la crioclastia se cuantifica a través de diferentes parámetros basados en el número de veces al año que la temperatura mínima diaria alcanza un umbral fijado. Los resultados muestran que, en términos generales, las transiciones hielo/deshielo son más frecuentes en áreas de montaña y en el interior de la mitad norte peninsular, llegando a superar más de 100 transiciones anuales. Su incidencia es mínima tanto en regiones de clima oceánico, como en áreas de clima mediterráneo litoral y semiárido. La distribución geográfica del riesgo por crioclastia puede variar ligeramente según el parámetro considerado. También se aborda la evolución temporal del riesgo de crioclastia, analizando la tendencia de cada parámetro. Aunque la tendencia general en España es hacia la disminución del número de transiciones hielo/deshielo anuales, en algunas regiones se registran tendencias positivas, indicando un incremento del riesgo de crioclastia.

Palabras clave: gelificación, hielo-deshielo, erosión, cambio climático, heladas.

Geogaceta, 78 (2025), 75-78

<https://doi.org/10.55407/geogaceta113671>

ISSN (versión impresa): 0213-683X

ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 10/02/2025

Fecha de revisión: 24/04/2025

Fecha de aceptación: 30/05/2025

Introducción

La crioclastia, gelificación o gelivación se ha considerado tradicionalmente un proceso importante de meteorización y erosión de las rocas en climas fríos, generando sedimentos y modelando relieves en contextos naturales, pero también uno de los principales procesos de deterioro que afectan a los materiales de construcción.

Sin embargo, el proceso de hielo-deshielo en los poros, grietas y juntas de las rocas y bloques es posiblemente más complejo de lo que sugieren las perspectivas tradicionales. Por ejemplo, la temperatura a la que el agua se con-

gela en los poros es variable y difícil de determinar (no puede inferirse a partir de los datos de temperatura ambiente). Teniendo esto en cuenta, y con la finalidad de cuantificar el riesgo de deterioro de una roca por procesos de hielo-deshielo, diferentes autores han propuesto distintos índices que evalúan la agresividad del ambiente de exposición (Walder & Hallet, 1985; Grossi et al., 2007; Brimblecombe et al., 2011). En esencia, estos índices buscan cuantificar el número medio de heladas efectivas que se producen a lo largo de un año.

Este trabajo analiza el comportamiento espacial y temporal que en España tienen las heladas, analizando las tem-

peraturas, tanto mínimas como máximas diarias, así como sus oscilaciones, durante las tres últimas décadas (1993-2022). El análisis se centra en evaluar la intensidad de las temperaturas mínimas, los diferentes umbrales de heladas, su desigual frecuencia y distribución en distintas regiones climáticas del territorio español, la mayor o menor predisposición a procesos de hielo-deshielo, las áreas de mayor riesgo y la tendencia de la intensidad en el tiempo.

Metodología

La información meteorológica se ha obtenido de la red sinóptica y climatoló-

gica de AEMET en España, disponible en el portal de datos abiertos *AEMET Open Data a través del API REST (Application Programming Interface. Representational State Transfer)*.

Selección de observatorios de estudio

La selección de observatorios ha estado condicionada por la calidad de sus series temporales, lo que nos ha llevado a elegir aquellos que contaran con series largas, homogéneas y coincidentes temporalmente. Normalmente los observatorios seleccionados corresponden a estaciones de primer orden (con registro de múltiples parámetros hidrometeorológicos), y cuando no ha sido posible, de segundo orden (estaciones termopluviométricas).

Las series climáticas de los observatorios seleccionados se han sometido a óptimos controles de calidad para construir una base de datos homogénea (Alexandersson & Moberg, 1997), siguiendo los siguientes criterios: i) Sólo se han elegido observatorios que no tuvieran en sus series más de un 10% de lagunas (valores perdidos/missing values); ii) se han detectado datos erróneos u *outliers*; iii) se han aplicado filtros lógicos, y las lagunas (<10%) se han completado mediante técnicas de regresión lineal múltiple por pasos sucesivos. Las correlaciones se han realizado a partir de 3 o 4 observatorios próximos y de la misma área climática, y cuando los coeficientes de determinación hayan estado siempre por encima del 0,8.

La selección de observatorios también ha cumplido un criterio geográfico, buscando que fueran representativos de las diferentes regiones climáticas de España, de distintos intervalos altitudinales, y que conformara una red suficientemente densa y uniforme en su distribución para que, al menos, hubiera un mínimo de 1 y un máximo de 3 observatorios por cada $1^\circ \times 1^\circ$ de latitud y longitud para así facilitar la producción cartográfica.

El estudio se ha realizado con una selección de 84 observatorios que cumplen estas condiciones. El resultado ha sido la construcción de una base de datos diaria de temperaturas mínimas, máximas y oscilaciones térmicas. Cada variable analizada cuenta con series de 10.950 datos para cada observatorio, con un total de 919.800 datos por cada variable térmica. Todos ellos se han correlacionado para su representación cartográfica con la altitud, lo que ha permitido estimaciones

en las áreas de montaña donde los datos son más escasos.

Criterios de efectividad de las heladas

Se considera "helada efectiva" aquella capaz de congelar el agua contenida en los huecos (poros, fisuras, juntas) de una roca, o un conjunto de bloques. Los parámetros considerados para cuantificar el número de heladas efectivas son (Walder & Hallet, 1985; Grossi et al., 2007; Brimblecombe et al. 2011):

- Número de Heladas al año: registra el número de días al año con temperatura mínima inferior a 0°C .
- Ciclos de Hielo/Deshielo a 0°C (*Freeze-Thaw cycles*): número de transiciones a lo largo del año en las que la temperatura mínima diaria es inferior a 0°C y la temperatura máxima es superior a 0°C . Puede suceder que la transición ocurra entre varios días sucesivos.
- Ciclos de Hielo/Deshielo Intensos: número de ciclos de hielo/deshielo en los que, siendo la temperatura máxima superior a 1°C , la mínima desciende por debajo de $-3,5^\circ\text{C}$, $-4,5^\circ\text{C}$, $-6,0^\circ\text{C}$ y -10°C (se obtiene un valor para cada temperatura mínima considerada).
- Índice de la Intensidad de la helada (*Frost Intensity, FI*): se obtiene como la raíz cuadrada del sumatorio de días al año en los que la temperatura está por debajo de 0°C . Se realiza para cada observatorio, mensual, estacional y anualmente.

A partir de esta información se analizan las heladas en España en los últimos 30 años (según los diferentes parámetros), sus patrones de comportamiento, evolución y tendencias, intensidad, frecuencia y duración.

Resultados

Distribución geográfica del Número de Heladas al año

La Figura 1 muestra la distribución geográfica del número de heladas al año en España. Según los datos representados, podemos deducir que los sectores que padecen con mayor intensidad el frío son las regiones de montaña y áreas circundantes, así como depresiones interiores de muchas de ellas. En estos entornos, no son extraños valores por encima de 100 días de heladas al año. Le siguen en importancia los espacios del interior de la Península Ibérica, sobre todo de la cuenca del Duero, seguida de las cabeceras del Tajo y Guadiana, caracterizadas por un clima mediterráneo de interior frío (60-80 días de helada anuales). Donde el frío tiene una escasa importancia es en todo el litoral septentrional, afectado por un clima oceánico; así como en zonas de clima mediterráneo litoral y mediterráneo semiárido, donde normalmente computan menos de 10 heladas de media anual (cuando no menos de 5, o incluso no las padecen). Por su parte, en ambos archipiélagos las heladas no son significativas, salvo en zonas de montaña a

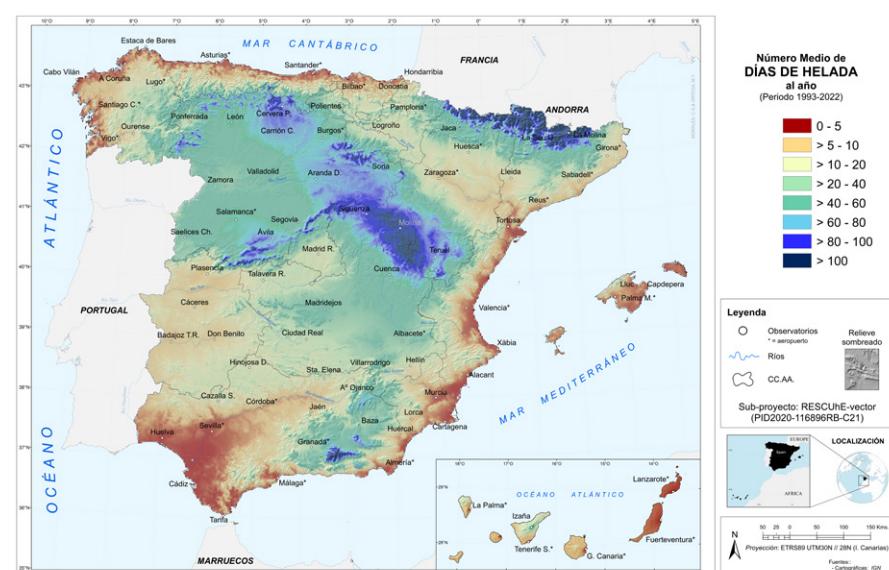


Fig. 1.-Distribución geográfica del número de heladas al año en España. Ver imagen a color en la web.

Fig. 1.- Geographical distribution of the number of frost days per year in Spain. See color figure in the web.

cierta altitud (Escorça Lluc a 490 m tiene 23,5 días; Izaña, a 2.369 m 45,7 días).

Existe una relación directa entre el número de heladas al año y la altitud. La frecuencia más relevante se alcanza por encima de 900 m, pudiendo alcanzar valores próximos a 120 días al año en las cordilleras Cantábrica, Ibérica y Pirineos, así como en la región de Castilla y León.

Ampliando el análisis de la evolución del número medio anual de heladas, desde 1961 a nuestros días, se aprecia una reducción significativa de forma generalizada en toda España. En concreto, al comparar el periodo 1961-90 con el 1993-22, el porcentaje de variación (disminución) alcanza el 40% en algunos observatorios (Ciudad Real, Cuenca, Izaña, Madrid, Orense, Valladolid y Zaragoza). Esto se traduce en una reducción de más de 20 días en el número medio de heladas.

De igual forma, las temperaturas mínimas extremas registradas en el periodo de análisis no alcanzan los valores de años anteriores. El valor más bajo en el periodo de estudio es -25,2°C (Molina de Aragón; 12/01/2021), si bien el 28/01/1952 alcanzó -28,2°C. Según AEMET, la mínima absoluta más baja registrada en zona poblada es de -30,0°C en Calamocha-Fuentes Claras (Teruel) el 17/12/1963; y el récord en zona no poblada alcanza los -32°C en el lago Estangento (Lérida) el 2/02/1956.

En las áreas donde las heladas son más frecuentes, éstas se pueden llegar a registrar incluso en los meses de verano. En la estación de La Molina las heladas en julio y en agosto se han producido en el 26,7% y el 20% de los años analizados, respectivamente.

Distribución geográfica de los Ciclos de Hielo/Deshielo a 0°C

La distribución geográfica de los valores de este parámetro (ciclos de hielo/deshielo a 0°C) es muy similar o incluso coincidente en algunos observatorios con el número de heladas al año.

Las transiciones hielo/deshielo son más frecuentes en áreas de montaña de la mitad norte de la península (La Molina, Molina de Aragón, Seu d'Urgell) y en espacios de su interior, principalmente de Castilla y León (Salamanca, Burgos, Soria y Ávila). Su incidencia es mínima tanto en regiones de clima oceánico, como áreas de clima mediterráneo litoral (Alicante, Gerona) y semiárido (Murcia, Almería).

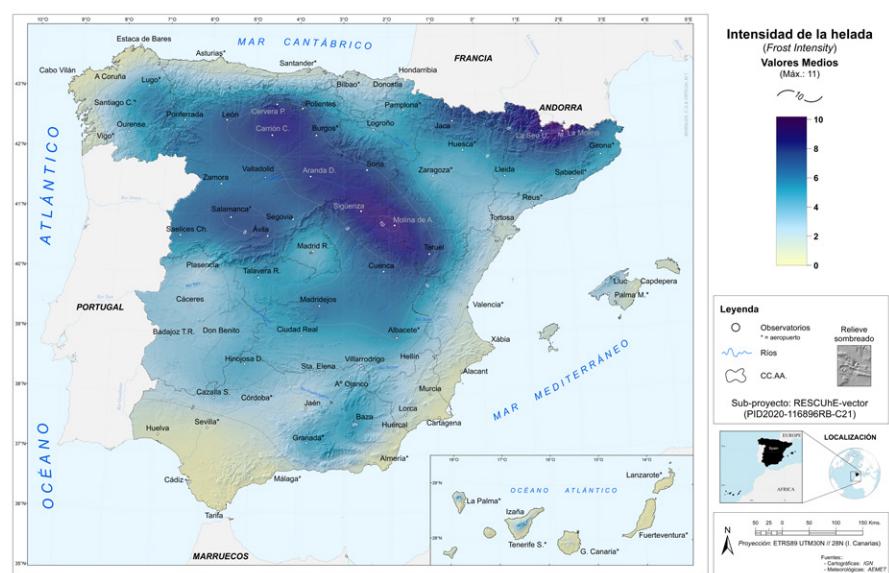


Fig.2.- Distribución geográfica del Índice de la Intensidad de la helada (FI). Ver imagen a color en la web.

Fig.2.- Geographical distribution of Frost Intensity index (FI). See color figure in the web.

Distribución geográfica de los Ciclos de Hielo/Deshielo Intensos

Los resultados muestran que, salvo en zonas de montaña, el número de heladas intensas se reduce considerablemente en todas las áreas climáticas, aunque siguen mostrando un número de ciclos elevado las áreas de clima mediterráneo de interior frío (fundamentalmente de la cuenca del Duero). A medida que las mínimas consideradas son más bajas (-6,0°C y -10°C), las transiciones quedan constreñidas a los sectores más montañosos. Además, la evolución temporal de este parámetro muestra mayor irregularidad, alternando periodos donde estos valores no se alcanzan y otros donde repuntan (por ejemplo: 2001, 2005, 2007, 2013, 2017 y 2021, todos ellos asociados a una mayor producción de "olas de frío" y períodos de frío intenso).

Distribución geográfica del Índice de la Intensidad de la helada (FI)

Los valores medios de FI en España varían entre 0 y 11 (Fig. 2), alcanzando niveles más elevados en las cordilleras de la mitad norte del país y, sobre todo, el entorno de la Cordillera Ibérica. Éstas son regiones caracterizadas por valores de FI por encima de 10. FI toma valores entre 8 y 10 en áreas meridionales circundantes a los relieves pirenaicos y cantábricos (Jaca, La Seu d'Urgell, Cervera de Pisuerga, Valderredible) y ciertas partes de Castilla y León (León, Salamanca). La mayor parte de esta comunidad, junto con Castilla-La

Mancha está incluida en el rango de FI entre 6 y 8. Las áreas donde FI toma valores nulos se extienden por regiones de clima oceánico, mediterráneo semiárido, mediterráneo litoral andaluz y los archipiélagos.

El FI muestra un comportamiento más homogéneo a lo largo del tiempo donde las heladas son más habituales, mientras que existe una mayor irregularidad interanual en aquellas regiones donde son menos frecuentes.

Tendencia en la evolución temporal del parámetro FI

La tendencia del parámetro FI se ha analizado a partir de las rectas de regresión significativas durante el periodo estudiado. Una pendiente positiva en esta recta indica un incremento de FI a lo largo del tiempo (incremento del número de heladas anualmente), mientras que una pendiente negativa indica una disminución del valor de FI y del número de heladas durante ese periodo. Estas tendencias pueden servir para comprender la evolución de las heladas en un futuro próximo.

La Figura 3 muestra la distribución espacial de las tendencias del FI. Éstas son positivas (pendientes ascendentes) en el 32,1% de los observatorios analizados. Éstos se concentran fundamentalmente en las áreas circundantes al Pirineo (Jaca, La Seu d'Urgell, Pamplona) y la Cordillera Cantábrica (Cervera de Pisuerga, Valderredible), más incluso que en cotas más altas (La Molina).

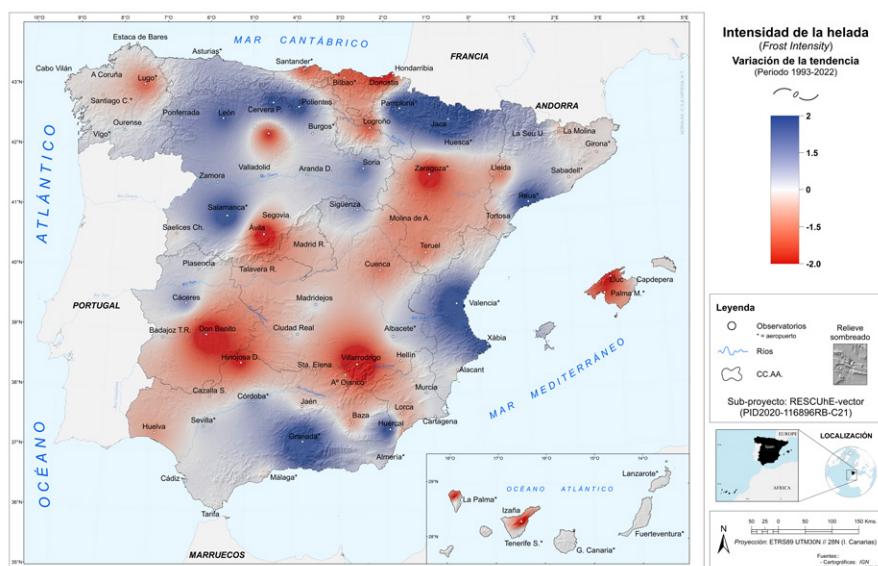


Fig.3.- Distribución geográfica de la variación de la tendencia del parámetro Índice de la Intensidad de la helada (FI). Ver imagen a color en la web.

Fig.3.- Geographical distribution of the trend variation of the parameter Frost Intensity index (FI). See color figure in the web.

Esta misma tendencia se advierte en buena parte de Castilla y León y muchos puntos periféricos de costa, tanto mediterránea como del norte de España. Estos últimos son observatorios con una fuerte irregularidad en la aparición de heladas y que condicionan bastante el carácter de la tendencia (la inclinación de la recta).

Por el contrario, gran parte del interior peninsular muestra una tendencia negativa (53,6% de los observatorios). Estas estaciones forman una diagonal desde la mitad sur de Extremadura/ oeste de Andalucía a la depresión del Ebro pasando por Castilla-La Mancha (Cuenca, Hellín), Castilla y León (Carrión de los Condes, Ávila, Burgos, Valladolid) y Aragón (Molina de Aragón, Teruel). Igualmente se observa en el interior de Galicia (Lugo) y en el Cantábrico oriental (Santander, Bilbao, Donostia) y en las islas Canarias y Baleares (Fig. 3).

El 14% de las estaciones analizadas no muestran una tendencia clara, o la pendiente de la recta es muy baja y estadísticamente no es significativa (niveles de confianza inferiores a 95%).

En el período analizado se han detectado variaciones en el FI de hasta ± 2 puntos, lo que representa una horquilla de variación del 20% de diferencia entre unos observatorios y otros. Además, a nivel nacional existe un mayor peso de variaciones de la tendencia descendentes, o con pendientes nulas (el 67,9% de las estaciones analizadas), lo que indica una

tendencia general en todo el territorio nacional a la disminución en el número de heladas anuales y su intensidad.

Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran una alta variabilidad del riesgo de crioclastia en todo el territorio español. La distribución geográfica del riesgo por crioclastia puede variar ligeramente según el parámetro considerado. Los sectores con mayor riesgo son las áreas de montaña y sus áreas circundantes (más de 100 heladas al año, incluso en períodos estivales; $FI > 10$), seguidos de las regiones del interior peninsular, sobre todo de la cuenca del Duero y las cabeceras del Tajo y Guadiana (> 60 heladas al año; $8 > FI > 6$). Las zonas con menor riesgo son las regiones de clima oceánico, las de clima mediterráneo litoral y semiárido (< 10 heladas de media anual) y ambos archipiélagos. Cuando se consideran transiciones hielo/deshielo con umbral de temperatura más bajos (-6°C o -10°C), las zonas de mayor riesgo de crioclastia se concentran en áreas de montaña, media montaña circundante y áreas de clima mediterráneo de interior frío de la mitad septentrional de España.

En términos generales y atendiendo a los gráficos de evolución temporal de los parámetros, se observa una tendencia a la disminución del número de transiciones hielo/deshielo anuales. Sin embargo,

en el 32,1% de los observatorios analizados esta tendencia es creciente. Estas estaciones se ubican en áreas de media montaña entorno al Pirineo y la Cordillera Cantábrica (registrando un incremento más notable incluso que en las cotas más altas), así como en gran parte de Castilla y León. Estas tendencias pueden servir de modelo para anticipar la evolución del riesgo de crioclastia en España en un futuro próximo.

Contribución de los autores

CMR y TOV: metodología, edición, figuras, adquisición y análisis de datos, escritura y revisión del manuscrito; JMM: Estructura del trabajo, supervisión del trabajo; escritura y revisión del manuscrito.

Agradecimientos

Esta publicación es parte de los proyectos de I+D+i PID2020-116896RB-C21 y PID2020-116896RB-C22, financiados por MCIN/AEI/10.13039/501100011033 (Ministerio de Ciencia e Innovación); y por el proyecto TEC-Heritage (TEC-2024/ TEC 39) financiado por la Comunidad de Madrid (Programas de I+D en Tecnologías).

Referencias

- AEMET. Agencia Estatal de Meteorología (2010). *Guía resumida del clima en España*. https://www.aemet.es/es/conocermas/recursos_en_linea/publicaciones_y_estudios/publicaciones/detalles/guia_resumida_2010
- Alexandersson, H. y Moberg, A. (1997). *International Journal of Climatology* 17 25-34. <https://doi.org/b3r9vr>
- Brimblecombe, P., Grossi, C. y Harris, I. et al. (2011). En: *Survival and Sustainability. Environmental Earth Sciences* (H. Gökçekus, U. Türker y J. LaMoreaux, Eds). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-95991-5_20
- Grossi, C., Brimblecombe, P. y Harris, I. (2007). *Science of the Total Environment* 377. 273-281.
- Walder, J. y Hallet, B. (1985). *GSA Bulletin* 96(3): 336-346. <https://doi.org/cxfqtj>