



**universidad
de león**



FACULTAD DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y AMBIENTALES

**VARIABILIDAD Y CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
CORDILLERA CANTÁBRICA: ANÁLISIS DEL
COMPORTAMIENTO NIVOSO**

**CLIMATE CHANGE AND VARIABILITY IN THE
CANTABRIAN MOUNTAINS: SNOWFALL
ANALYSIS**

Autor: Miguel Rodríguez Otero

Tutor: D. Andrés Merino Suances

GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

Julio, 2023

ÍNDICE:

1 Introducción	1
2 Área de estudio y base de datos	5
3 Material y métodos	8
4 Resultados	11
4.1 Análisis exploratorio	11
4.2 Espesores de nieve	12
4.3 Deshielo.....	14
4.4 Temperaturas.....	15
4.5 Precipitaciones	17
5 Discusión y conclusiones	18
6 Referencias	21

Resumen: La comprensión de los cambios climáticos en las regiones montañosas resulta de vital importancia al representar zonas con un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y otros recursos ecosistémicos. A escala europea existe una carencia de estudios que valoren la exposición al cambio climático en la Cordillera Cantábrica, que representa un sistema montañoso frágil con gran número de endemismos, ubicado al noroeste de la Península Ibérica. El objetivo principal de este trabajo es analizar las tendencias en la variabilidad climática de la Cordillera Cantábrica a lo largo de una serie temporal comprendida entre 1959 y 2022. Utilizando el entorno y lenguaje de programación R se analizó la base de datos ERA5-Land, extrayendo las siguientes variables climáticas: espesor de nieve, deshielo, temperatura del aire y precipitación total; con el fin de analizar sus tendencias y significación se utilizó la prueba estadística de Mann-Kendall.

Los resultados evidenciaron una clara tendencia positiva en el incremento de las temperaturas, así como cambios en la variabilidad de la precipitación y cobertura nival, aunque de forma menos notable.

Palabras clave: ERA5-land, Mann-Kendall, profundidad de nieve, R, tendencia.

Abstract: The understanding of climate changes in mountainous regions is of vital importance as they represent areas with a crucial role in conserving biodiversity and other ecosystem resources. At a European scale, there is a lack of studies that assess exposure to climate change in the Cantabrian Mountains, which represents a fragile mountain system, with a large number of endemic species, located to the northwest of the Iberian Peninsula. The main objective of this work is to analyze the trends in the climatic conditions of the Cantabrian Mountains throughout a time series found between 1959 and 2022. Using the Rstudio environment and programming language, the ERA5-Land database was analyzed, extracting the following climatic variables: snow deep, melting, air temperature and total precipitation; in order to analyze their trends and significance, the Mann-Kendall statistical test was employed.

The results showed a clear positive trend in increasing temperatures. Changes in precipitation patterns and snow cover were also evident, although in a less significant way.

Keywords: ERA5-land, Mann-Kendall, R, snow depth, trend.

1 Introducción

Las zonas de montaña representan ecosistemas frágiles que juegan un papel clave en multitud de procesos, sistemas ambientales y sistemas socioeconómicos. El impacto de un cambio climático repercutiría negativamente en sus sistemas hidrológicos, ecológicos y sociales en función de sus diferentes umbrales de vulnerabilidad (Martin *et al.*, 1996; Beniston, 1997, 2003; Nijssen *et al.*, 2001; Diaz *et al.*, 2003). Los efectos del cambio climático son difíciles de predecir debido a las incertidumbres asociadas con los escenarios climáticos y retroalimentaciones entre impactos (Nogués-Bravo *et al.*, 2007).

Las complejas características geomorfológicas y de paisaje que presentan las zonas montañosas como la vegetación o el suelo, generan cambios microclimáticos que influyen en el calentamiento de la superficie, la humedad del suelo o la duración de la capa de nieve; estas escalas locales dificultan predecir las consecuencias del cambio climático en su ecosistema (Giorgi y Mearns, 1991; Barry, 1992; Haeberli y Beniston, 1998).

Según los pronósticos del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se vaticina que las temperaturas medias en los sistemas montañosos europeos del centro y sur de Europa aumentarán más que la media mundial. Bajo el escenario A1B (escenario climático con un futuro ecuánime en el uso de fuentes de energía y un comportamiento equilibrado entre el crecimiento de la población, el producto interno bruto y el gasto energético del planeta) el calentamiento medio anual del hemisferio norte desde 1980 a 2099 variará entre 2,2 °C y 5,1 °C; las temperaturas mínimas invernales y máximas estivales también se verán incrementadas. En cuanto a las precipitaciones, se proyecta una disminución en el número anual de días de lluvia, lo que aumenta la probabilidad de sequías durante el verano, sin embargo, es probable que las precipitaciones extremas a corto plazo aumenten. Se espera que el calentamiento general acorte la duración de la temporada de nieve y provoque una disminución en la profundidad de la nieve de entre un 50% y un 100% induciendo una retroalimentación positiva y amplificando aún más el calentamiento (Christensen *et al.*, 2007).

Las zonas montañosas desempeñan un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad. Son ecosistemas únicos y diversos, que albergan una amplia variedad de especies vegetales y animales endémicas adaptadas a esas características singulares. El éxodo rural experimentado desde 1950 ha conducido a profundos cambios del paisaje, sociedades agrícolas y ganaderas abandonaron sus actividades provocando cambios en la cobertura terrestre y

modificando la distribución de especies. Estas dinámicas han provocado una disminución de la escorrentia y una ralentización general de los procesos geomorfológicos (Pisabarro *et al.*, 2019).

En un estudio de Thuiller *et al.* (2005) se advierte que las especies de plantas en las regiones montañosas del norte de España son altamente susceptibles al cambio climático, estimando pérdidas de biodiversidad de hasta el 60% de media para el año 2080. Ante este escenario, las especies vegetales y animales se desplazarían en anillo a cotas superiores en busca de condiciones climáticas similares, lo que resultaría en una ocupación de hábitats más reducidos y en una disminución de la población, haciéndolas más vulnerables a la presión genética y ambiental. Además, se plantea que las especies que originalmente se encuentran cerca de las cimas de las montañas no tengan un hábitat al cual trasladarse, lo que podría llevar a su reemplazo completo (Peters y Darling, 1985). Así, durante el Holoceno medio, cuando las temperaturas en el este de América del Norte eran 2 °C más cálidas que en la actualidad, *Tsuga canadensis* y *Pinus strobus* se encontraban 350 metros más altos en las montañas de lo que se encuentran hoy (Davis, 1983 como se citó en Peters y Darling, 1985).

Hasta ahora, los estudios sobre el cambio climático se han enfocado tradicionalmente en variables climáticas como la precipitación total y las temperaturas medias, sin embargo, la nieve utilizada como variable climática ha recibido poca atención debido a sus escasos registros históricos y la complejidad de su medición. Además, la mayor parte de los estudios sobre variabilidad espacial y temporal del espesor de la nieve y su equivalente en agua están vinculados a zonas con importante impacto turístico por sus estaciones de esquí (Haeberli y Beniston, 1998; López-Moreno y García-Ruiz, 2004). Sin embargo, es un indicador interesante del cambio climático, ya que depende no solo de la temperatura sino también de la precipitación. En áreas montañosas templadas es especialmente sensible a los cambios atmosféricos, debido a que reacciona al balance de energía de la superficie, y por tanto es un elemento clave en la detención temprana de un cambio climático inducido por el hombre (Martin *et al.*, 1996; Haeberli y Beniston, 1998; Pons *et al.*, 2010). Los registros de acumulaciones de nieve promediados durante períodos mensuales o anuales brindan una visión útil de las fluctuaciones climáticas (Beniston, 1997).

Por otro lado, el deshielo en metros de agua equivalente es otro parámetro muy valioso que hace referencia a la cantidad de agua líquida que resulta del derretimiento de la nieve acumulada, utilizándose para estimar la cantidad de agua que se libera cuando la nieve se derrite

por completo. La nieve fresca y suelta tiende a tener una baja compacidad, ya que contiene más aire entre los cristales de nieve; por otra parte, la nieve compacta tiende a tener una mayor densidad y puede resultar en una menor profundidad de nieve medida en metros, pero también puede producir un mayor deshielo en metros de agua equivalente debido a la mayor proporción de agua presente.

La comprensión de los cambios climáticos en las regiones montañosas es crucial debido a que un gran número de ríos en todo el mundo se originan en estas áreas. Estos ríos dependen en gran medida del flujo de agua proveniente del deshielo, lo que los convierte en un componente vital del ciclo hidrológico, siendo fundamental el estudio de como el cambio climático puede afectar a la escorrentía y el impacto en sus regiones. Por ejemplo, a pesar de que los Alpes solo cubren el 23% de la cuenca del río Rin, durante el verano seco de 1976, el deshielo de la nieve y el hielo de las montañas contribuyeron hasta un 95% del total del caudal del río Rin hacia el Mar del Norte (Diaz *et al.*, 2003; Christensen *et al.*, 2007). Estas variaciones hidrológicas también tienen impacto sobre la generación de energía hidroeléctrica, que estudios como el de Lehner *et al.* (2005) cifraron en pérdidas de más del 20% del potencial hidroeléctrico para 2070.

A escala europea los estudios que valoran la exposición al cambio climático de zonas de montaña se centran únicamente en los Pirineos y en los Alpes, ofreciendo conclusiones limitadas al no considerar la totalidad de las cordilleras, centrándose solo en una vertiente o en puntos concretos. En los Alpes, diversos estudios han constatado una tendencia en la disminución de la frecuencia de nevadas superiores a 20 mm/día y como grupos de años con una alta cobertura de nieve alternan con grupos de años con baja cobertura de nieve (Martin y Durand, 1998), habiendo ciclos a largo plazo que parecen estar gobernados por cambios en los forzamientos a gran escala (Beniston, 1997). Autores como Abegg y Froesch (2005) resaltaron que, si las temperaturas aumentaran entre 2 °C y 3 °C para el año 2050, los cambios en la acumulación de nieve en los Alpes podrían conducir a impactos notables en su economía. Esto se explica a través de un estudio de Martin *et al.* (1996) donde se concluye que, por cada grado centígrado de aumento de la temperatura media, la línea de nieve se desplazaría unos 150 metros hacia cotas superiores. Aunque los Alpes parecen tener cierta capacidad de adaptación al cambio climático, tolerando aumentos de temperatura media en el rango de 1 a 2 grados, se teme que los efectos de la deforestación, urbanización, gestión de pastizales y otros factores

puedan anular esta capacidad de amortiguación natural en muchas áreas (Theurillat y Guisan, 2001).

Por otra parte, en los Pirineos se ha observado una disminución significativa en el espesor de nieve y las precipitaciones invernales, a pesar de mantener una fuerte variabilidad interanual. En el Pirineo Central, a una altitud de 1800 metros, se estima que el espesor promedio de nieve podría reducirse a la mitad para el año 2050, mientras que el período de duración de la nieve en el suelo se acortaría en más de un mes. Los registros pluviométricos muestran una tendencia descendente, especialmente en la disminución de la frecuencia de eventos de alta intensidad y un aumento en la frecuencia de períodos de sequía prolongados. El análisis del indicador de temperatura media anual revela una tendencia positiva y estadísticamente significativa, con anomalías consistentemente en aumento desde 1980, siendo más pronunciadas durante los veranos (López-Moreno y García-Ruiz, 2004; López-Moreno, 2005; Moreno *et al.*, 2018).

Entre las escasas investigaciones que abarcan la Cordillera Cantábrica en su área de estudio, destaca la realizada por Pons *et al.* (2010), donde se analiza la tendencia de la frecuencia anual de nieve (en formato binario, no en cantidad) en el noroeste peninsular en altitudes bajas y medias a través de 33 estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). En este estudio, se detectó una disminución relativa del 54% en la frecuencia anual de nieve desde mediados de 1970. Esto se traduce en aproximadamente en 13 días menos de nieve por año en 2002 en comparación con 1975 (la tendencia es significativa únicamente en invierno y primavera). Las estaciones ubicadas en altitudes más elevadas muestran una reducción de aproximadamente 23 días anuales de nieve entre 1975 y 2002, mientras que las estaciones en menor altitud han experimentado una disminución de en torno a 7 días anuales durante el mismo período.

La ausencia de estudios detallados en la Cordillera Cantábrica es preocupante debido a la relevancia geográfica y ecológica de esta región que alberga una amplia diversidad de ecosistemas y especies endémicas y vulnerables. Comprender cómo el clima está cambiando en esta área es fundamental para evaluar el impacto en la biodiversidad y los ecosistemas que dependen de condiciones climáticas estables. La realización de un trabajo donde se analicen las tendencias climáticas en esta región se vuelve fundamental para aportar al conocimiento y comprender mejor los impactos del cambio climático en la biodiversidad, los recursos hídricos y las actividades socioeconómicas de esta región montañosa.

Por todo ello, se ha propuesto este trabajo cuyo objetivo principal será analizar la tendencia en la variabilidad climática de la Cordillera Cantábrica a lo largo de una serie temporal comprendida entre 1959 y 2022.

Con el propósito de alcanzar este objetivo general se establecen los siguientes objetivos específicos:

- Recopilar, analizar y evaluar las variaciones en el espesor de nieve, deshielo, temperatura y precipitación en la Cordillera Cantábrica durante el período de estudio, identificando las tendencias y significaciones, y las anomalías significativas.
- Evaluar los posibles efectos e impactos de la variabilidad climática en la Cordillera Cantábrica y comparar los resultados obtenidos con los estudios previos en otros sistemas montañosos.
- Dar respuesta a una carencia de estudios en el área de estudio.

Al lograr estos objetivos específicos, se espera obtener una comprensión más completa de la variabilidad climática y del cambio climático en la Cordillera Cantábrica, lo que contribuirá a la generación de conocimiento científico en este campo y podría tener implicaciones relevantes para la gestión de recursos naturales y la planificación de políticas adaptativas al cambio climático en la región.

2 Área de estudio y base de datos

El área de estudio de este trabajo se sitúa a lo largo de la Cordillera Cantábrica, macizo montañoso de más de 400 km de longitud, resultante en la orogénesis alpina y que atraviesa la geografía española por su borde norte de oeste a este a través de las Comunidades Autónomas de Galicia, Castilla y León, Principado de Asturias, Cantabria, País Vasco, Comunidad Foral de Navarra y La Rioja. Sus límites quedan definidos por la costa cantábrica al norte, la meseta al sur, el Macizo Galaico Leonés al oeste y los Montes Vascos al este.

Amplias áreas se sitúan en el rango altitudinal 2000-2500 metros sobre el nivel de mar (m.s.n.m. en adelante) y sus mayores elevaciones se encuentran en su sector central, donde sobresale Torre Cerredo con 2.648 m.s.n.m. La Cordillera Cantábrica ha estado sometida a la acción de periodos glaciares en el pasado; Rodríguez-Rodríguez *et al.* (2014) estimaron un área total de 3150 km² cubiertos por glaciares en la etapa de máximo glaciar (LGM) y entrando en recesión desde entonces.

La cordillera Cantábrica desempeña un papel de vital importancia en términos de ecología y biodiversidad. Esta cadena montañosa alberga una gran diversidad de ecosistemas, especies y hábitats que contribuyen a la riqueza biológica de la región. Sirve de refugio a especies en peligro de extinción y endémicas, provisiona servicios ecosistémicos esenciales, etc.

Debido a su extensión y relieve, el clima en la Cordillera Cantábrica puede variar bastante de una zona a otra, estando ampliamente influenciado por su localización. La ubicación geográfica de la región con respecto a los vientos del oeste, especialmente durante el verano, es de suma importancia, ya que actúa como una barrera para la condensación de humedad. La cercanía al Mar Cantábrico tiene un impacto significativo, especialmente en su lado norte, donde las precipitaciones son más constantes, las temperaturas más suaves, las nevadas menos frecuentes y la acumulación de nieve menor. La influencia marina ayuda a moderar su clima, convirtiéndola en una región montañosa de carácter oceánico, al tiempo que marca el límite con la zona atlántica de España. La estructura y disposición del relieve contribuyen a la aparición de marcados contrastes climáticos en esta región. En su mitad occidental, existen características propias de un clima de alta montaña, con mayores precipitaciones, nevadas abundantes y duraderas, temperaturas más bajas y ausencia de aridez en verano. En cambio, en la mitad oriental, el clima de montaña se suaviza, las precipitaciones disminuyen de manera zonal y meridional, las nevadas no son tan frecuentes, los fríos extremos se atenúan y se presenta la aridez estival. Este área se caracteriza por la mezcla de condiciones climáticas y ecológicas diversas, que combinan elementos atlánticos y mediterráneos. En la mitad occidental, las nevadas son significativamente más abundantes que en la mitad oriental, llegando a duplicar o triplicar su cantidad estando presente durante 7-8 meses o incluso más dependiendo del enclave. El área con la mayor acumulación de nieve se encuentra en el tramo comprendido entre el puerto de Pajares y el de San Glorio (Ortega y Morales, 2015).

El área de estudio se presenta a través de la Figura 1, donde se muestra un mapa del relieve y la ubicación geográfica de la Cordillera Cantábrica.

Variabilidad y cambio climático en la Cordillera Cantábrica: Análisis del comportamiento nivoso. Climate change and variability in Cantabrian Mountains: snowfall analysis.

Area de estudio/Study site

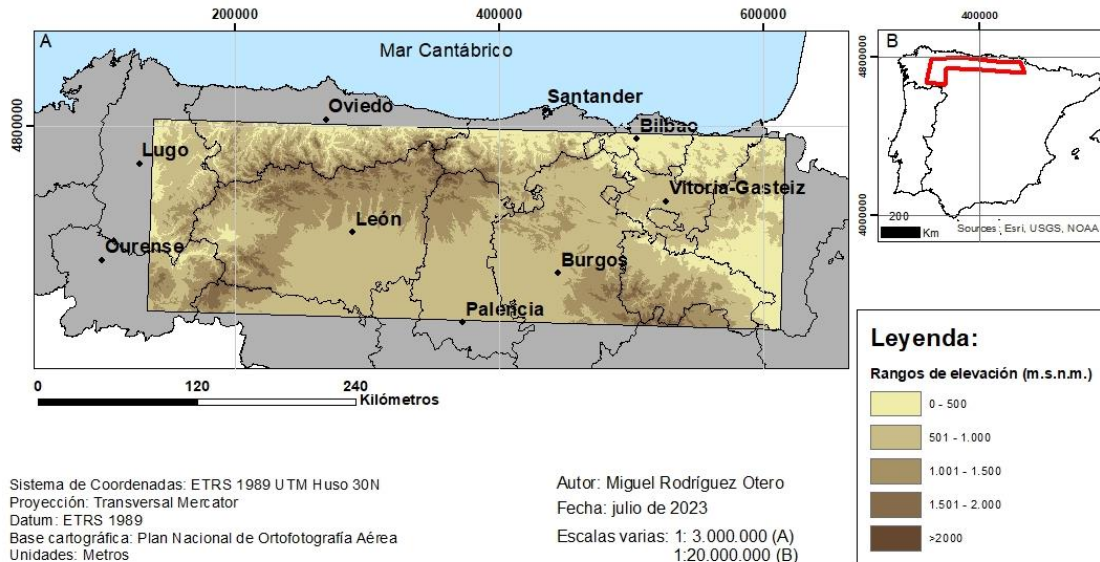


Figura 1. (A) Mapa del relieve del área de estudio. (B) Localización geográfica de la Cordillera Cantábrica dentro de la Península Ibérica. Fuente: Elaborado a partir de Esri (1999).

El presente estudio se ha desarrollado a través del análisis de la base de datos “*ERA5-Land hourly data from 1950 to present*” (Muñoz, 2019), que es un posprocesado del conjunto de datos completo de ERA5-Land. Este conjunto de datos abiertos, globales y de alta resolución ha sido creado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Plazo Medio (ECMWF). ERA5-land es un conjunto de datos que se ha producido reproduciendo el componente terrestre del reanálisis climático ECMWF ERA5. El reanálisis combina datos de modelos con observaciones globales utilizando modelos físicos. Se basa en una combinación de observaciones de satélite, estaciones meteorológicas terrestres y marítimas, así como modelos numéricos de predicción del clima con información horaria de diferentes variables desde 1950 a la actualidad con resolución espacial de 9 kilómetros (frente a los 31 km del ERA5) y resolución temporal de 1 hora. Esta base de datos utilizada proporciona una descripción detallada y precisa de las condiciones meteorológicas y climáticas en la superficie terrestre, incluyendo información sobre temperatura, precipitación, cobertura nival, viento, humedad y radiación solar, entre otros parámetros relevantes (Climate Data Store, 2023).

Este conjunto de datos es ampliamente utilizado en investigaciones científicas y estudios relacionados con el clima, la hidrología, la agricultura, la gestión de recursos naturales y otros campos que requieren información climática precisa y confiable. Su alta resolución espacial y temporal lo convierte en una herramienta muy valiosa para el análisis y la modelización de procesos climáticos y ambientales.

3 Material y métodos

Para poder realizar este estudio primeramente se realizó una breve investigación preliminar para evaluar el estado actual de los estudios disponibles en esta área, constatando una brecha en el conocimiento y resaltando la importancia y la necesidad de desarrollar un trabajo que se enfoque en el análisis de las tendencias climáticas en la Cordillera Cantábrica.

Con el fin de llevar a cabo esta investigación, se realizó una descarga de datos climáticos del servicio de descargas de datos climáticos de Copernicus en formato NetCDF-3 (Climate Data Store, 2023), obteniendo las variables climáticas a partir de la base de datos “*ERA5-Land hourly data from 1950 to present*” (Muñoz, 2019) durante el periodo temporal comprendido entre 1959 y 2022. Para llevar a cabo el análisis de las variables mencionadas, se utilizó el entorno y lenguaje de programación R (Posit, 1999). A partir del desarrollo de un código en R se pudo importar los datos de la base de datos y realizar las transformaciones necesarias, cálculos y análisis estadísticos pertinentes.

Para desarrollar el código, se implementaron librerías a R que permitieron ampliar las capacidades básicas del lenguaje (Pebesma y Bivand, 2005; Wickham, 2007; Golemund y Wickham, 2011; Pebesma, 2018; Wickham *et al.*, 2019; Nychka *et al.*, 2021; Pierce, 2021; Bivand *et al.*, 2022; Hijmans, 2022; Mcleod, 2022; Michna y Woods, 2022 y Neuwirth, 2022).

Posteriormente, se importó la base de datos previamente mencionada y se procedió a definir las diferentes variables a estudiar, que fueron: espesor instantáneo de nieve en metros, deshielo en metros de agua equivalente, temperatura del aire a 2 metros de altura del suelo en grados kelvin y precipitación total en metros. A continuación, se definieron los límites geográficos para la región de estudio con el fin de seleccionar únicamente los datos relevantes para el análisis.

En primer lugar, se realizó el promedio mensual y anual de las variables para los acumulados medios y máximos, permitiendo obtener la serie temporal en su totalidad. A

continuación, con el fin de obtener una visión más completa de la climatología de la Cordillera Cantábrica y de detectar posibles anomalías en los datos de estudio, se llevó a cabo un análisis exploratorio de las diferentes variables climáticas. De esta forma y previamente a realizar el análisis estadístico, se exploraron los valores máximos medios, generando una mayor comprensión de los datos y del área de estudio.

Para realizar el análisis de tendencias se utilizó la prueba de Mann-Kendall (o prueba MK). Es un test estadístico no paramétrico muy robusto frente a extremos y utilizado comúnmente en estudios ambientales para detectar tendencias en datos ordenados temporalmente. De esta forma se puede determinar estadísticamente si los valores de una serie aumentan o disminuyen durante un periodo de tiempo. Las ventajas de esta prueba son su baja sensibilidad a los cambios debidos a series temporales no homogéneas y a que se tienen en cuenta los valores faltantes. Sin embargo, posee una limitación cuando existe una correlación serial de los datos en el espacio y el tiempo, ya que los datos climatológicos normalmente no son independientes ni están homogéneamente distribuidos en el tiempo, por lo que aumenta la probabilidad de que la prueba detecte una tendencia cuando no la hay (Merino *et al.*, 2015). No obstante, con el fin de evitar esta problemática, la prueba realizada cuenta con un auto test que lo solventa.

Por todo ello, para analizar las tendencias del espesor y deshielo de nieve, temperaturas y precipitación, se aplicó la prueba estadística de MK que encaja con la tipología de datos y con los objetivos a conseguir. La hipótesis nula (H_0) de esta prueba significa que no se detecta un cambio en la distribución de la variable con el tiempo, la hipótesis alternativa (H_1) equivale a que si existe una tendencia. El procedimiento para la prueba implica la comparación de los datos en orden cronológico manteniendo su correspondencia con sus ubicaciones asociadas considerando la hipótesis de estabilidad. La prueba realiza el cálculo de la diferencia entre cada par de puntos de datos contando las concordancias (cuando ambas diferencias tienen el mismo signo) y discordancias (cuando tienen signos diferentes). Cada valor se compara con el valor anterior de la serie temporal, generando así un total de $n(n-1)/2$ pares de datos, siendo “n” el número de observaciones en el conjunto. Es decir, si un valor en la comparación por pares es mayor que el anterior se registra un signo más, si es menor, se registra un signo menos. La dirección de la tendencia la proporciona la diferencia entre el número total de signos más (tendencia al alza) y el número total de signos menos (tendencia a la baja). Un estadístico de prueba de cero indicaría que no hay cambios a lo largo del tiempo (aceptando la hipótesis nula).

A medida que aumenta la desviación del estadístico de prueba de cero, la probabilidad de observar una tendencia en los datos se incrementa, y el rechazo de la hipótesis nula es más probable (Jaagus, 2006; Yenilmez *et al.*, 2011).

El test proporciona:

- Factor tau. Mide el sentido de la tendencia, varía entre -1 y 1; es positivo cuando la tendencia aumenta y negativo cuando disminuye.
- Significancia. Representa el umbral por el cual se acepta la hipótesis de que no hay tendencia. La tendencia es estadísticamente significativa cuando el valor de p es inferior a 0,02, rechazándose la hipótesis nula.

Considerando R_{1j}, R_{2j}, R_{nj} el conjunto de datos que consta de las observaciones,

$$S_j = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(R_j - R_i) \right]$$

Donde

- $\text{sgn}(R_j - R_i) = 1$ para $R_j - R_i > 0$
- $\text{sgn}(R_j - R_i) = 0$ para $R_j - R_i = 0$
- $\text{sgn}(R_j - R_i) = -1$ para $R_j - R_i < 0$

S_j será positivo si R_i aumenta con i y negativo si disminuye con i .

Posteriormente a la prueba MK se implementó una función de representación gráfica de la tendencia y la significación estadística, para permitir visualizar de manera clara las tendencias y su nivel de confianza.

Por último, se completó el proceso extrayendo los datos de la serie temporal de un punto concreto de la Cordillera Cantábrica. En este caso se seleccionó un punto del sector Central que corresponde con las coordenadas de Latitud: 43.1813, Longitud: -4.8351, situado entre las provincias de León, Asturias y Cantabria, cerca de Torre Ceredo. De esta forma se podrá correlacionar si determinadas anomalías de la tendencias, se corresponden con momentos puntuales de la serie.

4 Resultados

4.1 Análisis exploratorio

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos en el análisis exploratorio.

Los espesores puntuales máximos medios alcanzan los 10 centímetros en diversos puntos de la zona oeste de la Cordillera Cantábrica, mientras que en su mitad este se muestran espesores inferiores, en torno a 5 centímetros. Destacando así, la existencia de una mayor capa nival en la mitad occidental de la Cordillera Cantábrica, en especial, sobre el norte de la provincia de León. El deshielo acumulado medido de agua equivalente sigue la misma dinámica que el espesor de nieve, mostrando valores de hasta 12 centímetros en la mitad oeste de la cordillera y valores más reducidos hacia el este.

Las temperaturas máximas medias también sufren una regionalización a lo largo del área de estudio. En su mitad oeste, las temperaturas están más suavizadas en comparación con las registradas en su mitad este.

Los acumulados de precipitación también registran valores más altos en la mitad occidental, con máximos de 1300 milímetros. En su mitad oriental estos valores máximos son cercanos a 1100 milímetros.

En la Figura 2 se exponen los resultados del análisis exploratorio.

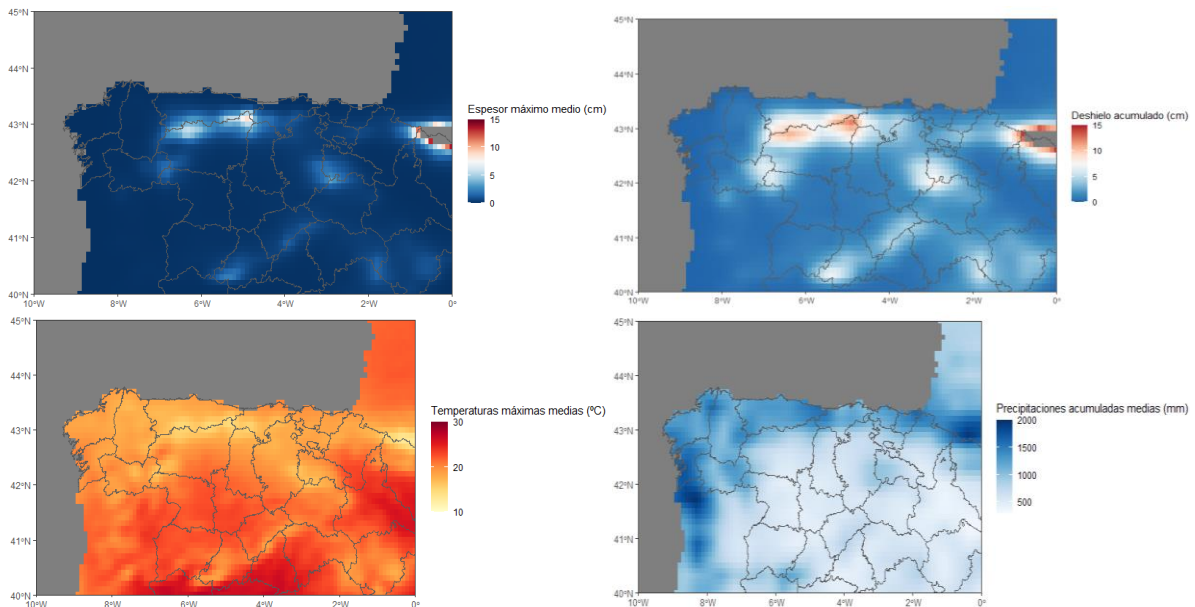


Figura 2. Mapa del espesor máximo medio en centímetros del periodo 1959-2022 (superior izquierda), mapa de deshielo máximo medio en centímetros del periodo 1959-2022 (superior derecha), mapa de temperaturas máximas medias en grados centígrados del periodo 1959-2022 (inferior izquierda) y mapa de precipitación media acumulada en milímetros del periodo 1959-2022 (inferior derecha).

4.2 Espesores de nieve

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la profundidad media y máxima de la capa de nieve a lo largo de la Cordillera Cantábrica.

En primer lugar, se examinó la tendencia del espesor medio de nieve. Los resultados revelaron que existe una variabilidad espacial en la distribución de la nieve a lo largo del área de estudio. Específicamente, se observó un ligero aumento en la cantidad depositada sobre la mitad occidental de la cordillera, mientras que se evidenció un decrecimiento en su mitad oriental. Este aumento es del orden de 10 centímetros y se sitúa sobre los Montes de León y norte de la provincia de León y Palencia.

Los análisis estadísticos demostraron que las tendencias observadas son estadísticamente significativas, indicando que estos resultados están ocurriendo de manera consistente y no son fluctuaciones puntuales.

Los resultados del espesor medio de la nieve medido en metros y su significación se muestran a través de la Figura 3.

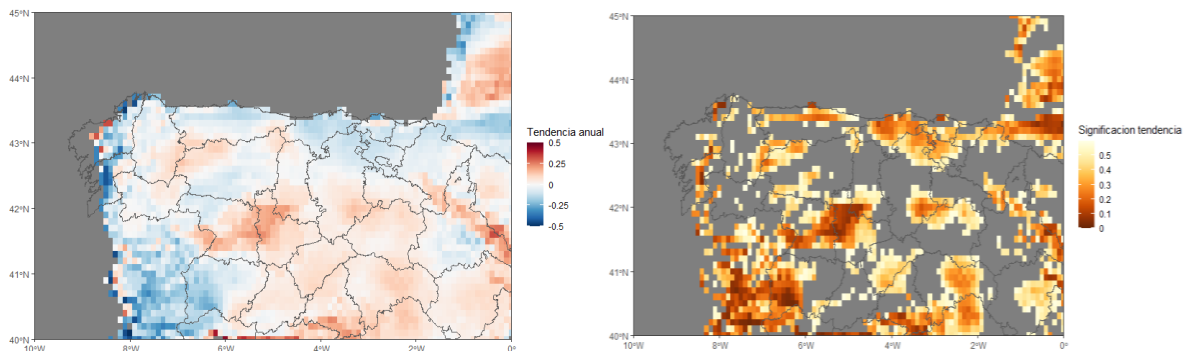


Figura 3. Mapa de la tendencia del espesor medio de nieve del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

La tendencia del espesor máximo de nieve ha mostrado una notable variación entre la mitad occidental y oriental de la Cordillera Cantábrica. En la mitad occidental, se observa que la tendencia se ha mantenido constante o ha experimentado un ligero incremento en diversos puntos de la provincia de León. Por el contrario, en la mitad oriental de la Cordillera Cantábrica, específicamente desde el sector de Liébana, se ha observado una tendencia a la baja con un marcado decrecimiento en el espesor máximo de nieve.

Además del análisis de tendencia, se llevó a cabo un análisis de significación para evaluar la relevancia estadística de los datos obtenidos en relación con el espesor máximo de nieve en el área de estudio. Sin embargo, los resultados de dicho análisis indican que los datos no presentan una significación estadística. En la Figura 4 se exponen los resultados de la tendencia y significación del espesor máximo de nieve.

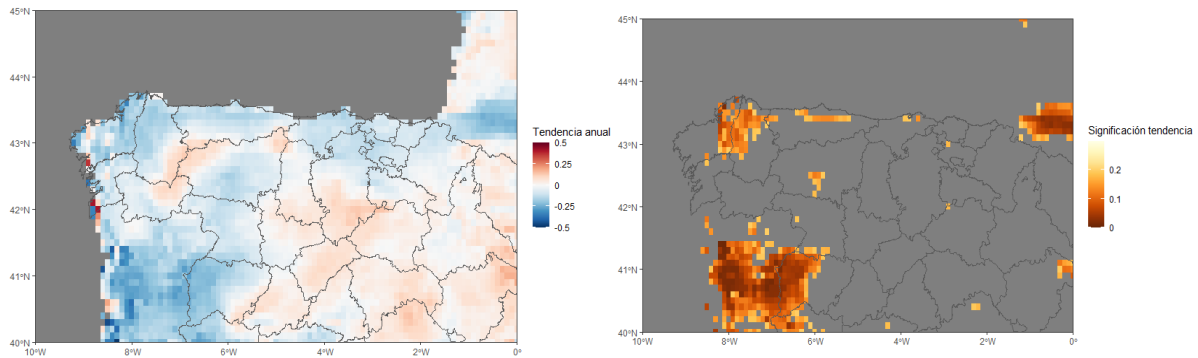


Figura 4. Mapa de la tendencia del espesor máximo de nieve del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

En la Figura 5 se presenta la serie temporal de la variable espesor puntual de nieve en centímetros para todo el periodo analizado de un punto del sector central de la Cordillera Cantábrica. Se observa una tendencia a la baja del espesor de nieve. Se observan también las diferentes fluctuaciones en la profundidad de la nieve y como periodos con baja cubierta se alternan con años con mayor cubierta de nieve.

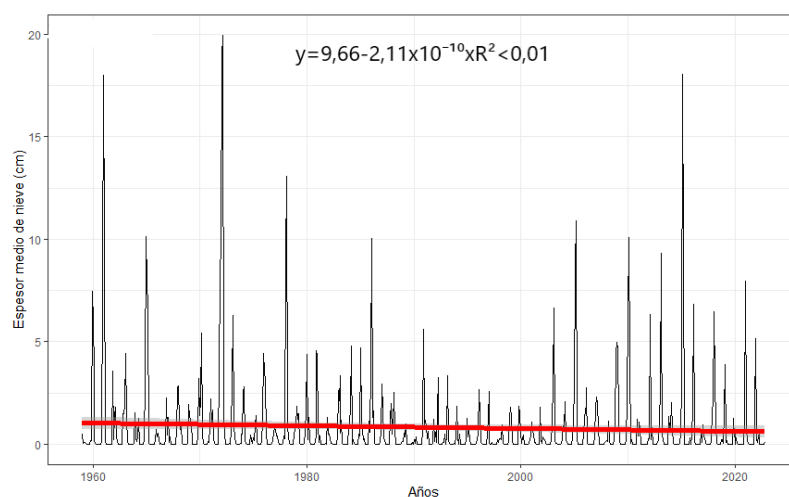


Figura 5. Serie temporal completa para la variable espesor puntual de nieve en centímetros en el punto con coordenadas 43.1813, -4.8351 durante el periodo 1959-2022.

4.3 Deshielo

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la variación del deshielo medio y máximo en metros de agua equivalente en la Cordillera Cantábrica, que como se comentó con anterioridad, esta variable hace referencia a la compacidad de la nieve y a la cantidad de agua que se libera cuando la nieve se derrite por completo.

La tendencia del deshielo medio de nieve en metros de agua equivalente en la Cordillera Cantábrica ha sufrido un ligero incremento en su mitad occidental, en especial sobre la provincia de León, con valores de en torno a 10 centímetros. Por el contrario, en la mitad oriental de la Cordillera Cantábrica, se evidencia una tendencia decreciente en el deshielo. En el análisis de significación realizado para evaluar la relevancia estadística de la tendencia obtenida en relación con el espesor medio de nieve en la Cordillera Cantábrica, se puede concluir que los datos no presentan una significación estadística. A través de la Figura 6 se muestra la tendencia del deshielo medio de nieve en la cordillera y su significación.

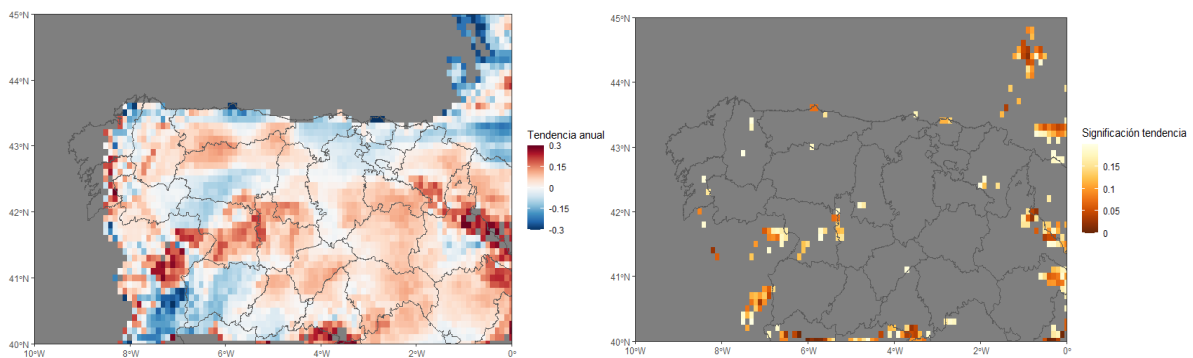


Figura 6. Mapa de la tendencia del deshielo medio de nieve del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

En cuanto a la tendencia del deshielo máximo de la nieve en la Cordillera Cantábrica, se registran dos tendencias generalizadas. En el sector más occidental de la cordillera, se observa un aumento en el derretimiento máximo, lo que implica una mayor cantidad de agua equivalente liberada debido al deshielo en este área. Por otro lado, en el sector oriental se registró un decrecimiento en esta medida. A través del análisis de significación realizado, se determinó que los datos obtenidos no presentan una significación estadística robusta. En la Figura 7 se muestra la tendencia del deshielo máximo de nieve en la cordillera y su significación.

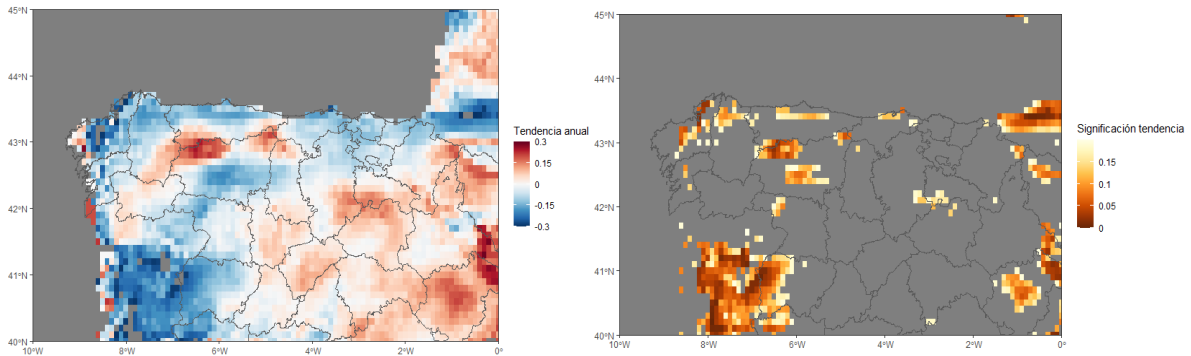


Figura 7. Mapa de la tendencia del deshielo máximo de nieve del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

Mediante la Figura 8 se presenta la serie temporal de la variable de deshielo acumulado en centímetros para todo el periodo analizado a partir de un punto del sector central de la Cordillera Cantábrica. Se visualiza una tendencia decreciente de los metros de agua equivalente de nieve. Se observan también las diferentes fluctuaciones interanuales que ya se evidenciaban en la Figura 4.

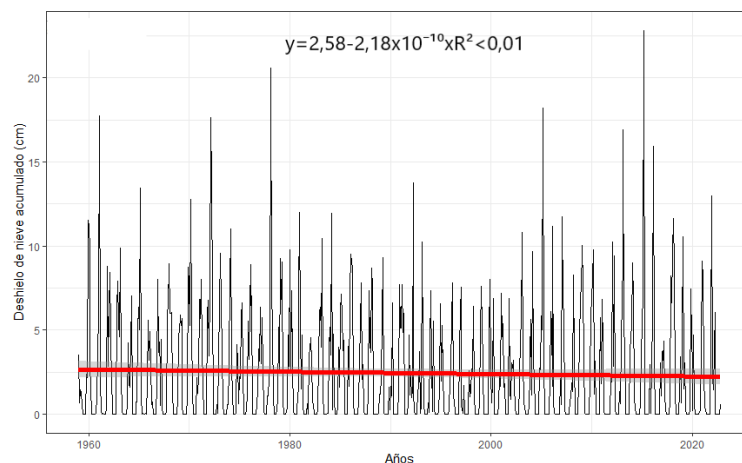


Figura 8. Serie temporal completa para la variable deshielo en centímetros de agua en el punto con coordenadas 43.1813, -4.8351 durante el periodo 1959-2022.

4.4 Temperaturas

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la variación de la temperatura media y máxima del aire a 2 metros de altura del suelo en la Cordillera Cantábrica.

Los resultados revelan una tendencia al alza generalizada en las temperaturas medias del aire en la Cordillera Cantábrica. Se observan elevaciones superiores a las cuatro décimas anuales en numerosos puntos del área de estudio. Se debe destacar también el hecho de que esa gran tendencia positiva no solo se observa en la región de estudio, sino que es compartida por

toda la Península Ibérica, acentuada en su tercio oriental con marcados incrementos anuales. La significación estadística de estos datos es muy alta, siendo inferior a 0,01 en prácticamente la totalidad de la Península, existen dos islas de significación comprendida entre 0,02 y 0,03 en el oriente asturiano y cántabro. En la Figura 9 se muestra la tendencia de la temperatura media en la cordillera y su significación.

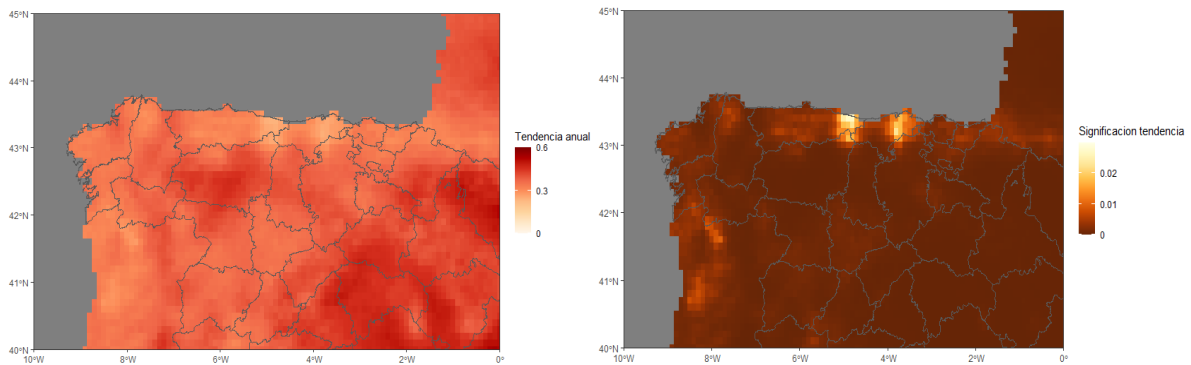


Figura 9. Mapa de la tendencia de la temperatura media del aire a dos metros de altura del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

Los resultados de la variación de la temperatura máxima del aire a dos metros de altura a lo largo de la Cordillera Cantábrica evidencian una tendencia positiva. Se registran una tendencia al alza generalizada de las temperaturas máximas, sin embargo, esta variación parece haber sido contenida a lo largo de la cara norte del sistema montañoso. Los resultados de la significación indican una fuerte significación a lo largo de toda la Península Ibérica, aunque en el área de estudio, esta no ha sido destacable. A través de la Figura 10 se representan la tendencia de la temperatura máxima en la cordillera y su significación.

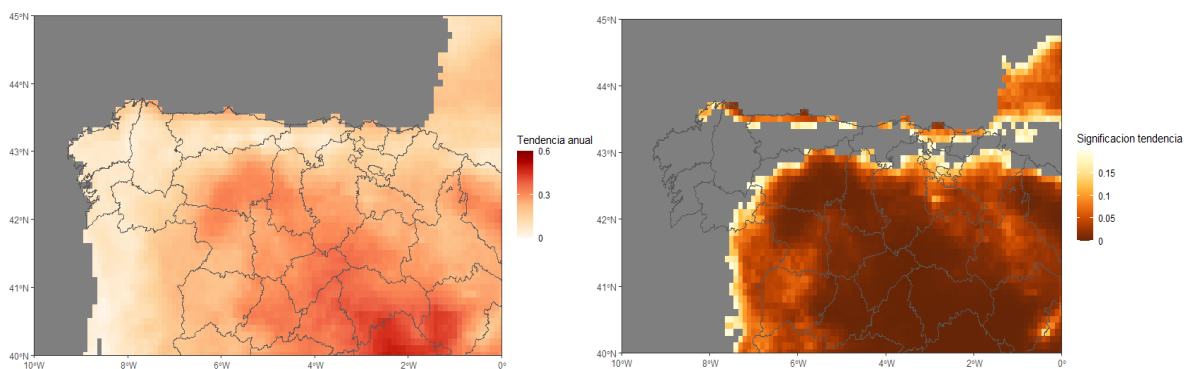


Figura 10. Mapa de la tendencia de la temperatura máxima del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

En la Figura 11 se presenta la serie temporal de la variable de temperatura del aire media a dos metros de altura para todo el periodo analizado a partir de un punto del sector central de la Cordillera Cantábrica. Se evidencia de forma notable la tendencia al alza de las temperaturas.

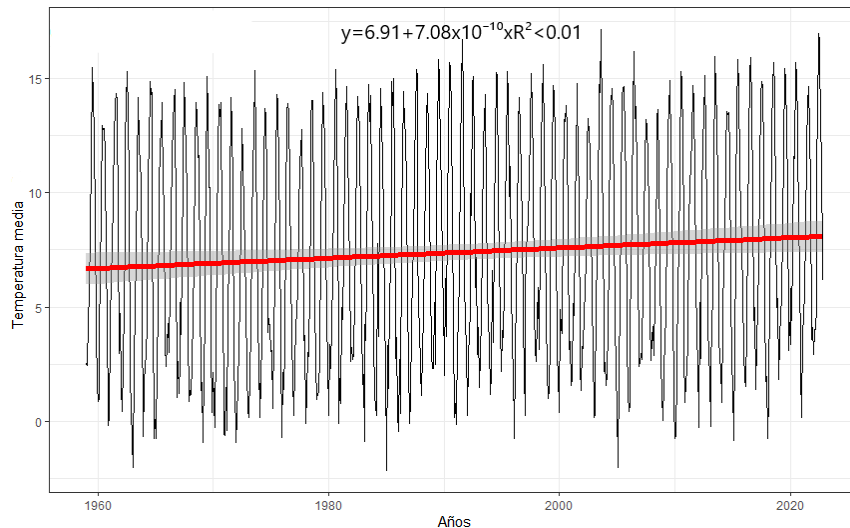


Figura 11. Serie temporal completa para la variable temperatura del aire media a dos metros de altura en el punto con coordenadas 43.1813, -4.8351 durante el periodo 1959-2022.

4.5 Precipitaciones

En esta sección, se presentan los resultados obtenidos del análisis de la variación de la precipitación total en la Cordillera Cantábrica.

Los resultados indican que el acumulado total de las precipitaciones (en cualquiera de sus formas) ha experimentado un incremento generalizado a lo largo de la cordillera, mostrando una tendencia al alza. Se observa un destacado aumento de las precipitaciones en la comarca de Liébana y Valdeón, donde existe un mayor incremento en comparación con otras áreas de la Cordillera Cantábrica. La significación de la tendencia se muestra muy robusta con valores inferiores a 0,05 en gran parte del área de estudio con tendencia positiva. En la Figura 12 se exponen los resultados de la tendencia y significación de la precipitación acumulada medida en milímetros.

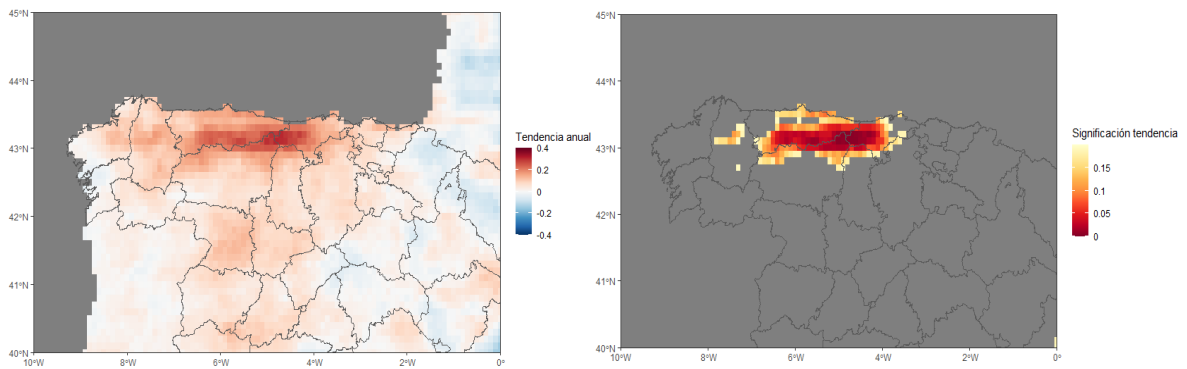


Figura 12. Mapa de la tendencia de la precipitación total del periodo 1959-2022 (izquierda) y de la significación de su tendencia (derecha).

Mediante la Figura 13 se muestra la serie temporal de la variable de precipitación total acumulada en milímetros para todo el periodo analizado a partir de un punto del sector central de la Cordillera Cantábrica. No se evidencia ningún cambio de la distribución anual de las precipitaciones.

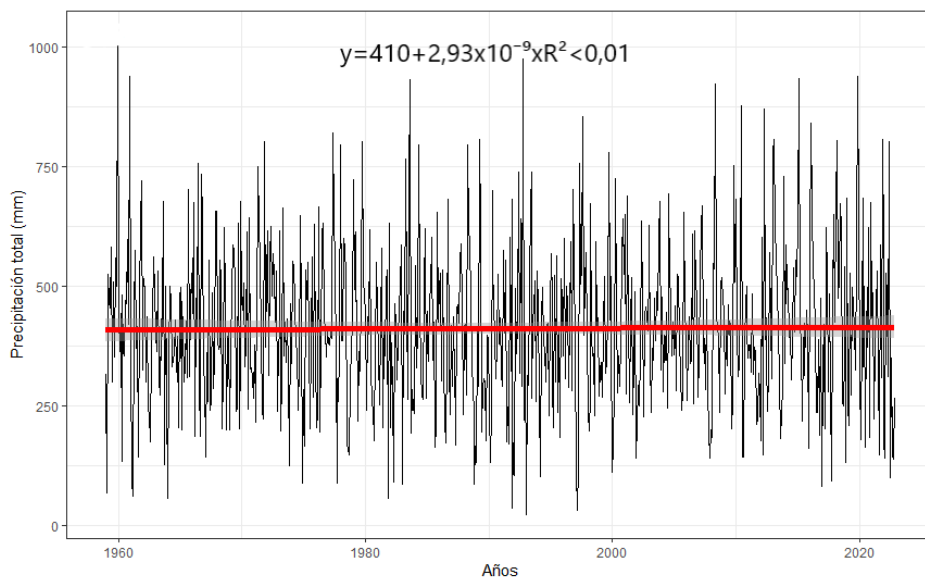


Figura 13. Serie temporal completa para la variable precipitación total acumulada en el punto con coordenadas 43.1813, -4.8351 durante el periodo 1959-2022.

5 Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos en este estudio evidencian un cambio en el clima de la Cordillera Cantábrica, un cambio que presenta diferencias regionales en la variabilidad de los diferentes parámetros climáticos.

En el caso de variables como la nieve, a partir de valores como su profundidad y agua equivalente, se han obtenido resultados inconclusos (debido a la ausencia de datos observacionales durante los primeros años) y regionalizados, destacando la relación directa existente entre deshielo y espesor de nieve. En el sector más occidental de la cordillera, que es el que presenta rasgos de clima de alta montaña, la nieve ha experimentado aumentos de hasta 10 centímetros en ubicaciones situadas sobre los Montes de León y norte de las provincias de León y Palencia. Por el contrario, el sector este de la región, manifiesta una tendencia a la baja en la profundidad de la capa de nieve a lo largo de los años, mostrando confianza en la significación de los resultados y corroborando los resultados de Pons *et al.* (2010). Esta división climática de la cordillera que ya fue expuesta por Ortega y Morales (2015); se debe a que el menor influjo de frentes, la progresiva desecación del aire y cotas menos elevadas provocan que las precipitaciones invernales se reduzcan en sentido zonal y meridiano. Por otra parte, se ha podido corroborar una distribución no homogénea de las nevadas y como existen ciclos a largo plazo que parecen estar gobernados por cambios en los forzamientos a gran escala, tal y como concluyeron Martin y Durand (1998). Los cambios en la profundidad de la nieve y su disponibilidad además de afectar sobre la protección contra las temperaturas extremas y el estrés hídrico en plantas, también tendría un importante impacto sobre el sector del turismo. Estaciones de esquí situadas a lo largo de la Cordillera Cantábrica como San Isidro, Fuentes de Invierno o Alto Campoo contribuyen a la economía local de estas zonas de montaña y un impacto sobre su calidad y cantidad de nieve tendría serias repercusiones económicas.

Las temperaturas han evidenciado una clara y fuerte tendencia positiva con una robusta significación en los datos que respalda la validez de los resultados. A lo largo de toda la Cordillera Cantábrica se han registrado notables incrementos anuales de las temperaturas, observándose también esta tendencia en la Península Ibérica en su conjunto. Estos resultados no pueden ser atribuibles a la variabilidad natural o aleatoria, y la serie temporal así lo demuestra, registrado un aumento en las temperaturas a lo largo de todo el periodo analizado desde 1960. Las temperaturas máximas parecen haberse contenido a lo largo de la cara norte de la cordillera, debido principalmente al carácter termorregulador del Mar Cantábrico. La tendencia mostrada del aumento de las temperatura, de continuarse en el tiempo, podría romper la capacidad de amortiguación y adaptación de la cordillera definida por Theurillat y Guisan (2001) y poner en jaque la supervivencia de los frágiles ecosistemas cantábricos. Esto, repercutiría muy negativamente sobre las comunidades agrícolas y ganaderas de la región, así como en las especies animales y vegetales que la habitan, muchas de ellas endémicas (Jiménez

et al., 2022). Así, por ejemplo, la supervivencia de especies amenazadas como *Tetrao urogallus cantabricus* (urogallo cantábrico) puede verse afectada por un incremento de las temperaturas primaverales al inferir sobre la disponibilidad de su alimento. Cambios en la fenología de las plantas pueden reducir la calidad de los alimentos y disponibilidad de las larvas requeridas por las crías de urogallo, como ya identificaron Moss *et al* (2008).

La última de las variables analizadas, la precipitación total, mostró una tendencia al alza en la cordillera con una alta significación desde su límite oeste hasta las Merindades (Burgos), sugiriendo un cambio en los patrones de precipitación. En el resto del sistema montañoso los resultados no fueron concluyentes. Precisamente este aumento de la precipitación total registrado en el sector oeste ha podido influir sobre la tendencia de la nieve. A pesar del aumento generalizado de las temperaturas, durante los periodos invernales se siguen registrando cotas de nieve suficientes en este sector oeste, lo cual, sumado al aparente aumento de la precipitación, puede tener influencia sobre el aumento del manto nival registrado. No obstante, este resultado del incremento de la precipitación requiere un mayor análisis en futuros estudios con el fin de analizar su régimen, distribución y días de lluvia. De la misma forma sería interesante poder examinar las tendencias de los días de nieve y si estos han visto modificada su dinámica, ya que un incremento o disminución de la precipitación (en cualquiera de sus formas) puede no tener relación directa con el número de días de lluvia. Las proyecciones climáticas muestran una tendencia a aumentar tanto el número de días sin precipitación o con precipitaciones inferiores a un milímetro (Mestre *et al.*, 2015) como los eventos intensos de precipitación (Ramos *et al.*, 2012).

El impacto de un cambio en los regímenes de precipitación y de la nieve acumulada a lo largo de las cuencas del área de estudio podría afectar muy negativamente a los servicios generados por los numerosos embalses que se nutren de la intercepción del agua de escorrentía generada en la Cordillera Cantábrica. Embalses como el del Ebro, del Porma o de Riaño son infraestructuras de producción hidroeléctrica y regulan el abastecimiento de agua a grandes ciudades y campos de cultivo.

En conclusión, las tendencias climáticas detectadas en este estudio de continuarse en el tiempo tendrían graves impactos sobre: a) la disponibilidad y gestión del agua con repercusiones sobre el sector agrícola, ganadero y energético; b) economía asociada al turismo de invierno; c) biodiversidad y paisaje.

6 Referencias

- Abegg, B. y Froesch, R. (2005) "Climate change and winter tourism. Impact on transport companies in the Swiss canton of Graubünden", en Beniston, M. (ed.) *Mountain environments in changing climates*. Londres: Taylor & Francis e-Library, pp. 264-274.
- Barry, R. G. (1992) "Mountain climatology and past and potential future climatic changes in mountain regions: a review.", *Mountain Research and Development*, 12(1), pp. 71-86. doi:10.2307/3673749.
- Beniston, M. (1997) "Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: Links to changes in large-scale climatic forcings", *Climatic Change*. Kluwer Academic Publishers, 36(3-4), pp. 281-300. doi:10.1023/A:1005310214361.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., Jones, R., Kolli, R. K., Kwon, W.-T., Laprise, R., Rueda, V., Mearns, L. O., Menéndez, C. G., Räisänen, J., Rinke, A., Sarr, A. y Whetton, P. (2007) "Climate Change 2007: The Physical Science Basis; Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change", en United Nations Environment Programme Intergovernmental Panel on Climate Change (ed.). Cambridge University Press, pp. 849-940. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/30763> (Accedido: 9 de mayo de 2023).
- Climate Data Store (2023) *ERA5-Land hourly data from 1950 to present*. Disponible en: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-land?tab=overview> (Accedido: 27 de febrero de 2023).
- Diaz, H. F., Grosjean, M. y Graumlich, L. (2003) "Climate variability and change in high elevation regions: Past, present and future", *Climatic Change*, 59(1-2), pp. 1-4. doi:10.1023/A:1024416227887/METRICS.
- Giorgi, F. y Mearns, L. O. (1991) "Approaches to the simulation of regional climate change: A review", *Reviews of Geophysics*, 29(2), pp. 191-216. doi:10.1029/90RG02636.
- Grolemund, G. y Wickham, H. (2011) "Dates and Times Made Easy with lubridate", *Journal of Statistical Software*, 40(3), pp. 1-25. Disponible en: <https://www.jstatsoft.org/v40/i03/> (Accedido: 20 de septiembre de 2022).
- Haerberli, W. y Beniston, M. (1998) "Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps", *AMBIO: A Journal of the Human Environment*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/279895071_Climate_Change_and_its_Impacts_on_Glaciers_and_Permafrost_in_the_Alps (Accedido: 3 de marzo de 2023).
- Jaagus, J. (2006) "Climatic changes in Estonia during the second half of the 20th century in relationship with changes in large-scale atmospheric circulation", *Theoretical and Applied Climatology*, 83(1-4), pp. 77-88. doi:10.1007/S00704-005-0161-0/METRICS.
- Jiménez, J., Godinho, R., Lopes, S., Castro, D., Cubero, D., Osorio, M. Á., Piqué, J., Moreno-Opo, R., Quiros, P., González-Nuevo, D., Hernandez-Palacios, O. y Kéry, M. (2022) "The Cantabrian capercaillie: A population on the edge", *Science of The Total Environment*, 881(153523). doi:10.1016/j.scitotenv.2022.153523.
- Lehner, B., Czisch, G. y Vassolo, S. (2005) "The impact of global change on the hydropower potential of Europe: a model-based analysis", *Energy Policy*. Elsevier, 33(7), pp. 839-855. doi:10.1016/J.ENPOL.2003.10.018.
- López-Moreno, J. I. (2005) "Recent Variations of Snowpack Depth in the Central Spanish Pyrenees", *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37(2), pp. 253-260. doi:10.1657/1523-0430(2005)037[0253:RVOSDI]2.0.CO;2.
- López-Moreno, J. I. y García-Ruiz, J. M. (2004) "Influence of snow accumulation and snowmelt on streamflow in the central Spanish Pyrenees / Influence de l'accumulation et de la fonte de la neige sur les écoulements dans les Pyrénées centrales espagnoles", *Hydrological Sciences Journal*, 49(5). doi:10.1623/HYSJ.49.5.787.55135.
- Martin, E. y Durand, Y. (1998) "Precipitation and snow cover variability in the french alps", *The Impacts of Climate Variability on Forests*, pp. 81-92. doi:10.1007/BFB0009766.
- Martin, E., Timbal, B. y Brun, E. (1996) "Downscaling of general circulation model outputs: Simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change", *Climate Dynamics*. Springer Verlag, 13(1), pp. 45-56. doi:10.1007/S003820050152/METRICS.

- Merino, A., López, L., Hermida, L., Sánchez, J. L., García-Ortega, E., Gascón, E. y Fernández-González, S. (2015) "Identification of drought phases in a 110-year record from Western Mediterranean basin: Trends, anomalies and periodicity analysis for Iberian Peninsula", *Global and Planetary Change*, 133, pp. 96-108. doi:10.1016/J.GLOPLACHA.2015.08.007.
- Mestre, I., Casado, M. J. y Rodríguez, E. (2015) "Tendencias observadas y proyecciones de cambio climático sobre España", *Los bosques y la biodiversidad frente al cambio climático: impactos, vulnerabilidad y adaptación en España*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, pp. 87-98.
- Moreno, A., Garcés, B. V., Verfaillie, D., Galop, D., Rodriguez, E., Tejado, E., Barreiro-Lostres, F., Soubeyroux, J.-M., Cunillera, J., Cuadrat, J. M., Ruiz, J.-M. G., Moreno, J. I. L., Trapero, L., Pons, M., Prohom, M., Saz, M. A., González-Sampériz, P., Ramos, P., Amblar, P., Copons, R., Serrano-Notivoli, R., Gascoin, S. y Luna, Y. (2018) "Clima y variabilidad climática en los Pirineos", pp. 6-17. Disponible en: <https://hal.science/hal-03185743> (Accedido: 7 de marzo de 2023).
- Moss, R., Oswald, J. y Baines, D. (2008) "Climate change and breeding success: decline of the capercaillie in Scotland", *Journal of Animal Ecology*, 70(1), pp. 47-61. doi:10.1111/j.1365-2656.2001.00473.x
- Muñoz, J. (2019) "ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present", *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*. doi:10.24381/cds.68d2bb30.
- Nogués-Bravo, D., Araújo, M. B., Errea, M. P. y Martínez-Rica, J. P. (2007) "Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century", *Global Environmental Change*. Pergamon, 17(3-4), pp. 420-428. doi:10.1016/J.GLOENVCHA.2006.11.007.
- Ortega, M. T. y Morales, C. G. (2015) "El clima de la Cordillera Cantábrica castellano-leonesa: diversidad, contrastes y cambios", *Investigaciones Geográficas*. Universidad de Alicante Servicio de Publicaciones, (63), p. 45. doi:10.14198/INGEO2015.63.04.
- Pebesma, E. J. (2018) "Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data", *The R Journal*, 10(1), pp. 439-446. doi:10.32614/RJ-2018-009.
- Pebesma, E. J. y Bivand, R. S. (2005) "Classes and methods for spatial data", en Bivand, R., Pebesma, E., y Gomez-Rubio, V. (eds.) *Applied spatial data analysis with R*. 2.^a ed. Nueva York: Springer. Disponible en: <https://cran.r-project.org/doc/Rnews/> (Accedido: 20 de septiembre de 2022).
- Peters, R. L. y Darling, J. D. S. (1985) "The greenhouse effect and nature reserves. Global warming would diminish biological diversity by causing extinctions among reserve species", *BioScience*. Oxford Academic, 35(11), pp. 707-717. doi:10.2307/1310052/2/35-11-707.PDF.GIF.
- Pisabarro, A., Pellitero, R., Serrano, E. y Lopez-Moreno, J. I. (2019) "Impacts of land abandonment and climate variability on runoff generation and sediment transport in the Pisuerga headwaters (Cantabrian Mountains, Spain)", *Geografiska Annaler, Series A: Physical Geography*, 101(3), pp. 211-224. doi:10.1080/04353676.2019.1591042.
- Pons, M. R., San-Martín, D., Herrera, S. y Gutiérrez, J. M. (2010) "Snow trends in Northern Spain: Analysis and simulation with statistical downscaling methods", *International Journal of Climatology*, 30(12), pp. 1795-1806. doi:10.1002/JOC.2016.
- Ramos, P., Petisco, E., Martin, J. M. y Rodríguez, E. (2012) "Downscaled climate change projections over Spain: application to water resources", *International Journal of Water Resources Development*, 29(2), pp. 201-218. doi:10.1080/07900627.2012.721700.
- Rodríguez-Rodríguez, L., Jim Enez-S Anchez, M., Domínguez-Cuesta, M. J. y Aranburu, A. (2014) "Research history on glacial geomorphology and geochronology of the Cantabrian Mountains, north Iberia (43-42° N/7-2° W)", *Quaternary International*, 364, pp. 6-21. doi:10.1016/j.quaint.2014.06.007.
- Theurillat, J. P. y Guisan, A. (2001) "Potential impact of climate change on vegetation in the European alps: A review", *Climatic Change*, 50(1-2), pp. 77-109. doi:10.1023/A:1010632015572.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T. y Prentice, I. C. (2005) "Climate change threats to plant diversity in Europe", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 102(23), pp. 8245-8250. doi:10.1073/PNAS.0409902102.
- Wickham, H. (2007) "Reshaping Data with the reshape Package", *Journal of Statistical Software*, 21(12), pp. 1-20. Disponible en: <http://www.jstatsoft.org/v21/i12/>. (Accedido: 20 de septiembre de 2022).

Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L. D., François, R., Golemund, G., Hayes, A., Henry, L., Hester, J., Kuhn, M., Pedersen, T. L., Miller, E., Bache, S. M., Müller, K., Ooms, J., Robinson, D., Seidel, D. P., Spinu, V., Takahashi, K., Vaughan, D., Wilke, C., Woo, K. y Yutani, H. (2019) "Welcome to the tidyverse", *Open Source Software*, 4(43). doi:10.21105/joss.01686.

Yenilmez, F., Keskin, F. y Aksoy, A. (2011) "Water quality trend analysis in Eymir Lake, Ankara", *Physics and Chemistry of the Earth*, 36(5-6), pp. 135-140. doi:10.1016/J.PCE.2010.05.005.