



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

GRADO EN GEOGRAFÍA Y ORDENACIÓN DEL TERRITORIO



TRABAJO FIN DE GRADO

Directores: Domingo Rasilla Álvarez y Francisco Conde Oria

Curso: 2021 -2022

# **INNIVACIÓN Y GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN LA CUENCA ALTA DEL ESLA**

## **SNOW COVER AND WATER RESOURCES MANAGEMENT IN THE UPPER ESLA BASIN**

**Martín Villadangos Redondo**

**Julio de 2022**

## ÍNDICE

<b>RESUMEN</b> .....	<b>2</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>2</b>
<b>1) INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
<b>2) FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA</b> .....	<b>7</b>
2.1. FUENTES.....	7
2.2. METODOLOGÍA.....	8
<b>3) MARCO DE ESTUDIO</b> .....	<b>11</b>
3.1. EL MEDIO FÍSICO.....	11
3.1.1. Relieve .....	11
3.1.2. Clima .....	13
3.1.3. Hidrología.....	14
3.1.4. Vegetación y usos del suelo .....	16
3.2. EL MEDIO HUMANO .....	17
3.2.1. Población .....	17
3.2.2. Actividades Económicas.....	18
<b>4) RESULTADOS</b> .....	<b>19</b>
4.1. LA NIEVE EN LA CUENCA ALTA DEL ESLA: VARIABILIDAD ESPACIAL. ....	19
4.2. VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA NIEVE Y DINÁMICA ATMOSFÉRICA	26
4.3. EL PAPEL DE LA NIEVE EN LA GESTIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL ESLA.....	31
<b>5) CONCLUSIONES</b> .....	<b>38</b>
<b>6) BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES</b> .....	<b>40</b>
6.1. FUENTES.....	40
6.2. BIBLIOGRAFÍAS.....	41
<b>7) ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS</b> .....	<b>45</b>
<b>8) ANEXOS</b> .....	<b>47</b>

## **RESUMEN**

En este trabajo se analiza la importancia de la nieve en la gestión de los recursos hídricos en la cabecera del río Esla. A partir de fuentes documentales, estadísticas y cartográficas se ha procedido a un análisis espacial y temporal combinando un Sistema de Información Geográfica (SIG) y diversos procedimientos estadísticos. La nieve es un fenómeno habitual en la cuenca alta del Esla, fundamentalmente en invierno. Su variabilidad espacial está controlada principalmente por la altitud, aunque otras variables, como la orientación y la forma de la topografía también influyen en diferentes momentos del año. La evolución interanual de la capa de nieve está sujeta a variaciones importantes entre unos años y otros, en función de la dinámica atmosférica. La nieve tiene un importante papel en el volumen y la variabilidad de los recursos hídricos disponibles en la cuenca del Esla, así como en su gestión a lo largo del año.

**Palabras clave:** nieve, Sistema de Información Geográfica, variabilidad climática, recursos hídricos.

## **ABSTRACT**

This paper analyzes the importance of snow cover in the management of water resources at the head of the Esla River Basin. Based on documentary, statistical and cartographic sources, a spatial and temporal analysis has been carried out combining a Geographic Information System (GIS) and various statistical procedures. Snow is a common phenomenon in the upper Esla basin, mainly in winter. Its spatial variability is controlled by altitude, although other variables, such as orientation and local shape of the topography also influences at different times of the year. The interannual variability of the snow cover is subject to significant variations between some years and others, depending on atmospheric dynamics. Snow plays an important role in the volume and variability of water resources available in the upper River Esla basin, as well as in their management throughout the year.

**Keywords:** snow, Geographic Information System, climate variability, water resources.

## **1) INTRODUCCIÓN**

La nieve es un tipo de precipitación sólida que aparece cuando las temperaturas están próximas a los de 0°C, acumulándose cuando la temperatura del aire es lo suficientemente baja para evitar su fusión y formando una capa continua que puede ocupar grandes extensiones sobre la superficie terrestre. La cubierta nival es una parte importante del Sistema Climático, convirtiéndose en el componente individual más grande de la Criosfera: con marcadas variaciones estacionales, cubre en los momentos de máxima extensión un promedio de aproximadamente 46 millones de km<sup>2</sup>. A escala planetaria, la nieve regula el intercambio de calor entre la superficie de la Tierra y la atmósfera, o el balance de energía de la Tierra, y afecta los patrones climáticos regionales. Por ejemplo, el enfriamiento asociado a una persistente capa de nieve y a suelos húmedos en primavera puede alterar el inicio de la temporada de monzones de verano e influir en su duración (Abram, 2019). Por otro lado, los cambios en la frecuencia de las precipitaciones de nieve y su propio espesor son un indicador de la variabilidad del clima a escala regional, ya que están directamente relacionados con la temperatura y la precipitación de los meses anteriores (Carvick y Brewer, 2004).

La nieve no sólo es interesante desde el punto de vista climático. En términos geomorfológicos, influye en diferentes procesos, como por ejemplo la crioclastia y la solifluxión. Tanto en latitudes elevadas como en las zonas de montaña aparece un medio periglacial caracterizado por una alternancia entre congelación y descongelación, que genera morfologías con selección del material caracterizadas por tener círculos clasificados por piedras. En este medio también pueden aparecer otros procesos geomorfológicos ligados a la nieve, como aludes o avalanchas, cuando el manto de nieve se desestabiliza. Igualmente, desde el punto de vista biogeográfico, la nieve altera la cadena trófica, al condicionar la instalación de determinadas plantas e impedir la alimentación de numerosos animales y plantas, pero al mismo tiempo, protege las plantas de las heladas más fuertes.

En latitudes medias las variaciones en la capa de nieve controlan la dinámica ecológica y la hidrología de las zonas de montaña (Jonas *et al.*, 2008a, 2008b). Su variabilidad también puede afectar a numerosas actividades económicas, incluido el turismo de invierno, la generación de energía hidroeléctrica y el suministro de agua (Beniston, 2003; Lasanta *et al.*, 2007). Este es el caso del Pirineo, donde controla la mayor o menor capacidad de los embalses que abastecen la demanda de agua de los cultivos del valle del Ebro (López-Moreno y García-Ruiz, 2004; López-Moreno *et al.*, 2008a). Su ausencia afecta a los ingresos de las estaciones de esquí y al turismo, con efectos potencialmente negativos en las economías locales (Scott y McBoyle, 2007; Gonseth, 2013). Pero igualmente, el mantenimiento adecuado de las carreteras y los servicios de comunicación también es costoso en aquellas zonas pobladas donde la nieve no es frecuente, al no estar preparadas para eventos de esta naturaleza. De hecho, las nevadas en áreas habitadas aumentan el número de accidentes de tránsito y peatones lesionados (Vajda *et al.*, 2012).

Dada su relevancia para diferentes procesos naturales y actividades humanas, el estudio de la nieve ha adquirido una gran importancia en las últimas décadas a través de diferentes procedimientos. El método más clásico se fundamenta en la utilización de las mediciones de nieve realizadas en estaciones meteorológicas, pero habitualmente su localización (mayoritariamente en el fondo de los valles) no es óptima para el seguimiento de la variación espacial de la cubierta de nieve, particularmente en contextos topográficos y climáticos complejos. En los últimos años esta red convencional ha sido completada con la instalación de una red de telenivómetros, que, de forma automática y remota, registran la temperatura, la precipitación y la altura de la nieve. Dentro del programa ERHIN (ERHIN, 2022), llevado a cabo en España desde mediados de los años 80, las observaciones meteorológicas tradicionales se complementaron con la instalación de pértigas para medir el espesor de la nieve, que eran visitadas durante dos o tres ocasiones a lo largo de la temporada invernal.

A estas fuentes de información convencionales se ha unido la proporcionada por herramientas de teledetección. Utilizados ya desde principios de la década de 1980, los sensores que operan en la región visible e infrarroja del espectro, así como los microondas pasivos, se han revelado muy efectivos para cartografiar la capa de nieve (Bowley *et al.*, 1981; Dozier y Marks, 1987;

Baumgartner *et al.* 1987). En el primer caso cabe destacar la información proporcionada por los sensores AVHRR (satélite LANDSAT) y MODIS (satélites AQUA y TERRA). Los sensores a bordo del satélite LANDSAT tienen una gran resolución espacial (unos 30 m), permitiendo tener un análisis detallado de la capa de nieve, pero su baja resolución temporal (16 días) limita su capacidad para monitorizar la evolución en el tiempo de la cubierta nival (Rango, 1993; Gómez-Landesa and Rango, 2002).

Por el contrario, el sensor MODIS, a bordo de las plataformas TERRA, lanzada en 1999, y AQUA, lanzado en 2002, proporciona diversos productos de cobertura de nieve disponibles a nivel mundial, con una resolución espacial (500 m) y temporal (dos veces al día) óptimas para evaluar la variabilidad en el espacio y en el tiempo de la nieve. Estos productos se generaron utilizando el algoritmo SNOMAP, que se basa principalmente en el índice NDSI, que mide la diferencia de la reflectancia dividido entre la suma del rango visible del espectro y el infrarrojo de onda corta (EOS,2022). Estos productos se han validado con otros similares obtenidos de fuentes con una resolución similar o superior, al igual que con mediciones de nieve en el suelo (Hall y Riggs, 2007; Parajka *et al.*, 2012).

Los últimos informes del IPCC (2021) señalan que se han registrado aumentos de las temperaturas invernales y disminución de las nevadas en muchas montañas del mundo, y según diferentes proyecciones climáticas, esas tendencias deberían persistir e incluso acelerarse en el futuro. Bajo este escenario, la mayor parte de la precipitación seguirá cayendo en forma de nieve en las cadenas montañosas más altas (Knowles *et al.* 2006, Serquet *et al.* 2013), pero en montañas de menor altitud, el aumento de las temperaturas y una proporción cada vez mayor de la precipitación invernal en forma de lluvia crearán una capa de nieve más delgada e intermitente (López-Moreno *et al.*, 2008b; López-Moreno *et al.*, 2009). De acuerdo con estas previsiones, la Cordillera Cantábrica podría verse seriamente afectada por esta disminución general de la cubierta nival, lo cual tendrá serias implicaciones en la gestión de los recursos hídricos de las regiones vecinas, ya que es una de las principales reservas de agua de la Península Ibérica, alimentando tanto a ríos de la Meseta N (Cuenca del Duero) como del valle del Ebro (cuenca del Ebro), en los que la fusión de la nieve contribuye en gran medida a modular el caudal de los

ríos y sus régimen hidrológico. El agua de los ríos que nacen en la vertiente S de la Cordillera Cantábrica es aprovechada para el consumo humano y el mantenimiento de diversas actividades económicas, como la generación de energía hidroeléctrica y la agricultura, soportando un total de once presas (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2011) (véase Tabla 1.1). Además, la nieve es importante para el sector turístico, dado que las estaciones de esquí son una fuente de ingresos y de empleo local y cuya expansión, caso de la estación del puerto de San Glorio, ha generado numerosas polémicas (Allende, Frochoso, González y López, 2005).

EMBALSES	PROVINCIA	1	2	3	4	5	6	7	8
Aguilar	Palencia								
Barrios de Luna	León								
Camporredondo	Palencia								
Cervera	Palencia								
Compuerto	Palencia								
Porma	León								
Requejada	Palencia								
Riaño	León								
Villameca	León								

Clave: 1 Abastecimiento, 2 Riego, 3 Hidroeléctrico, 4 Regulación, 5 Recreio, 6 Defensa frente avenidas, 7 Laminación de avenidas, 8 Caudal Ecológico

**Tabla 1.1:** Embalses ubicados en la Cordillera Cantábrica, pertenecientes a la Cuenca Hidrográfica del Duero. **Fuente:** CH Duero, 2022.

Dada la trascendencia de la nieve como indicador ambiental pero también recurso económico relevante, el objetivo principal de este trabajo es analizar la variabilidad espacial y temporal de la nieve en la cabecera del río Esla, y su papel en el volumen y gestión de los recursos hídricos del embalse de Riaño.

## **2) FUENTES DE INFORMACIÓN Y METODOLOGÍA**

### **2.1. FUENTES**

En este trabajo se ha utilizado el Modelo Digital del Terreno SRTM v4, también conocido por Misión Topográfica Shuttle Radar. Este MDT ha sido desarrollado por la NASA y otros organismos de EE. UU., y ofrece una cobertura global con diferentes resoluciones, siendo la utilizada en este trabajo la de 90 m. Los datos han sido extraídos gracias a la aplicación SRTM 90m DEM Digital Elevation Database (CGIAR –CSI, 2022). Igualmente, los límites de la cuenca alta del Esla se obtuvieron a partir de la descarga de ficheros shapefile correspondientes a las cuencas y subcuencas hidrográficas de España, obtenidas de la página web del Ministerio de Transición Ecológica y Reto Demográfico (Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, 2018).

Los datos correspondientes al embalse de Riaño (código 2032) fueron descargados de la página web del Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX, 2019). Estos datos consisten en los valores medios mensuales, entre el año 2000 y el año 2019, del volumen de agua embalsada, y salidas y entradas de agua, en hm<sup>3</sup>.

Respecto a los datos meteorológicos, se han utilizado tres tipos de fuentes de información:

- Por un lado, la obtenida de la red de estaciones de la Agencia Española de Meteorología. Los datos consisten en los valores mensuales de temperatura (promedio), precipitación total acumulada y número de días de nieve de cada observatorio.
- En segundo lugar, el análisis de la cubierta nival se llevó a cabo a partir del producto MOD10A1F, descargado de la página web del National Snow and Ice Data Center (NSDIC, 2022). Este producto proporciona diariamente el % de la superficie ocupada por la nieve según píxeles de 500 x 500 m. Este producto viene a resolver los problemas de ausencia de información derivados de la nubosidad, ya que los píxeles originales con lagunas son rellenados a partir de un algoritmo que interpola los datos procedentes de días previos y posteriores sin nubosidad (Hall, 2020).

- Finalmente, los mapas de anomalías de la circulación atmosférica correspondientes a periodos seleccionados fueron obtenidos a partir de la herramienta Monthly/Seasonal Climate Composites, que se puede consultar en la página web del NOAA/ESRL Physical Sciences Laboratory (NOAA, 2022).

## **2.2. METODOLOGÍA**

Para la obtención de los resultados de este TFG se efectuaron los siguientes procedimientos:

- Elaboración de una única serie de valores mensuales para toda la cuenca, con la precipitación total acumulada y el número de días de nieve. Estos valores se obtuvieron promediando para cada mes el valor correspondiente de todos los observatorios disponibles en la zona de estudio. Para el caso de la temperatura no fue necesario este procedimiento, ya que sólo se dispone de una única estación termo-pluviométrica.
- Cálculo, a partir del Modelo Digital del Terreno, de una serie de parámetros topográficos derivados:
  - Pendiente: en grados con respecto a la horizontal.
  - Orientación con respecto al N y al E, calculada a partir de las siguientes fórmulas
    - Norte:  $\cos(\text{orientación}) * \pi / 180$
    - Este:  $\sin(\text{orientación}) * \pi / 180$
  - TPI (Índice de Posición Topográfica): compara la elevación de cada píxel con sus vecinos circundantes.
  - TRI (Índice de rugosidad del terreno) expresa la diferencia de elevación entre una celda central y las ocho celdas que la rodean.
- Extracción de los valores de recubrimiento nival correspondientes a la cuenca alta del Esla. A partir de los datos en bruto, consistentes en valores diarios del % de superficie recubierta por nieve en cada píxel, se elaboró:

- El valor promedio del % de la superficie ocupada por nieve y el número de días en la que la nieve ocupó, según las dos categorías citadas anteriormente, cada píxel de la región de estudio. Con esta información se procedió posteriormente a:
  - Elaborar una cartografía básica para mostrar la distribución espacial de la superficie ocupada por la nieve en el ámbito de estudio
  - Identificar los factores topográficos capaces de explicar esa distribución espacial de la nieve, relacionando la persistencia de la nieve con los parámetros topográficos anteriormente citados, mediante el uso del coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente oscila entre 1 y  $-1$ , donde 1 es una relación directa y  $-1$  es una relación inversa. De esta manera, el coeficiente de correlación es capaz de analizar la intensidad y el sentido de la variación de dos variables diferentes. La significación de ese coeficiente se realizó mediante el test t o de Student con un nivel de significación estándar del 95%.
- Dos series, una con los valores medios de la superficie de la cuenca ocupada por la nieve (% sobre el total posible) a lo largo del periodo 2001-2018, y otra con el número de píxeles con recubrimiento nival según dos categorías: 0-50% de cobertura nival y el 50-100% de cobertura nival. Esta última categoría equivale a la variable “suelo cubierto por nieve” disponible en los datos suministrados por AeMet (no utilizada).
- El análisis de compuestos (“composite analysis”) es un procedimiento de análisis para resaltar algunas de las características básicas de un fenómeno atmosférico que se repite en el tiempo. Consiste en recopilar un número de casos de ese fenómeno y estratificarlos según una determinada condición, analizando posteriormente tanto la circulación atmosférica que lo ha generado como a las consecuencias de ese fenómeno sobre otra variable. En este caso, las series anuales de aportaciones al embalse de Riaño y recubrimiento de la nieve fueron los fenómenos cuya causa atmosférica se desea conocer y cuyo efecto sobre otras variables (reservas, salidas de agua del embalse) se desea

conocer, siendo estratificados en terciles. Para ello se ordenó cada serie de menor a mayor y se dividieron en 3 partes; el grupo de años con valores más bajos corresponde al primer tercil, el grupo de años con valores intermedios corresponde al segundo tercil. Dado que se trabajó con 8 años, el tercil 1 (T1) sería el valor de la variable situado en el límite de los 6 primeros casos, el tercil 2 (T2) el valor de la variable situado en el límite entre los 6 y los 12 casos y finalmente el tercil 3 (T3) sería el valor de la variable situado en el límite entre los 12 y los 18 casos. Una vez divididos los años en categorías, se calcularon los promedios correspondientes a cada una de esas categorías de las variables respuesta.

En el texto, cuando se menciona series anuales, se hace referencia a series calculadas considerando años hidrológicos, es decir, aquellos iniciados en octubre y finalizados el siguiente septiembre, correspondiendo el valor del año al del mes de enero. Por otro lado, se definieron dos periodos temporales diferentes para el análisis de la cubierta nival: un periodo de acumulación de nieve, que abarcaría desde el mes de diciembre hasta febrero, y un periodo de fusión de la nieve, que abarcaría desde marzo a mayo.

### 3) MARCO DE ESTUDIO

El área de estudio comprende la cabecera del río Esla, ubicada en el extremo nororiental de la provincia de León, es decir, correspondiente a la Comunidad Autónoma de Castilla y León. La superficie de este sector es aproximadamente 574,2 km<sup>2</sup>, y coincide en gran medida con el Parque Regional de la Montaña de Riaño y Mampodre, uno de los espacios protegidos de Castilla y León, y con la comarca agraria de la Montaña de Riaño. Desde el punto de vista administrativo, ocupa un total de cinco municipios: Acebedo, Boca de Huérgano, Burón, Maraña y Riaño (véase Figura 3.1).



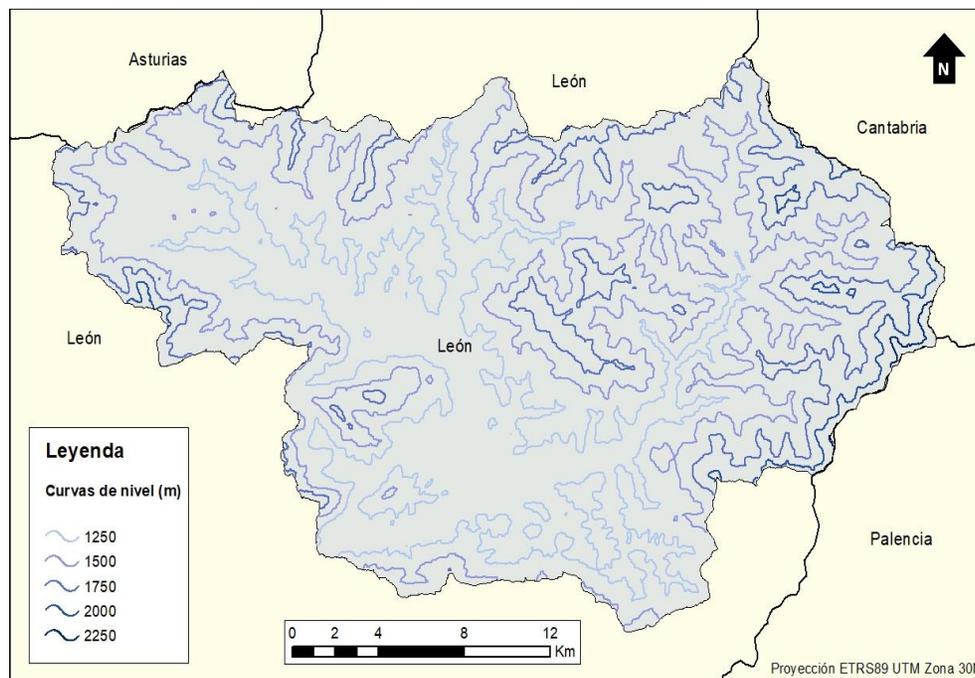
**Figura 3.1:** Encuadre territorial del área de la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de Inspire.

### 3.1. EL MEDIO FÍSICO

#### 3.1.1. Relieve

El área de estudio se sitúa en pleno corazón de la Cordillera Cantábrica, abarcando desde la divisoria de aguas (Puertos de San Glorio, Panderrueda, Pandetrave, Pontón y Tarna) hasta la cola del Embalse de Riaño, cerca de la localidad de Crémenes. Las altitudes oscilan entre los

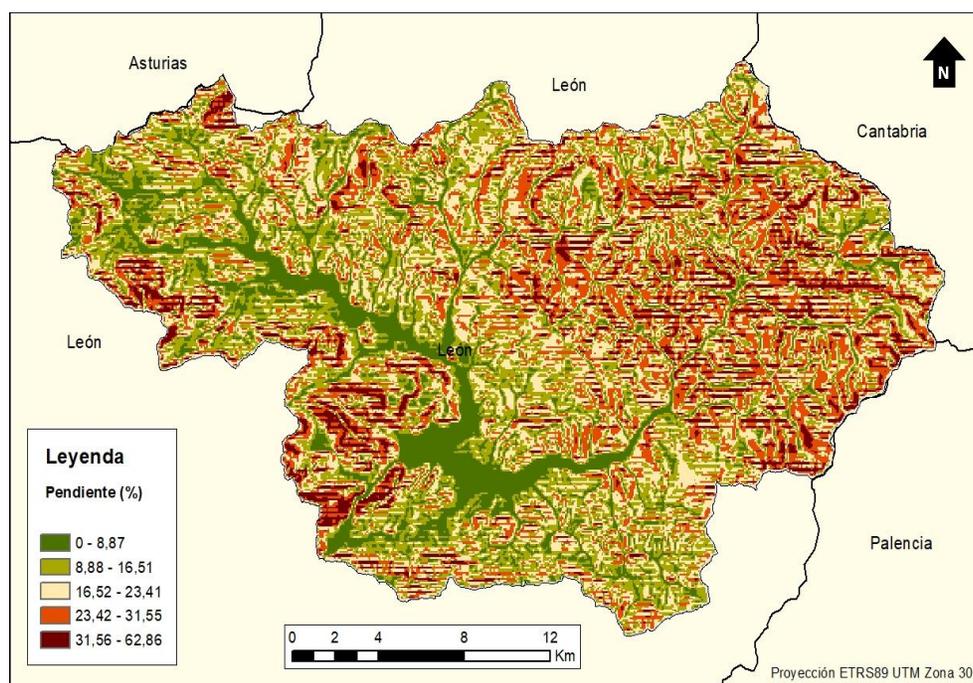
1000 y los 2535 m, y el relieve está organizado en torno a dos valles, el del río Esla al NW y el del río Yuso, al NE, que confluyen en Riaño (véase Figura 3.2).



**Figura 3.2:** Mapa de curvas de nivel de la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CGIAR.

Esta organización geomorfológica está muy condicionada por el sustrato geológico, consistente en rocas de edad paleozoica, intensamente deformadas por las orogénias herciniana y alpina. Una erosión diferencial guiada fundamentalmente por la acción fluvial ha ido erosionando los materiales menos resistentes, como las pizarras carboníferas, que han generado amplios valles de fondo plano, como los de Acebedo, Burón y Riaño, mientras que los materiales más resistentes, cuarcitas cámbricas y ordovícicas, conglomerados carboníferos y calizas devónicas, han sido dejados en resalte, formando diferentes alineaciones montañosas como el Macizo de Mampodre (Peña La Cruz, 2196 m), el de Fuentes Carrionas (Peña Prieta, 2535 m) o el conocido Pico Yordas (1967 m). Los ríos atraviesan estos macizos formando algunas hoces; en zonas con predominio de calizas son frecuentes procesos kársticos mientras que en las zonas altas aparecen evidencias de morfologías glaciares.

Como corresponde a su gran diversidad de altitudes, la zona de estudio se caracteriza por unas pendientes elevadas, superando habitualmente el 20%, y llegando a alcanzar en puntos concretos hasta el 40 %, particularmente en el entorno del Pico Yordas y del Macizo de Peña Prieta. Por el contrario, en el fondo de los valles las pendientes son moderadas, lo que ha favorecido la concentración de la población y donde se sitúan la mayor parte de los núcleos habitados (véase Figura 3.3).

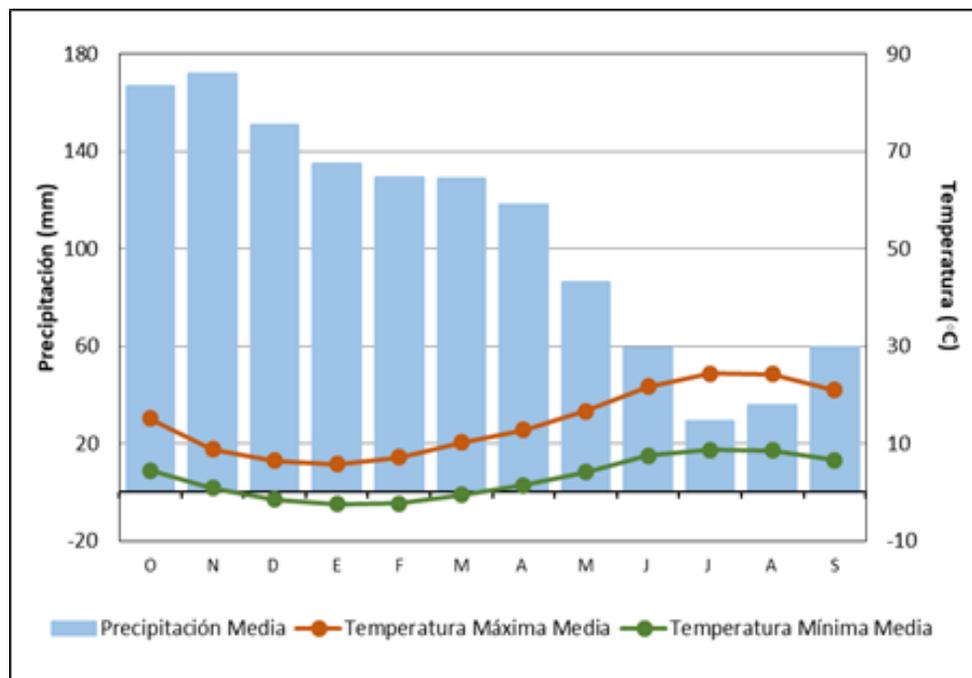


**Figura 3.3:** Mapa de pendientes de la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CGIAR.

### 3.1.2. Clima

El ámbito de estudio se incluye dentro de la “España Verde”, caracterizado por un clima con precipitaciones abundantes y regulares. La mayor parte de éstas se recogen en los meses otoñales e invernales, superándose de manera generalizada los 1000 mm anuales. Sin embargo, el alejamiento del mar y la altitud introduce rasgos de continentalidad térmica, así como ciertos matices mediterráneos, como la reducción de los totales pluviométricos estivales y un régimen térmico contrastado, con grandes diferencias entre el verano y el invierno y entre el día y la

noche. Así, durante el periodo estival las temperaturas pueden alcanzar y superar los 25°C y en meses invernales pueden bajar notablemente por debajo de los 0°C (véase Figura 3.4).



**Figura 3.4:** Climodiagrama de la estación de Riaño (2635). **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos proporcionados por AeMet.

A partir de los 1700 m de altitud aparece un clima de montaña caracterizado por temperaturas suaves en verano y frías o muy frías en meses invernales, y una mayor frecuencia de precipitaciones sólidas, que además persisten en el tiempo.

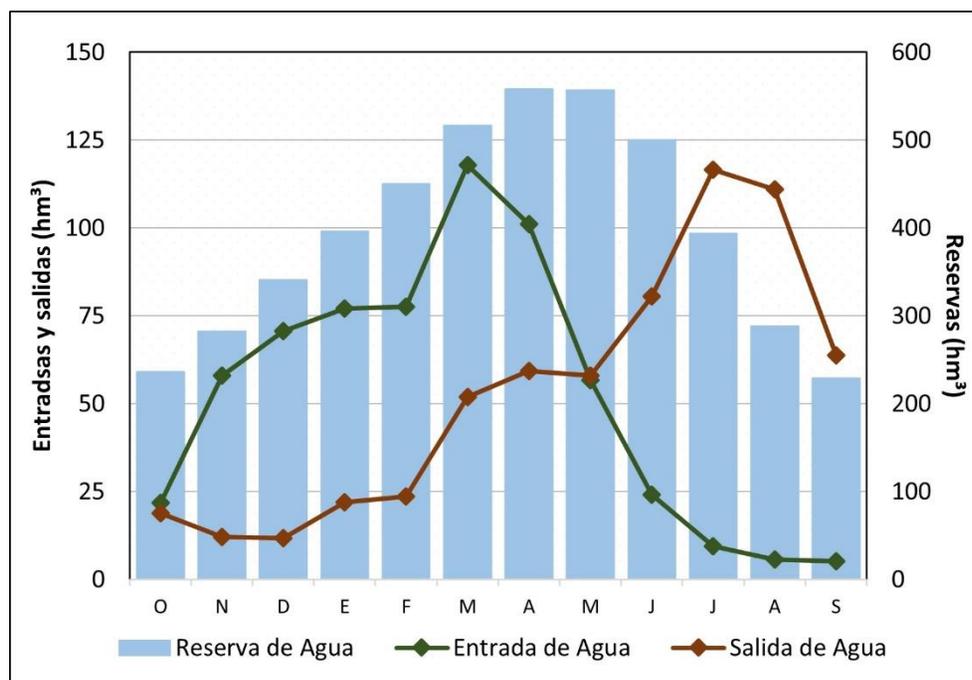
### 3.1.3. Hidrología

Los dos principales ríos del ámbito de estudio son el Esla y el Yuso, afluente del anterior que baja desde el Puerto de San Glorio, con dirección SW, confluyendo ambos en el valle de Riaño, actualmente ocupado por el embalse homónimo, uno de los más grandes de la Comunidad Autónoma de Castilla y León, y cuyas características aparecen en la tabla 2 (véase Tabla 3.1).

Longitud	337 m
Superficie del embalse	2230 ha
Zona regable prevista	80000 ha
Capacidad total	664 hm <sup>3</sup>
Fecha de inicio de la explotación	1991
Potencia instalada	85000 kw
Empresa concesionaria	Endesa
Energía anual media producible	140 gw/h

**Tabla 3.1:** Características principales del embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de Wikipedia.

El caudal del río Esla en régimen natural, representado por las aportaciones, puede caracterizarse como pluvio-nival, con un máximo en marzo y abril, momento a partir del cual las aportaciones se reducen considerablemente hasta alcanzar sus valores mínimos en verano. Por el contrario, el régimen de salidas es completamente opuesto, ya que se mantiene en valores relativamente bajos (fundamentalmente caudales ecológicos) hasta finales de invierno, experimentando una primera fase de desembalses para aliviar el agua embalsada y laminar las posibles avenidas fluviales; a partir de junio comienza la segunda fase de salida de agua, en esta ocasión para aliviar la escasez de agua en la Cuenca del Duero (véase Figura 3.5).



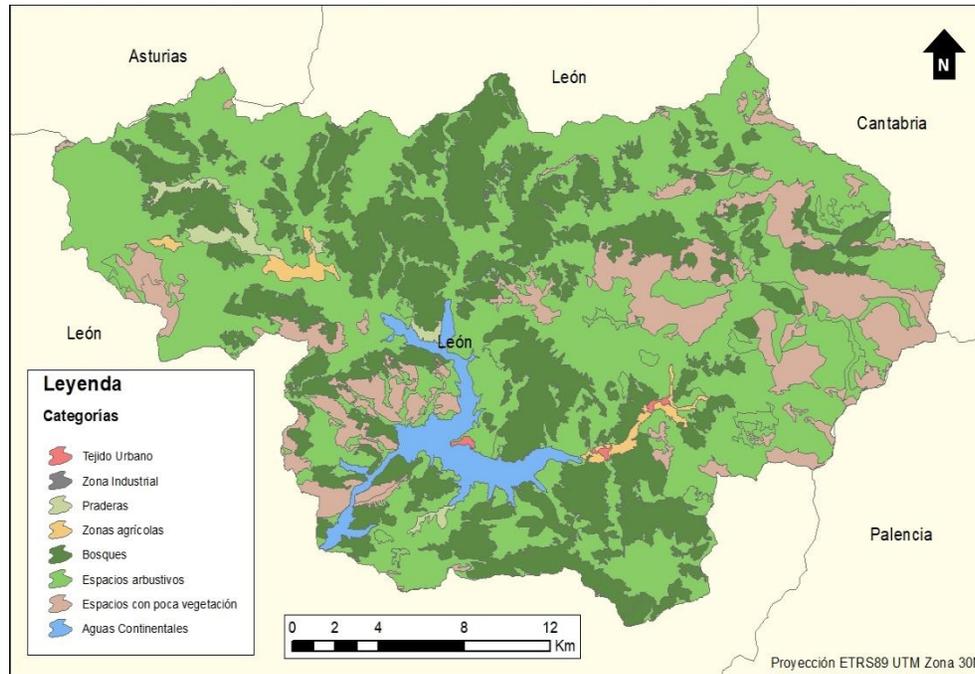
**Figura 3.5:** Volúmenes hídricos: entradas, salidas y reservas del embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CEDEX Duero

### 3.1.4. Vegetación y usos del suelo

Debido a su situación geográfica en la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica, el área de estudio pertenece a la región Eurosiberiana y, dentro de ella, a la provincia Orocantábrica. Las formaciones potenciales son los hayedos (*Fagus sylvatica*), robledales (*Quercus petrae*) y abedulares (*Betula pendula*) en las laderas más húmedas, mientras que especies más resistentes a la escasez de precipitaciones y el calor estival, como los bosques de rebollo (*Quercus pirenaica*), los encinares (*Quercus ilex*) y los sabinars (*Juniperus sabina*) deberían ocupar las vertientes más soleadas, sobre todo en las sierras más meridionales. Por encima de los 1700-1900 m, esas formaciones dejan paso a una vegetación predominantemente arbustiva (brezales y escobales) o a la roca desnuda.

Sin embargo, esta vegetación potencial ha sido manejada por el ser humano desde antiguo (la comarca de Riaño fue destino de la ruta de la Mesta leonesa oriental), por lo que en la actualidad la mayor parte del fondo de los valles está ocupado por cultivos y prados de diente, mientras que las laderas están dedicadas a pastos para el ganado o a repoblaciones forestales.

No obstante, todavía persisten algunas masas forestales autóctonas, como el boque de Hormas y el Hayedo de Argovejo (véase Figura 3.6).

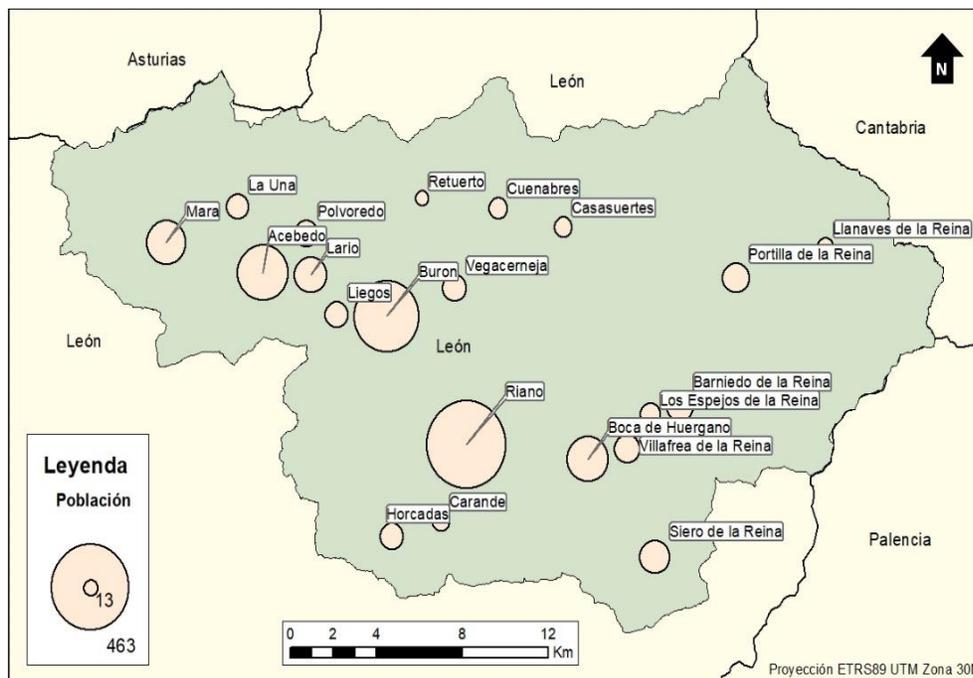


**Figura 3.6:** Mapa de usos del suelo en el área de estudio. **Fuente:** Elaboración propia a partir del Corine Land Cover.

## 3.2. EL MEDIO HUMANO

### 3.2.1. Población

La Montaña de Riaño es la comarca que articula prácticamente toda la cabecera del río Esla. Es una comarca afectada por un notable despoblamiento; únicamente las localidades de Riaño y Burón superan los 300 habitantes (véase Figura 3.7).



**Figura 3.7:** Distribución de los asentamientos del área de estudio. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos del INE.

La comarca sufrió una pérdida notable de población a raíz de la construcción del embalse de Riaño, que anegó el hoy conocido como antiguo o viejo Riaño, entre los años de 1986-1987, junto a ocho pueblos más del valle.

### 3.2.2. Actividades Económicas

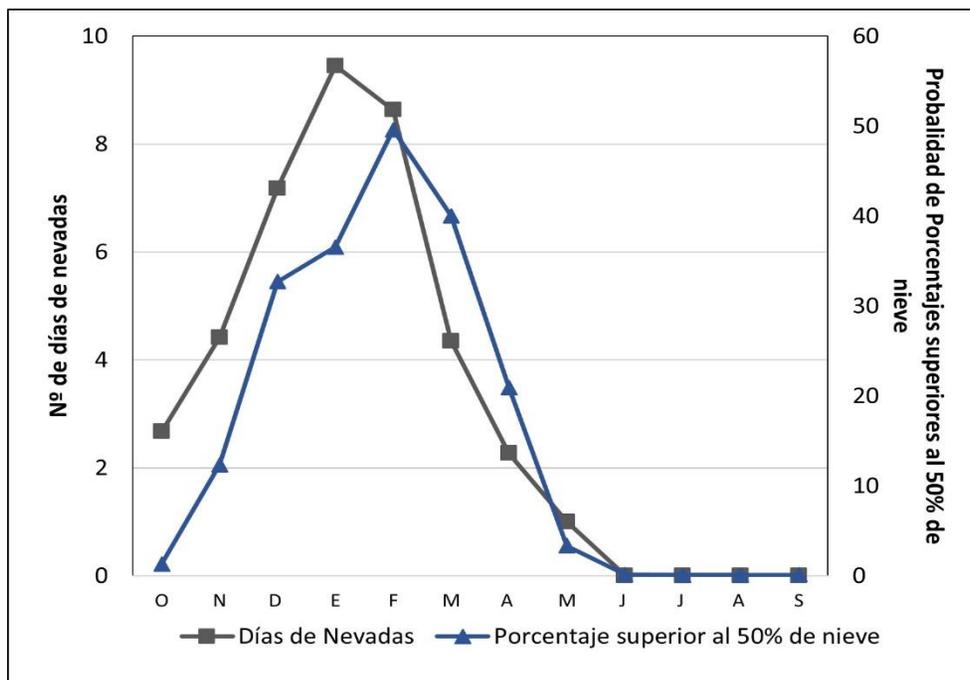
Las principales actividades económicas del área de estudio son las actividades primarias en forma de ganadería y las actividades terciarias basadas en el turismo, particularmente en las cabeceras municipales, como Riaño y Burón. El resto de la comarca se dedica principalmente a las actividades primarias, primordialmente a la ganadería.

## **4) RESULTADOS**

### **4.1. LA NIEVE EN LA CUENCA ALTA DEL ESLA: VARIABILIDAD ESPACIAL**

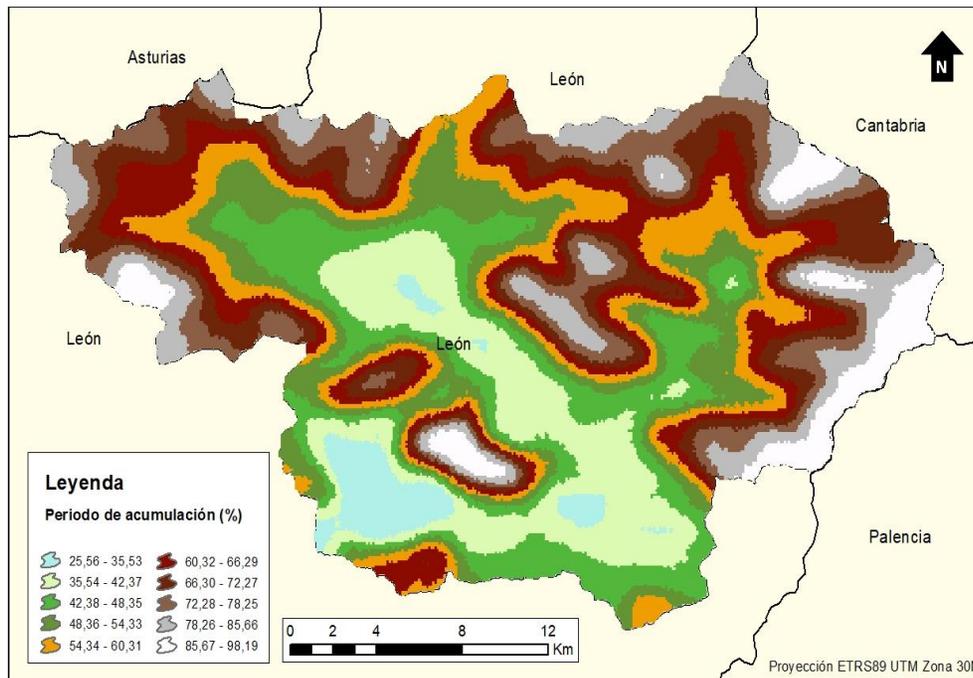
La nieve es un fenómeno habitual en la zona de estudio, sobre todo entre los meses de diciembre y febrero. El análisis de los datos de días de nieve recogidos por las estaciones meteorológicas permite deducir que, en dicho periodo del año, la media de días de nieve es superior a 26 (aproximadamente uno de cada tres días), pero la nieve puede caer también de forma esporádica entre octubre y mayo. Dado que las estaciones se sitúan en el fondo de los valles, cabría pensar que la frecuencia de nevadas pudiera superar los 30-35 días al año en las cumbres.

Por su parte, el análisis del número de píxeles cuyo recubrimiento de nieve supera el 50 % de la superficie de cada píxel nos muestra que el periodo de acumulación de nieve comienza en noviembre y alcanza un máximo en febrero. A partir de este mes se asiste a una reducción paulatina: aunque todavía en marzo y abril son posibles también acumulaciones importantes de nieve, la frecuencia de nevadas disminuye. Este desfase de aproximadamente un mes debe atribuirse al hecho de que las estaciones meteorológicas están situadas en el fondo de los valles, mientras que los datos de cubierta de nieve incluyen píxeles situados a mayores altitudes (véase Figura 4.1).



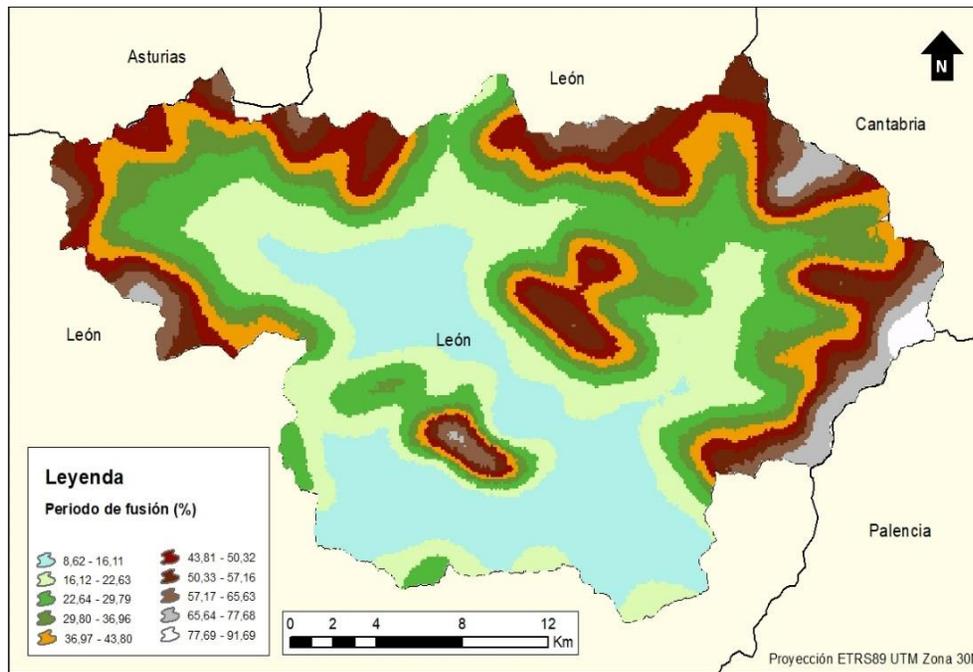
**Figura 4.1:** Frecuencia mensual del número de días de nieve y de la duración de la cubierta nival en la cabecera del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de AeMet y MODIS.

Dada la relación existente entre temperatura y probabilidad de precipitación en forma de nieve, cabe esperar que la altitud se comporte como una variable con una gran influencia en la frecuencia de aparición de nevadas como en la duración de la cubierta nival. En el periodo de acumulación, las zonas más elevadas y próximas a la divisoria son las que registran un recubrimiento de nieve más constante. Por ello, las zonas donde hay un mayor recubrimiento nival son: el macizo del Mampodre, los picos elevados como Peña Prieta y el Corisco, así como, sus inmediaciones más cercanas. Por otra parte, la alineación conformada por los picos Yordas y Gilbo también acumulan grandes cantidades de nieve, a pesar de situarse por debajo de los 2000 m (véase Figura 4.2).



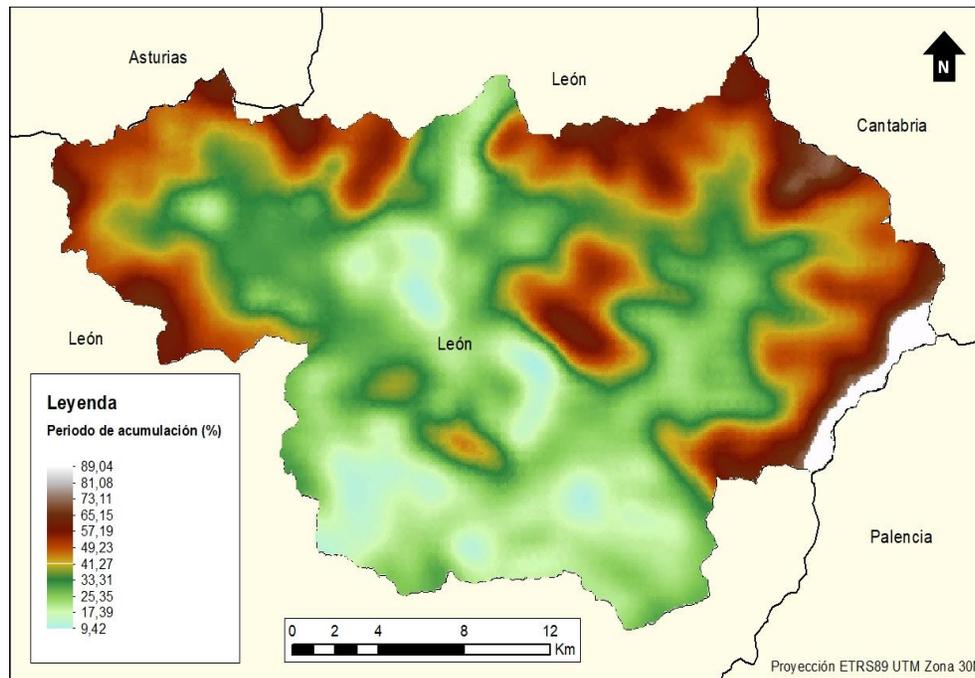
**Figura 4.2:** Cobertura nival (% medio de la superficie cubierta por nieve en cada pixel) durante el periodo de acumulación (diciembre, enero y febrero). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS.

Durante el periodo de fusión la nieve se mantiene únicamente en las zonas más elevadas, es decir, en Peña Prieta y en menor medida en el Mampodre, el Coriscao y en los picos situados al sur de Peña Prieta. El resto del ámbito de trabajo experimenta habitualmente nevadas durante estos meses, pero su persistencia es mucho menor dado que la temperatura es más elevada que en invierno y la duración del día es cada vez mayor, lo cual favorece una fusión rápida de la nieve caída (véase Figura 4.3).



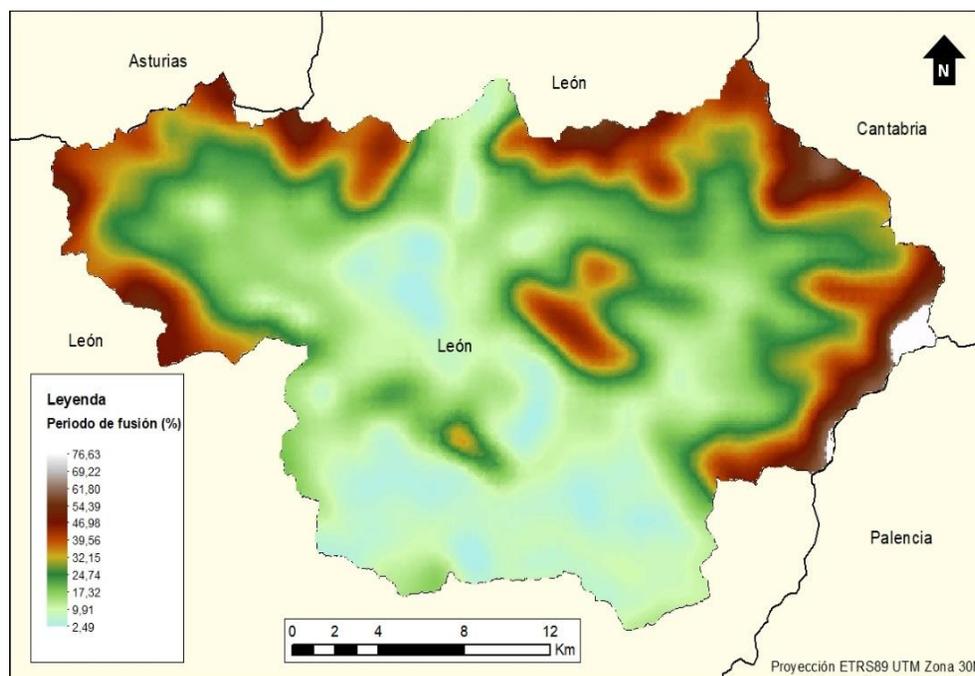
**Figura 4.3:** Cobertura nival (% medio de la superficie cubierta por nieve en cada pixel) durante el periodo de fusión (marzo, abril y mayo). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS.

Otra manera de analizar la distribución espacial de la cubierta nival es a través del número de días que cada píxel ha sido cubierto por la nieve. El patrón espacial durante el periodo de acumulación es muy similar al caso anterior, pero se observa que, durante el periodo de acumulación, la nieve aparece con una mayor frecuencia en las áreas de montaña situadas por encima de los 2000 m en el extremo nororiental y en el extremo noroccidental. En estas zonas, la nieve aparece entre un 57 y un 90% de los días de ese periodo; mientras que en el fondo del valle hay entre un 9 y un 33% (véase Figura 4.4).



**Figura 4.4:** Frecuencia de días en los que la nieve ha cubierto cada píxel durante el periodo de acumulación (diciembre, enero y febrero). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS.

En el periodo de fusión, los porcentajes son menores ante el aumento notable de las temperaturas y la reducción de las precipitaciones. De esta manera, las zonas en las que aparece la nieve con más frecuencia se concentran en las montañas, especialmente en las cercanías de la divisoria cantábrica, alcanzándose frecuencias superiores al 50%. Por el contrario, en el fondo del valle los valores oscilan entre un 2 y un 24% (véase Figura 4.5).



**Figura 4.5:** Frecuencia de días en los que la nieve ha cubierto cada píxel durante el periodo de fusión (marzo, abril y mayo). **Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS.

Del material cartográfico anterior se puede deducir una gran relación entre la persistencia de la nieve y la altitud de la cuenca del Esla. Sin embargo, también es posible identificar otros factores que podrían influir en la distribución espacial de la cubierta nival. Para determinar estos factores, y si su papel varía a lo largo del tiempo, se procedió a un análisis de correlación entre los valores medios de la cubierta nival y una serie de variables topográficas obtenidas en cada píxel, separándose el análisis según el periodo de acumulación o de fusión. El análisis de correlación confirma la primacía de la variable altitud, tanto durante el periodo de acumulación como en el de fusión, siendo más importante en este segundo. Probablemente, la causa de esta diferencia es el hecho que en invierno son frecuentes las nevadas incluso por debajo de la altitud mínima de la zona de estudio, algo que no es habitual en los meses de primavera.

Por otra parte, en ambos periodos destaca la relevancia del TRI, la rugosidad y las pendientes. No obstante, en este caso, todas esas variables resaltan en mayor medida en el periodo de acumulación. Del resto de variables topográficas merece destacarse el índice de rugosidad del terreno, la pendiente y la orientación N (véase Tabla 4.1).

Periodo	Altitud	Orientación N	Orientación E	TPI	TRI
Acumulación	,753**	,247**	-0,028	,197	,322**
Fusión	,819**	,077**	-0,027	,205**	,294**

**Tabla 4.1:** Relación entre la duración de la cubierta nival y variables topográficas (\*\* relación significativa con un nivel de fiabilidad del 95 %). **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de MODIS y del MDT.

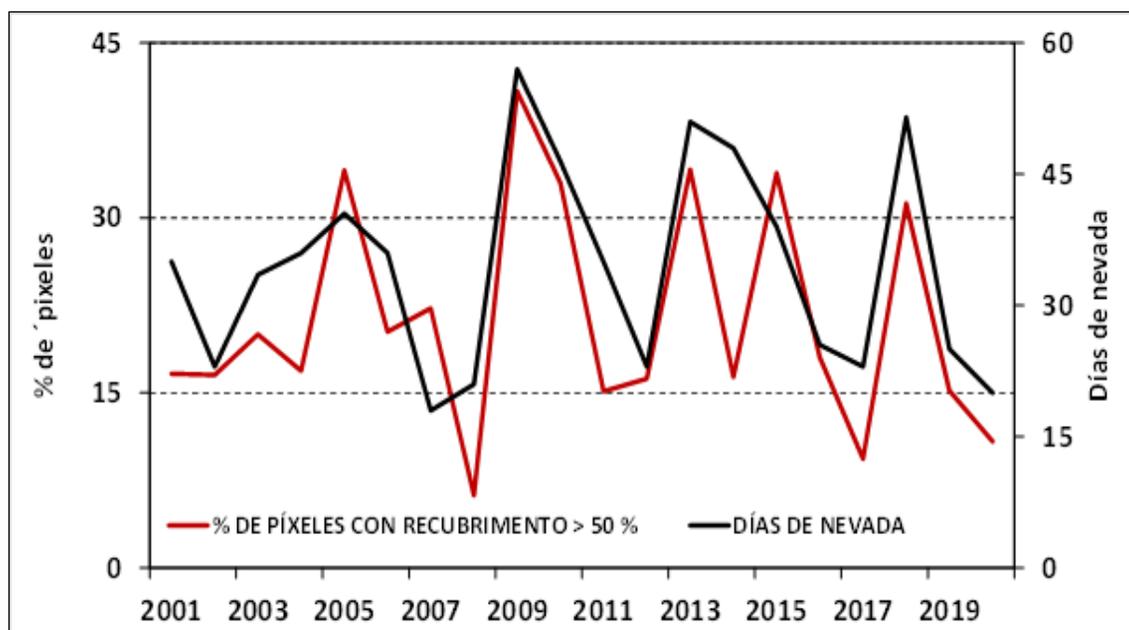
Dada la importancia de la variable altitud, para resaltar el papel de las restantes variables se calculan las correlaciones parciales, en las que se realiza el mismo procedimiento, pero sobre los residuos resultado del procedimiento de la correlación anterior, es decir, sin la variable altitud. En dicha correlación, las variables más destacadas son: la orientación N durante el periodo de acumulación, al ser la vertiente más expuesta hacia los frentes fríos los cuales proceden mayoritariamente del norte, así como, los lugares con menor luminosidad; y los índices TPI (Índice de Posición Topográfica) y TRI (Índice de Irregularidad del Terreno) durante el periodo de fusión al ser valores negativos, especialmente el TRI al tener un valor negativo más acentuado que el TPI. Estos valores significan que existe una mayor acumulación de nieve en zonas donde la topografía relativa es elevada, es decir, hay una clara persistencia de la nieve en zonas deprimidas e irregulares al estar rodeadas por montañas prominentes y con pendientes elevadas (véase Tabla 4.2).

Periodo	Orientación N	Orientación E	TPI	TRI
Acumulación	0,318**	0,06	-0,202**	-0,157
Fusión	0,062	0,081	-0,269**	-0,311**

**Tabla 4.2:** Relación entre la duración de la cubierta nival y variables topográficas (\*\* relación significativa con un nivel de fiabilidad del 95 %) sin la altitud. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de MODIS y del MDT.

## 4.2. VARIABILIDAD INTERANUAL DE LA NIEVE Y DINÁMICA ATMOSFÉRICA

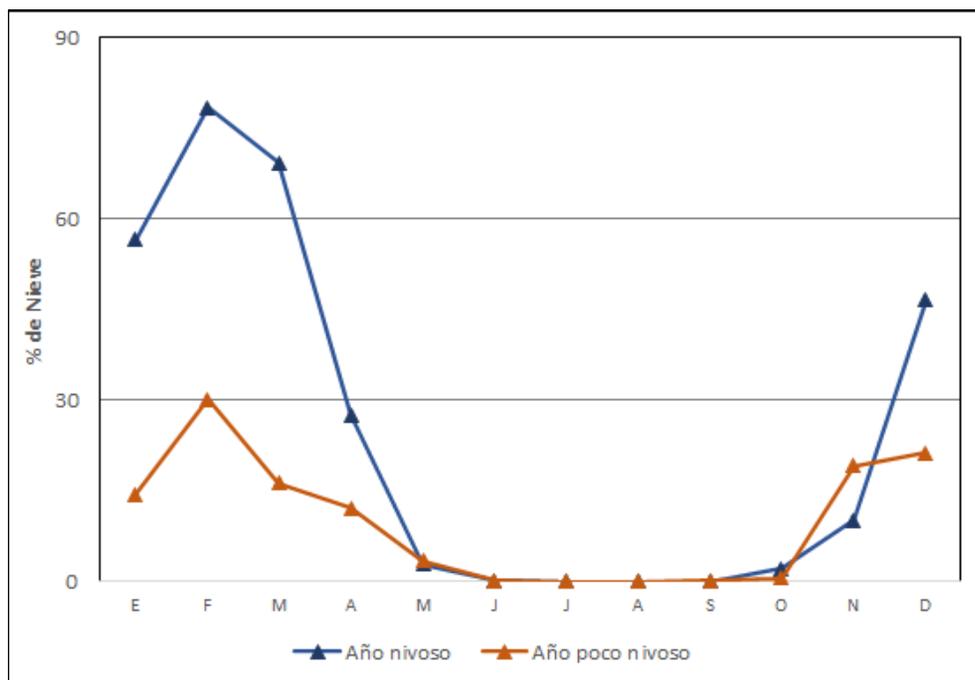
Los valores medios de duración de la cubierta de nieve analizados en las páginas precedentes encubren una notable variabilidad de unos años a otros en el gráfico. La figura 15 muestra la evolución, durante el periodo estudiado, de la frecuencia de días de nevada y el % de píxeles con un recubrimiento de nieve superior al 50 %. Ambos parámetros muestran una evolución similar, con inviernos muy nevados como 2005, 2014 o 2018, mientras que 2008, 2012, 2017 o 2020 fueron inviernos con valores por debajo de lo habitual en tanto en la frecuencia de nevadas como en la duración de la cubierta nival (véase Figura 4.6).



**Figura 4.6:** Evolución de la frecuencia de días de nevada y de la duración de la cubierta nival durante el periodo de estudio (2001-2020). **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de MODIS y AeMet.

Por ello, se deduce que la nieve es muy variable de unos años a otros, lo que da lugar a una división de dos tipos: años nevados y años poco nevados. En relación con los años nevados, la ocupación del recubrimiento nival es elevada durante el periodo de acumulación y con un fuerte descenso a partir del periodo de fusión. Por otra parte, los años considerados como poco nevados tienen valores bajos durante todo el año pudiendo llegar como máximo a un 30% de la cubierta nival en la superficie.

Sin embargo, en estos años el descenso en el periodo de fusión no es tan evidente como en los años nevados, haciendo que entre los meses de mayo a octubre los valores relativos se mantengan iguales en ambos periodos (véase Figura 4.7).



**Figura 4.7:** Relación de los años nevados con los años pocos nevados en términos de la ratio 50 sobre la ocupación de cobertura nival en el suelo. **Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS.

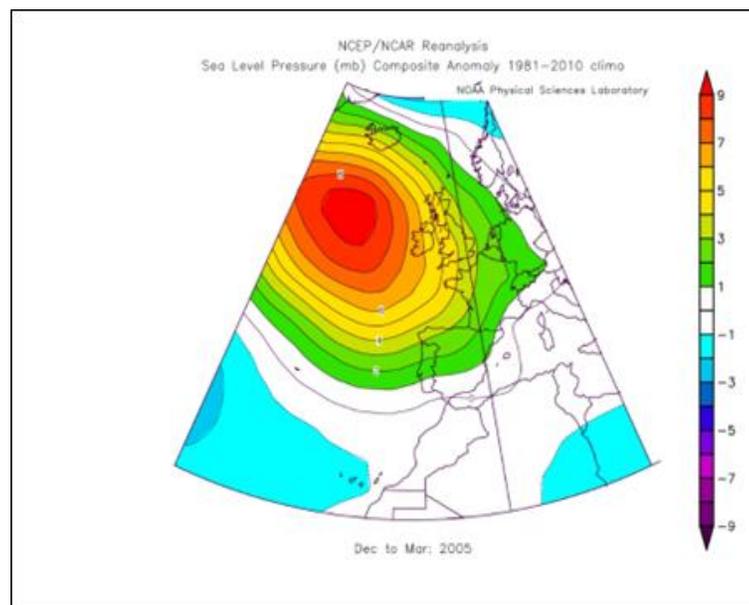
Para explicar los mecanismos atmosféricos que propician la variabilidad interanual en las precipitaciones, temperaturas y recubrimiento nival se ha recurrido a la técnica de los composites caracterizada por combinar terciles de recubrimiento nival y de precipitación.

A partir de ellos se han definido las siguientes combinaciones:

- Invierno seco (tercil inferior de la precipitación) con mucha nieve (tercil superior de la cobertura nival).
- Invierno seco (tercil inferior de la precipitación) con poca nieve (tercil inferior de la cobertura nival).
- Invierno húmedo (tercil superior de la precipitación) con mucha nieve (tercil superior de la cobertura nival).

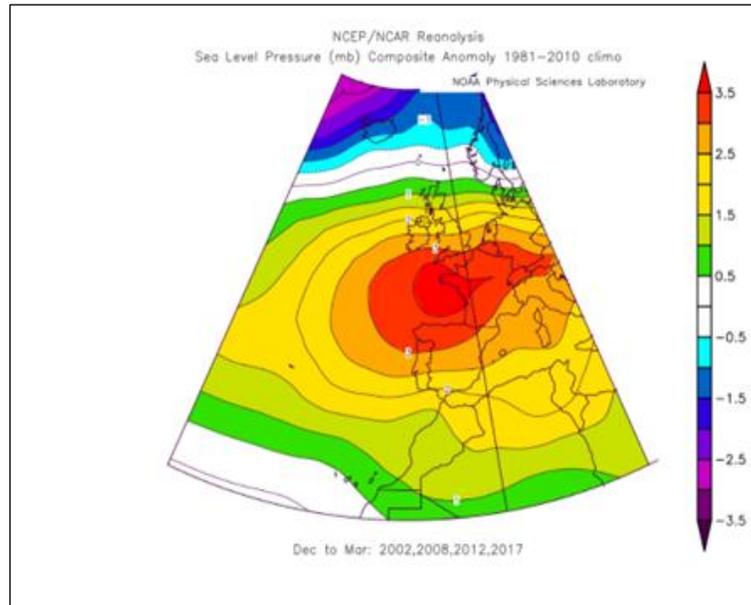
- Invierno húmedo (tercil superior de la precipitación) con poca nieve (tercil inferior de la cobertura nival).

En primer lugar, los inviernos secos con mucha nieve se caracterizan por la llegada de masas de aire desde el Atlántico N en régimen anticiclónico. Esto se debe a que hay una anomalía positiva de la presión a nivel del mar (intensificación de los anticiclones atlánticos) al oeste de Irlanda hace que los vientos procedan de latitudes septentrionales, fríos pero húmedos, dado que han recorrido el Cantábrico. Por consiguiente, las precipitaciones no son abundantes, pero las bajas temperaturas provocan precipitaciones en forma de nieve al rebasar la Cordillera Cantábrica, como fue el caso del año 2005 (véase Figura 4.8).



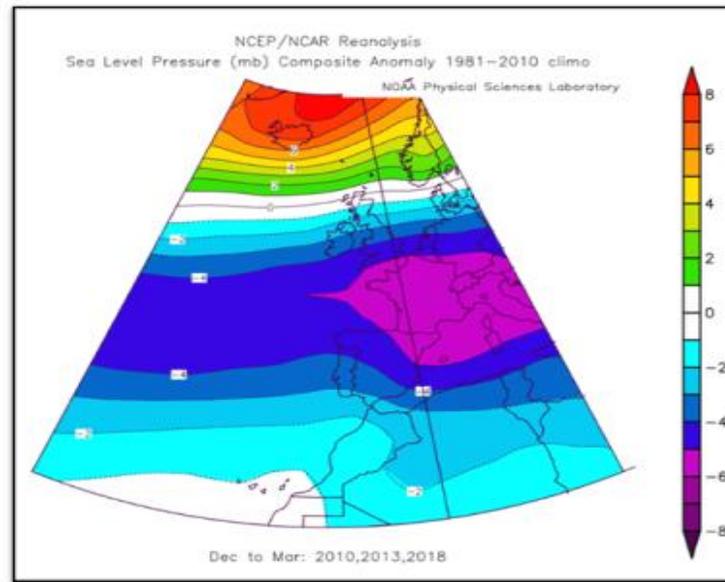
**Figura 4.8:** Composite de la anomalía en la presión del nivel del mar de un invierno seco con mucha nieve. **Fuente:** NCEP, 2022.

En segundo lugar, los inviernos secos con poca nieve se caracterizan por anomalías positivas de la presión atmosférica sobre el litoral Cantábrico, correspondiendo a una mayor frecuencia de anticiclones sobre nuestro ámbito de estudio. Dado que el viento proviene del E o del NE, es un viento frío pero muy seco, procedente del interior del continente europeo, lo que explicaría la ausencia de las precipitaciones. Cabe esperar bajo estas condiciones el predominio de días soleados, pero sometidos a una gran oscilación térmica entre el día y la noche, y probablemente, frecuentes fenómenos de inversión térmica en el fondo de los valles (véase Figura 4.9).



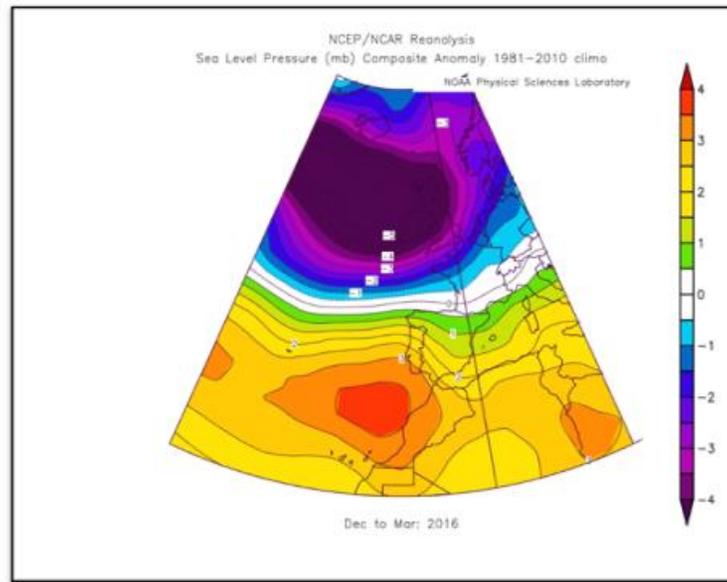
**Figura 4.9:** Composite de la anomalía en la presión del nivel del mar de un invierno seco con poca nieve. **Fuente:** NCEP, 2022.

En tercer lugar, los inviernos húmedos y acompañados de mucha nieve se caracterizan por un área de presiones inferiores a lo habitual en Europa Occidental, señal de una frecuencia elevada de situaciones ciclónicas que favorecen vientos del NO. Estas condiciones dan lugar a precipitaciones abundantes, pero las bajas temperaturas las transforman en nevadas, como ocurrió durante los inviernos de 2010, 2013 y 2018 (véase Figura 4.10).



**Figura 4.10:** Composite de la anomalía de la presión del nivel del mar de un invierno húmedo con mucha nieve. **Fuente:** NCEP, 2022.

Por último, los inviernos húmedos con poca nieve pueden aparecer cuando hay una zona de bajas presiones entre el mar Cantábrico e Irlanda y una zona de altas presiones en el suroeste de la Península Ibérica. Entre ambos centros de acción se establece un gradiente de presión elevado, que favorece la llegada de vientos templados y húmedos de procedencia atlántica. Bajo estas condiciones las precipitaciones son abundantes, pero en forma de lluvia, puesto que las temperaturas no son lo suficiente bajas como para transformar la lluvia en nieve o para permitir la persistencia de la nieve en el suelo durante varias jornadas (véase Figura 4.11).

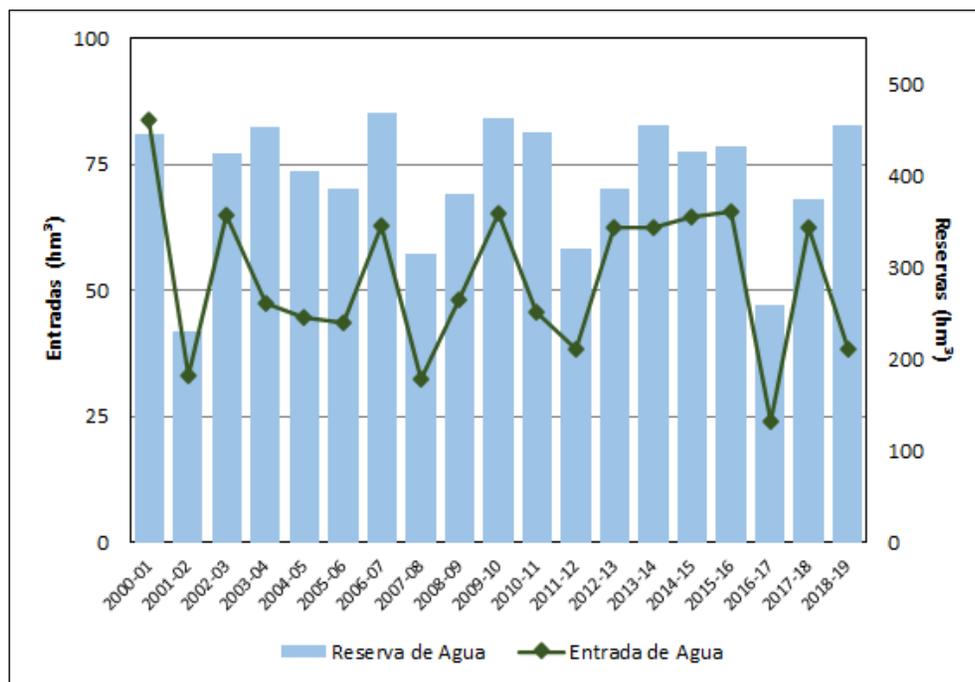


**Figura 4.11:** Composite de la anomalía de la presión del nivel del mar de un invierno húmedo con poca nieve. **Fuente:** NCEP, 2022.

### **4.3. EL PAPEL DE LA NIEVE EN LA GESTIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA ALTA DEL ESLA**

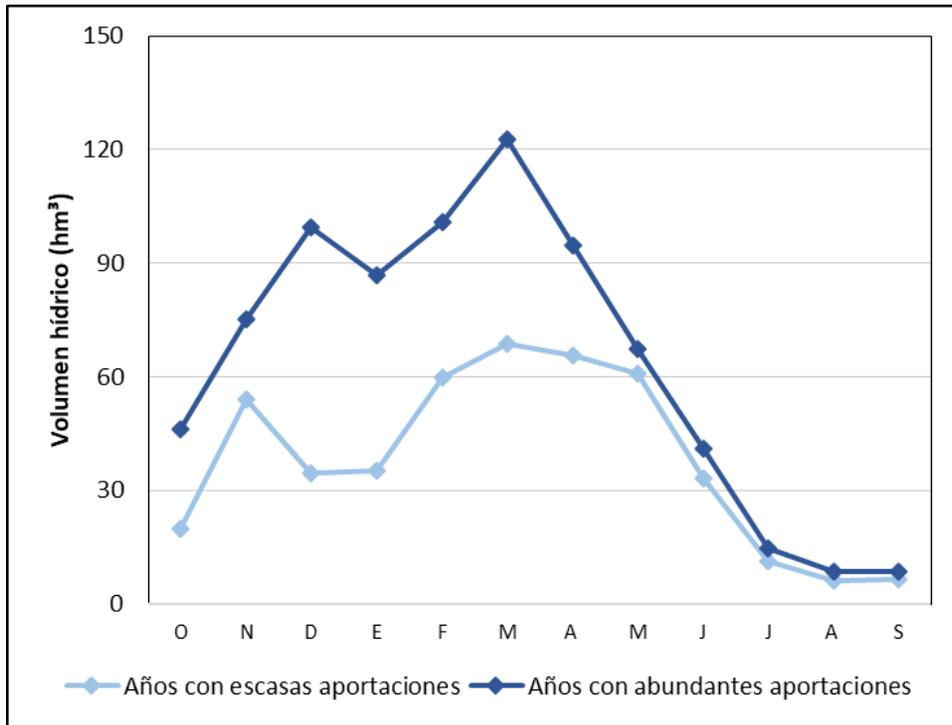
Dada la frecuencia con la que aparece la nieve en la cuenca alta del río Esla, pero también su irregularidad de un año a otro cabe preguntarse cuál es el papel de la nieve en el volumen de los recursos hídricos de la cuenca y en su gestión. Para ello, se siguió el mismo procedimiento utilizado en el apartado anterior, elaborándose “composites” a partir de la clasificación de los años en terciles según las aportaciones anuales al embalse y su respuesta hidrológica en forma de salidas de caudal y reservas de agua en el embalse de Riaño.

La gran variabilidad mostrada por la nieve también aparece tanto a las aportaciones del río Esla (entradas al embalse) como a las reservas, que muestran variaciones interanuales muy similares. En los años más secos, como 2001-2002 y 2016-2017 las aportaciones no superaron los 40 hm<sup>3</sup>, mientras que las reservas ascendieron mucho más allá de los 200 hm<sup>3</sup>. Por el contrario, en años húmedos (2000-2001 y 2009-2010), tanto las aportaciones como las reservas se doblan, hasta superar los 80 hm<sup>3</sup> y 450 hm<sup>3</sup>, respectivamente (véase Figura 4.12).

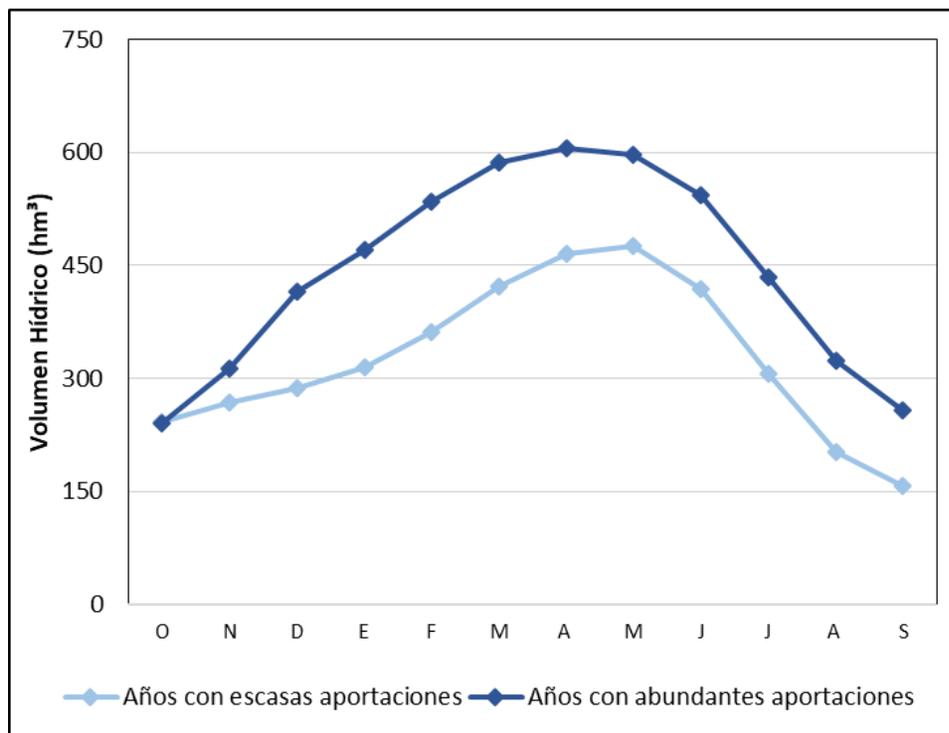


**Figura 4.12:** Variabilidad interanual de las aportaciones y de las reservas hídricas en el Embalse de Riaño entre 2001 y 2019. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CEDEX.

Las aportaciones al embalse de Riaño tienen un papel decisivo no sólo en el volumen de agua embalsada, sino también en el régimen mensual de entradas y salidas, así como en la gestión de las reservas. En los años con aportaciones elevadas, tanto las entradas como las reservas son bastante elevadas. La diferencia entre años extremos ya se detecta al comienzo del año hidrológico, y persiste hasta el mes de mayo. Dos meses con máxima diferencia destacan. El primero, en diciembre, podría corresponder a episodios de precipitaciones abundantes, que pueden estar acompañados de la fusión prematura de la nieve caída. El segundo, en marzo, corresponde a la fusión de la nieve acumulada en las zonas altas. En los años con bajas aportaciones, las entradas son irregulares en el periodo de acumulación y claramente inferiores en el periodo de fusión (véase Figura 4.13) (véase Figura 4.14).

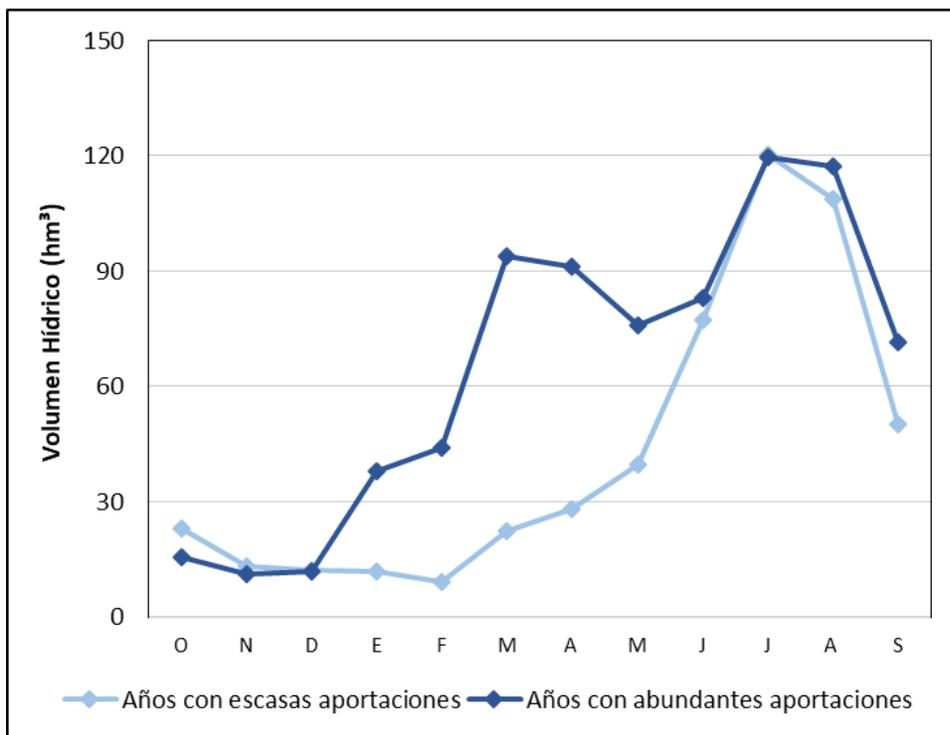


**Figura 4.13:** Evolución mensual de las entradas de agua en función de las aportaciones al Embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CEDEX.



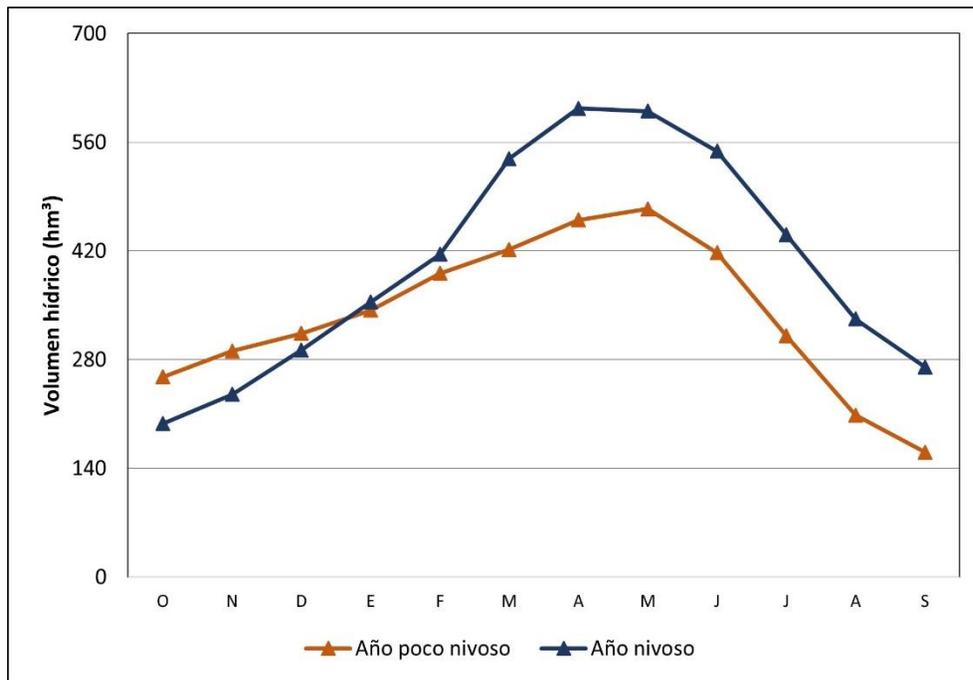
**Figura 4.14:** Evolución mensual de las reservas de agua en función de las aportaciones al Embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CEDEX.

Finalmente, el régimen de desembalse parece estar condicionado no sólo por las condiciones atmosféricas, sino también por la propia gestión del embalse para satisfacer las necesidades de los regantes. La salida de agua en los años con abundantes aportaciones comienza ya en enero, y alcanza diferencias muy acusadas respecto a los años secos en marzo y abril. Probablemente, esta circunstancia se explica por la necesidad de desembalsar un volumen de agua importante, que permita el almacenaje del agua procedente de la fusión de la nieve, laminando con ello posibles avenidas cuando episodios de precipitaciones líquidas abundantes funden rápidamente la nieve. Este es el caso de las inundaciones de 2001 y de 2019, generalizadas en toda la cuenca del Duero. Obsérvese además que no se aprecia apenas diferencia en el máximo estival de desembalse entre los años con escasas aportaciones y los años con abundantes aportaciones, es decir, existe una demanda poco flexible que debe satisfacerse independientemente del caudal en régimen natural (véase Figura 4.15).



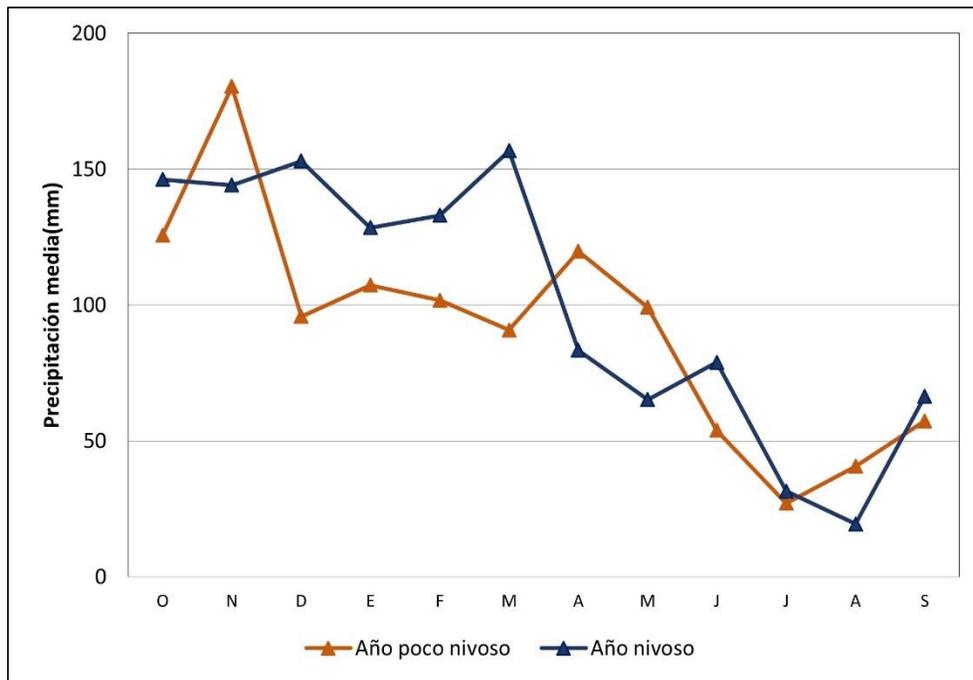
**Figura 4.15:** Evolución mensual de las salidas de agua en función de las aportaciones al embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de CEDEX.

Por otra parte, la innivación también tiene relevancia en la gestión del embalse. Un invierno nivoso contribuye a un aumento de las reservas del embalse, particularmente a partir de la primavera, y este excedente se prolonga hacia el verano. Sin embargo, cuando el invierno es poco nivoso, no sólo las entradas de agua disminuyen apreciablemente, sino que la reserva de agua es escasa el resto del año, y particularmente durante los meses estivales, que son los de mayor demanda hídrica en la cuenca del Duero (véase Figura 4.16).



**Figura 4.16:** Impacto de la innivación en las reservas del embalse de Riaño. **Fuente:** Elaboración propia a partir de datos de MODIS y CEDEX.

Los años nivosos no suponen un aumento notable de la cuantía de las precipitaciones anuales, excepto en los meses invernales (de diciembre a marzo), donde se observa un aumento que oscila entre el 25 y el 50 %, siendo marzo el mes con mayor diferencia.



**Figura 4.17:** Diferencias en el régimen de precipitaciones durante años nivosos y poco nivosos.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de MODIS y AeMet.

## **5) CONCLUSIONES**

A lo largo de este documento se ha realizado un análisis de la nieve en la cabecera alta del río Esla y de su papel en la gestión de los recursos hídricos. Para ello se ha utilizado una base de datos que proporciona el grado de recubrimiento nival con una resolución de 500 m, evaluándose su variabilidad espacial y temporal durante el periodo 2000-2019. La variabilidad espacial se ha relacionado con diferentes parámetros topográficos extraídos de un Modelo Digital del Terreno en un entorno SIG, mientras que la variabilidad temporal se ha explicado en función de la circulación atmosférica. Finalmente, el impacto de la nieve sobre la gestión de los recursos hídricos se ha evaluado comparando la cubierta nival con el régimen del embalse de Riaño. Las principales conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- En primer lugar, la nieve es un meteoro frecuente en la cuenca alta del Esla, estando presente habitualmente entre los meses de noviembre y marzo, pudiendo producirse nevadas en otros momentos del año que, sin embargo, apenas persisten sobre el terreno.
- En segundo lugar, la variable topográfica que explica la mayor parte de la variabilidad espacial de la nieve es la altitud. A ello se añade la exposición N durante el periodo de acumulación de nieve, ya que la mayor parte de las nevadas se producen bajo situaciones del N, y la forma de la topografía durante el periodo de fusión, al persistir en zonas deprimidas y rodeadas de montañas.
- En tercer lugar, la evolución interanual de la cobertura de nieve no muestra tendencia alguna durante el periodo de análisis, pero sí fluctuaciones de un año a otro que están vinculadas con las características de la circulación atmosférica a escala regional. Los inviernos nivosos corresponden al predominio de situaciones del NW y del N; los años con predominio de precipitaciones de lluvia corresponden al paso de abundantes borrascas por el N de la Península Ibérica, mientras que los años secos son causados por anticiclones sobre la Península Ibérica y Europa Occidental.

- Por último, la nieve condiciona la gestión del embalse de Riaño, ya que constituye una reserva de agua que está disponible a finales del invierno y comienzos de la primavera. Sin embargo, también puede causar trastornos a esa gestión, ya que el objetivo fundamental de los gestores es que el embalse llegue a la primavera con la mayor reserva de agua posible, para satisfacer una demanda inelástica de agua para el regadío. Si estos altos niveles de agua coinciden con una abundante cubierta nival, el exceso de agua debe desembalsarse para evitar posibles avenidas causadas por una rápida fusión de la nieve.

A partir del análisis efectuado en este documento es posible vislumbrar un futuro incierto para la sostenibilidad del recurso hídrico. El *Plan Hidrológico del Duero 2015 – 2021* contempla un aumento de la superficie de regadío en la cuenca del Duero, con lo que la demanda hídrica sería mayor en los próximos años; sin embargo, el impacto del cambio climático antrópico podría exacerbar la variabilidad espacial y temporal de la cobertura de nieve.

## **6) BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES**

### **6.1. FUENTES**

AeMet (2022) Valores Climatológicos Normales. Datos climatológicos. Servicios climáticos. Inicio. Agencia Estatal de Meteorología. Madrid. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Vicepresidencia tercera del Gobierno. Gobierno de España. Disponible, en junio de 2022 en: <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos/valoresclimatologicos>

CEDEX (2019). Anuario de Aforos 2018-2019. Embalses: acceso gráfico. Confederación hidrográfica del Duero. Centro de estudios y experimentación de obras públicas. Madrid. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Ministerio de transportes, movilidad y agenda urbana. Vicepresidencia cuarta del gobierno, Gobierno de España. Disponible, en junio de 2022 en: [https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalsemapa\\_estaciones.asp?gr\\_cuenca\\_id=2&resolucion=1920](https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalsemapa_estaciones.asp?gr_cuenca_id=2&resolucion=1920)

CEDEX (2022). Centro de Estudios Hidrográficos. Madrid: Ministerio de Transportes, movilidad y agenda urbana; Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfica. Vicepresidencia Tercera del Gobierno. Gobierno de España. Disponible, en junio de 2022 en: [https://ceh.cedex.es/web\\_ceh\\_2018/default.htm](https://ceh.cedex.es/web_ceh_2018/default.htm)

CGIAR – CSI (2022). SRTM 90m DEM Digital Elevation Database. CGIAR – Consortium for Spatial Information. Disponible, en junio de 2022 en: <https://srtm.csi.cgiar.org/>

CH Duero (2022). Confederación Hidrográfica del Duero. Burgos, León, Salamanca, Segovia, Soria, Valladolid y Zamora: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Vicepresidencia tercera del gobierno. Gestión de la cuenca, información hidrológica, Datos de agua embalsada. Disponible, en junio de 2022 en: <https://www.chduero.es/datos-de-agua-embalsada>

CH Duero (2022). Plan Hidrológico 2016-2021. Planificación. Confederación Hidrográfica del Duero. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Vicepresidencia tercera del gobierno. Gestión de la cuenca, información hidrológica, Datos de agua embalsada. Disponible, en junio de 2022 en: <https://www.chduero.es/plan-hidrologico-2016>

EOS (2022). NDSI. Earth Observing System. Disponible, en junio de 2022 en: <https://eos.com/es/make-an-analysis/ndsi/>

ERHIN (2022) Evaluación de los recursos hídricos procedentes de la inniviación. Madrid: Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico, Vicepresidencia tercera del Gobierno. Disponible, en junio de 2022 en: <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/evaluacion-de-los-recursos-hidricos/ERHIN/>

IDE (2022). Subcuencas de ríos completos clasificadas según Pfafstetter modificado (subcuencas vertientes a zona norte del atlántico). Cuencas y subcuencas hidrográficas. Descargas. IDE. Infraestructura de datos espaciales. Cartografía y SIG. Inicio. Ministerio para la transición ecológica y el reto demográfico. Vicepresidencia Tercera del Gobierno. Gobierno de España. Disponible, en junio de 2022 en: <https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/cuencas-y-subcuencas.aspx>

NCEP (2022). National Weather Service. College Park: National Centers for Environmental Prediction; National Weather Service; National Oceanic and Atmospheric Administration; US Dept of Commerce. Disponible, en junio de 2022 en: <https://www.weather.gov/ncep/>

NOAA (2022). Daily Mean Composites. Plotting & análisis. Home. Physical Sciences Laboratory. National Oceanic and Atmospheric Administration. U.S. department of commerce. Disponible, en junio de 2022 en: <https://psl.noaa.gov/data/composites/day/>

NSIDC (2022). MODIS / TERRA CGF Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61. MOD10A1F. National Snow & Ice Data Center. University of Colorado Boulder. Disponible, en junio de 2022 en: <https://nsidc.org/data/MOD10A1F/versions/61>

## **6.2. BIBLIOGRAFÍAS**

Abram, N., J.-P. Gattuso, A. Prakash, L. Cheng, M.P. Chidichimo, S. Crate, H. Enomoto, M. Garschagen, N. Gruber, S. Harper, E. Holland, R.M. Kudela, J. Rice, K. Steffen, and K. von Schuckmann, 2019: Framing and Context of the Report. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 73–129: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.003>.

Allende Álvarez, F.; Frochoso, M.; González - Pellejero, R.; López Estébanez, N. (2005). Protección y desprotección de la naturaleza: San Glorio, otra estación de esquí para la montaña cantábrica 1. En: *Conference: Espacios Públicos – Espacios Privados. Un debate sobre el territorio. XIX*. octubre de 2005. Congreso de Geógrafos Españoles. Disponible, en junio de

2022 en:[https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Frochoso/publication/235643749\\_PROTECCION\\_Y\\_DESPROTECCION\\_DE\\_LA\\_NATURALEZA\\_SAN\\_GLORIO\\_OTRA\\_ESTACION\\_DE\\_ESQUI\\_PARA\\_LA\\_MONTANA\\_CANTABRICA\\_1/links/09e415123c4120278d000000/PROTECCION-Y-DESPROTECCION-DE-LA-NATURALEZA-SAN-GLORIO-OTRA-ESTACION-DE-ESQUI-PARA-LA-MONTANA-CANTABRICA-1.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Manuel-Frochoso/publication/235643749_PROTECCION_Y_DESPROTECCION_DE_LA_NATURALEZA_SAN_GLORIO_OTRA_ESTACION_DE_ESQUI_PARA_LA_MONTANA_CANTABRICA_1/links/09e415123c4120278d000000/PROTECCION-Y-DESPROTECCION-DE-LA-NATURALEZA-SAN-GLORIO-OTRA-ESTACION-DE-ESQUI-PARA-LA-MONTANA-CANTABRICA-1.pdf)

Ault, T., Czajkowski, K., Benko, T., Coss, J., Struble, J., Spongberg, A., Templin, M., and Gross, C.: Validation of the MODIS snow product and cloud mask using student and NWS cooperative station observations in the Lower Great Lakes Region, *Remote Sens. Environ.*, 105, 341–353, 2006.

Baumgartner, M., Seidel, K., and Martinec, J.: Toward snowmelt runoff forecast based on multisensor remote-sensing information, *IEEE T. Geosci. Remote*, 25, 746–750, 1987.

Beniston M. 2003. Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Clim. Change* 59: 5–31. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-94-015-1252-7_2)

Bowley, C. J., Barnes, J. C., and Rango, A.: Satellite snow mapping and runoff prediction handbook, Tech. rep., NASA Technical Paper 1829, National Aeronautics and Space Administration, Washington, D.C., 1981.

Brown, R. D., and P. W. Mote. 2009. The response of Northern Hemisphere snow cover to a changing climate. *Journal of Climatology* 22:2124–2145.

Carvick JL, Brewer TR. 2004. Improving local estimations and regional trends of glacier equilibrium line altitudes. *Geogr. Ann.* 86a: 67–79, <https://doi.org/10.1111/j.0435-3676.2004.00214.x>.

Dozier, J. and Marks, D.: Snow mapping and classification from Landsat Thematic Mapper data, *Ann. Glaciol*, 9, 97–103, 1987.

Gómez-Landesa, E. and Rango, A.: Operational snowmelt runoff forecasting in the Spanish Pyrenees using the snowmelt runoff model, *Hydrol. Process.*, 16, 1583–1591, 2002.

Gonseth C. 2013. Impact of snow variability on the Swiss winter tourism sector: implications in an era of climate change. *Clim. Change* 119: 307–320. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0718-3>.

Hall, D. and Riggs, G.: Accuracy assessment of the MODIS snow products, *Hydrol. Process.*, 21, 1534–1547, 2007.

Hall, D. K. and G. A. Riggs. 2020. MODIS/Terra CGF Snow Cover Daily L3 Global 500m SIN Grid, Version 61. [Indicate subset used]. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD10A1F.061>.

Hall, D., Riggs, G., and Salomonson, V.: MODIS/Aqua Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid V005, National Snow and Ice Data Center, Boulder, Colorado, USA, 2007.

Hall, D., Riggs, G., Salomonson, V., DiGirolamo, N., and Bayr, K.: MODIS snow-cover products, *Remote Sens. Environ.*, 83, 181–194, 2002.

Jonas T, Geiger F, Jenny H. 2008a. Mortality pattern of the Alpine Chamois: the influence of snow-meteorological factors. *Ann. Glaciol.* 49: 56–62, <https://doi.org/10.3189/172756408787814735>.

Jonas T, Rixen C, Sturm M, Stöckli V. 2008b. How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability. *J. Geophys. Res.* 113: G03013, <https://doi.org/10.1029/2007JG000680>.

Knowles, N., M. D. Dettinger, and D. R. Cayan. 2006. Trends in snowfall versus rainfall in the western United States. *Journal of Climatology* 19:4545–4559.

Lasanta T, Laguna M, Vicente-Serrano SM. 2007. Do tourism-based ski resorts contribute to the homogeneous development of the Mediterranean mountains? A case study in the Central Spanish Pyrenees? *Tour. Manage.* 28(5): 1326–1339, <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2007.01.003>.

López-Moreno JI, García-Ruiz JM, Beniston M. 2008a. Environmental Change and water management in the Pyrenees. Facts and future perspectives for Mediterranean mountains. *Global Planet. Change* 66(3–4): 300–312, <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2011.03.031>.

López-Moreno JI, García-Ruiz JM. 2004. Influence of snow accumulation and snowmelt processes on the distribution of streamflow in the central Spanish Pyrenees. *J. Hydrol. Sci.* 49: 787–802. Disponible, en junio de 2022 en: [https://www.researchgate.net/publication/200471722\\_Influence\\_of\\_snow\\_accumulation\\_and\\_snowmelt\\_on\\_streamflow\\_in\\_the\\_Central\\_Spanish\\_Pyrenees](https://www.researchgate.net/publication/200471722_Influence_of_snow_accumulation_and_snowmelt_on_streamflow_in_the_Central_Spanish_Pyrenees)

López-Moreno JI, Goyette S, Beniston M. 2009. Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: horizontal spatial variability and vertical gradients. *J. Hydrol.* 347: 284–396, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.049>.

Parajka, J. and Blöschl, G.: Validation of MODIS snow cover images over Austria, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 679–689, <https://doi.org/10.5194/hess-10-679-2006>, 2006.

Parajka, J., Holko, L., Kostka, Z., and Blöschl, G.: MODIS snow cover mapping accuracy in a small mountain catchment – comparison between open and forest sites, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 16, 2365–2377, <https://doi.org/10.5194/hess-16-2365-2012>, 2012.

Rango, A.: II. Snow hydrology processes and remote sensing, *Hydrol. Process.*, 7, 121–138, 1993.

Rittger, K., Painter, T. H., and Dozier, J.: Assessment of methods for mapping snow cover from MODIS, *Adv. Water Resour.*, 51, 367–380, 2013.

Scott D, McBoyle G. 2007. Climate change adaptation in the ski industry. *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Change*. Disponible, en junio de 2022 en: [https://www.researchgate.net/publication/225741151\\_Climate\\_change\\_adaptation\\_in\\_the\\_ski\\_industry\\_Mitig\\_Adapt\\_Strat\\_Glob\\_Change](https://www.researchgate.net/publication/225741151_Climate_change_adaptation_in_the_ski_industry_Mitig_Adapt_Strat_Glob_Change)

Serquet, G., C. Marty, J. P. Dulex, and M. Rebetez. 2013. Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland. *Geophysical Research Letters* 38: L07703.

Vajda A, Tuomenvirta H, Jokinen P. 2012. Observed and future changes of extreme winter events in Europe with implication for road transportation. In *Proceedings of SIRWEC 16th International Road Weather Conference*, Helsinki, Finland. Disponible, en junio de 2022 en: [https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Vajda/publication/258164651\\_Severe\\_weather\\_affecting\\_European\\_transport\\_systems\\_The\\_identification\\_classification\\_and\\_frequencies\\_of\\_events/links/55645ed908ae9963a11ff8b1/Severe-weather-affecting-European-transport-systems-The-identification-classification-and-frequencies-of-events.pdf?origin=publication\\_detail](https://www.researchgate.net/profile/Andrea-Vajda/publication/258164651_Severe_weather_affecting_European_transport_systems_The_identification_classification_and_frequencies_of_events/links/55645ed908ae9963a11ff8b1/Severe-weather-affecting-European-transport-systems-The-identification-classification-and-frequencies-of-events.pdf?origin=publication_detail)

## **7) ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS**

### **TABLAS**

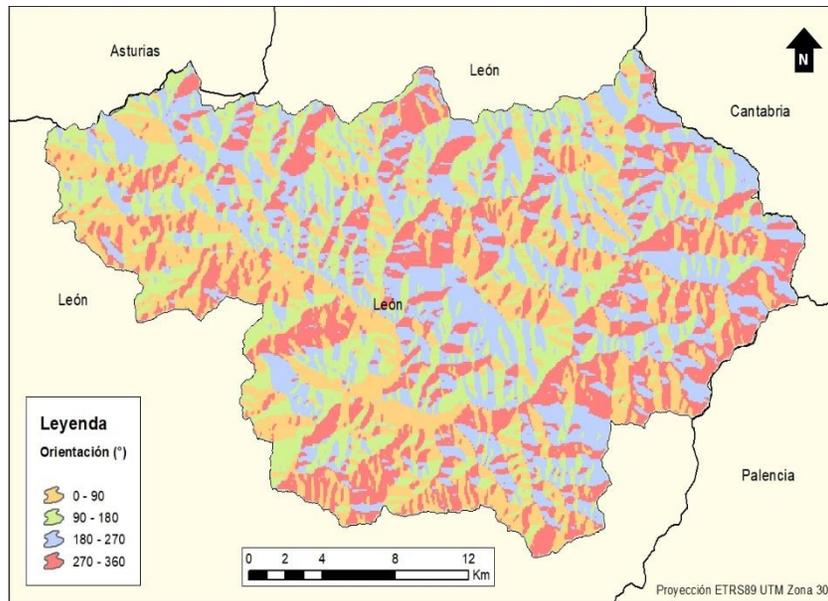
Tabla 1.1 .....	6
Tabla 3.1 .....	15
Tabla 4.1 .....	25
Tabla 4.2.....	25

### **FIGURAS**

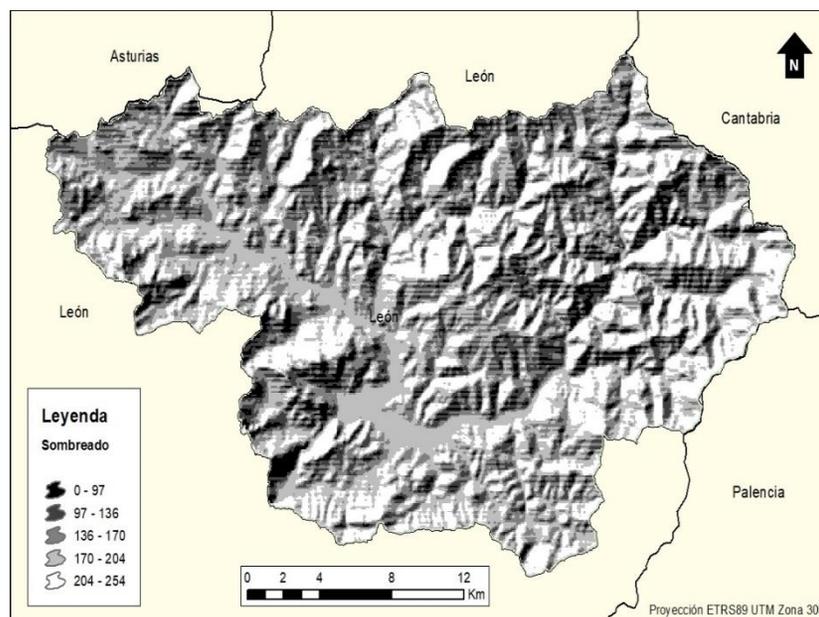
Figura 3.1.....	11
Figura 3.2.....	12
Figura 3.3.....	13
Figura 3.4.....	14
Figura 3.5.....	16
Figura 3.6.....	17
Figura 3.7.....	18
Figura 4.1.....	20
Figura 4.2.....	21
Figura 4.3.....	22
Figura 4.4.....	23
Figura 4.5.....	24
Figura 4.6.....	26
Figura 4.7.....	27
Figura 4.8.....	28
Figura 4.9.....	29
Figura 4.10.....	30
Figura 4.11.....	31
Figura 4.12.....	32
Figura 4.13.....	33
Figura 4.14.....	34
Figura 4.15.....	35

Figura 4.16.....	36
Figura 4.17.....	37
Figura 8.1.....	47
Figura 8.2.....	47
Figura 8.3: .....	48
Figura 8.4.....	48

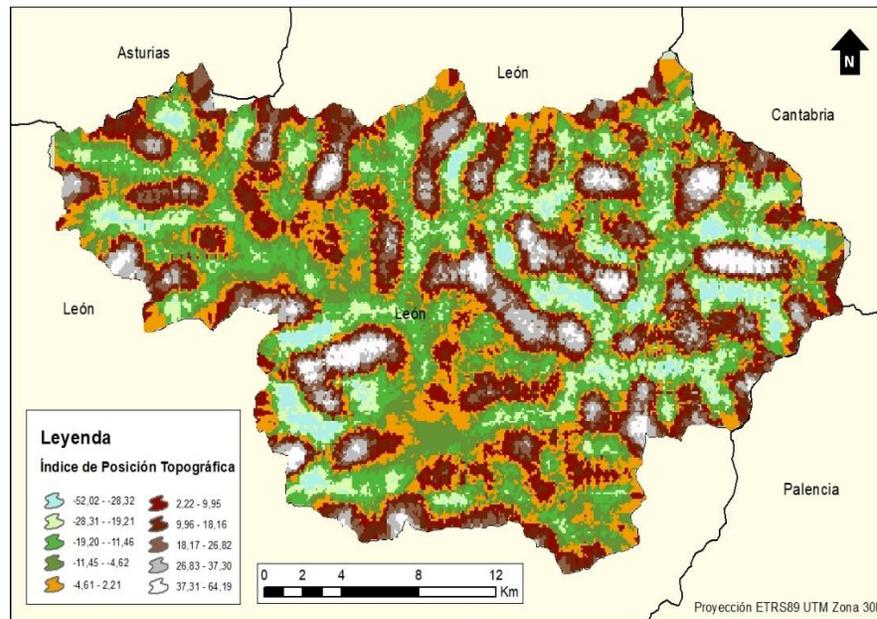
## 8) ANEXOS



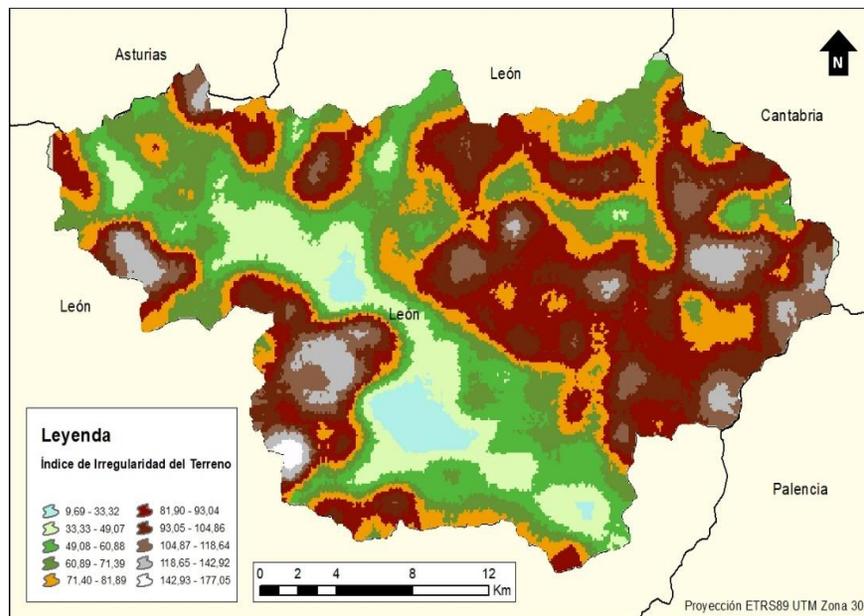
**Figura 8.1:** Mapa de orientaciones de la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de un MDT.



**Figura 8.2:** Mapa de sombreado / roughness de la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de un MDT.



**Figura 8.3:** Índice de Posición Topográfica en la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de un MDT.



**Figura 8.4:** Índice de Irregularidad del Terreno en la cuenca alta del río Esla. **Fuente:** Elaboración propia a partir de un MDT.