



Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos,  
Canales y Puertos.  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# ANÁLISIS DE LA VARIACIÓN DE LA CUBIERTA DE NIEVE Y SUS EFECTOS SOBRE LOS HUMEDALES EN EL PARQUE NACIONAL DE PICOS DE EUROPA Y SU ENTORNO

Trabajo realizado por:  
*Carmen Arias González*

Dirigido:  
*Laura Concostrina Zubiri*  
*Jose Barquín Ortíz*

Titulación:  
**Máster Universitario en Gestión  
Integrada de Sistemas Hídricos**

Santander, septiembre de 2021

**TRABAJO FIN DE MASTER**



## RESUMEN

La cubierta de nieve a nivel global presenta una gran variabilidad en cuanto a tamaño y fenología asociada a la variación estacional de las condiciones climatológicas. Desde hace décadas se han detectado cambios significativos relacionados con el aumento de la temperatura media anual provocado por el calentamiento global. Entre los efectos asociados, se encuentran fenómenos como el incremento de la escorrentía o la variación de la hidrodinámica de los sistemas hídricos próximos. Esta dependencia entre la dinámica nival y los ecosistemas acuáticos de montaña establece como fundamental el seguimiento de las coberturas de nieve para entender mejor la variabilidad de los cuerpos de agua de montaña, así como su funcionamiento ecosistémico y servicios ambientales.

En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo analizar la variación de la cobertura de nieve en el Parque Nacional de Picos de Europa en los últimos años y sus efectos sobre los humedales de la zona.

Para poder llevar a cabo el objetivo principal del trabajo se ha planteado una metodología basada en la utilización de imágenes multiespectrales obtenidas por la constelación de satélites Sentinel-2 y tratadas a partir de la plataforma Google Earth Engine. Para este estudio se han estimado las series temporales de dos índices espectrales: el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) y el Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), utilizados como proxies para obtener información sobre las coberturas de nieve y agua de la zona de estudio, respectivamente.

Una vez aplicada la metodología, se han obtenido resultados de cobertura de nieve mensual, anual y comparativas entre cobertura de nieve y extensión de agua. Tras analizar estos resultados, se ha confirmado que existe una relación entre la variación de cobertura de nieve y la dinámica de los humedales en el Parque Nacional de Picos de Europa.

**Palabras clave:** Google Earth Engine, Humedales, lagos y lagunas, Índice Diferencial Normalizado de Agua (NDWI), Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), Parque Nacional de Picos de Europa.

## ABSTRACT

Snow cover at a global level shows great variability in terms of size and phenology associated with seasonal variation in climatic conditions. Significant changes related to the increase in the average annual temperature caused by global warming have been detected for decades. Associated effects include processes such as the increase in runoff, or the variation on the hydrodynamics of the nearby water systems. This dependence between snow dynamics and mountain aquatic ecosystems establishes as fundamental the monitoring of snow cover to better understand the variability of mountain water bodies, as well as their ecosystem functioning and environmental services.

In this context, the present work aims to analyze the variation in snow cover in the Picos de Europa National Park in recent years and its effects on the wetlands in the area.

In order to carry out the main objective of the work, a methodology based on the use of multispectral images obtained by the constellation of Sentinel-2 satellites and treated from the Google Earth Engine platform has been proposed. For this study, the time series of two spectral indices have been estimated: the Normalized Differential Snow Index (NDSI) and the Normalized Differential Water Index (NDWI), used as indicators to obtain information on the snow and water coverage of the study area, respectively.

Once this methodology has been applied, monthly and annual snow cover results have been obtained and comparative results between snow cover and water extension. After analyzing these results, it has been confirmed there is a relationship between the variation in snow cover and the dynamics of wetlands in the Picos de Europa National Park.

**Keywords:** Google Earth Engine, Normalized Differential Snow Index (NDSI), Normalized Differential Water Index (NDWI), Picos de Europa National Park, Wetlands, lakes y lagoons.

## ÍNDICE

<b>1. Introducción.....</b>	<b>6</b>
<b>1.1 Área de estudio .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.1 Descripción general .....</b>	<b>8</b>
<b>1.1.2 Geomorfología .....</b>	<b>9</b>
<b>1.1.3 Climatología e hidrología .....</b>	<b>10</b>
<b>1.1.4 Flora y fauna .....</b>	<b>11</b>
<b>2. Objetivos .....</b>	<b>11</b>
<b>3. Materiales y métodos.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Materiales .....</b>	<b>11</b>
<b>3.2 Métodos.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.1 Cálculo del NDSI y la cobertura de nieve.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2.2 Cálculo del NDWI y cobertura de agua .....</b>	<b>15</b>
<b>3.2.3 Análisis de la relación entre la cobertura de nieve y la extensión de agua .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Resultados.....</b>	<b>17</b>
<b>4.1 Representación de la variación de la cobertura de nieve.....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.1 Variación de la cobertura de nieve en toda el área de estudio .....</b>	<b>18</b>
<b>4.1.2 Variación de la cobertura de nieve en humedales, lagos y lagunas.....</b>	<b>20</b>
<b>4.2 Análisis de la dinámica de la cobertura de nieve .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.1 Análisis de la tendencia de la cobertura de nieve en humedales .....</b>	<b>24</b>
<b>4.2.2 Análisis de la tendencia de la cobertura de nieve en lagos y lagunas .....</b>	<b>25</b>
<b>4.3 Análisis de la relación entre coberturas de nieve y agua. ....</b>	<b>26</b>
<b>5. Discusión .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Conclusiones .....</b>	<b>30</b>
<b>7. Limitaciones.....</b>	<b>31</b>
<b>7. Posibilidades de mejora.....</b>	<b>32</b>
<b>8. Bibliografía.....</b>	<b>34</b>

# 1. Introducción

El concepto de calentamiento global hace referencia al efecto sobre el clima provocado por diferentes actividades humanas que incrementan el efecto invernadero, como puede ser la quema de combustibles fósiles o la deforestación (Houghton, 2005). Las tendencias del clima son uno de los elementos más estudiados en las últimas décadas debido al creciente interés por el calentamiento global y efectos relacionados (Pons et al., 2010). Este aumento de la temperatura media global es la tendencia más evidente, provocada por la emisión descontrolada de Gases de Efecto Invernadero (GEI; D'Amato & Akdis, 2020) que impiden la salida de la atmósfera de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre (Khasnis & Nettleman, 2005) generando múltiples consecuencias como el calentamiento de los océanos, el derretimiento de las masas de hielo y el aumento del nivel del mar (D'Amato & Akdis, 2020).

En Europa, se ha determinado que las temperaturas sufrirán un ascenso de entre 2.5 y 5.5°C a lo largo de este siglo tras numerosos estudios en diferentes escenarios de emisiones de gases GEI. Esto va a provocar efectos directos sobre las precipitaciones, la nubosidad, la cobertura de nieve y el contenido de agua del suelo, que se verán reducidos en gran medida (Giorgi et al., 2004).

Las cubiertas de nieve están sometidas a una gran variación de tamaño que afecta directamente a los sistemas hidrológicos y meteorológicos (Keikhosravi, 2021). En gran parte del hemisferio norte, los recursos hídricos dependen del almacenamiento natural de agua en fase sólida durante el invierno que se libera durante las épocas más calurosas del año (Diffenbaugh et al., 2013). Es decir, el deshielo es un factor que provoca importantes cambios en el régimen de flujo hídrico, alimentando acuíferos y proporcionando una importante fuente de agua dulce para usos domésticos y agrícolas (Keikhosravi, 2021).

Al constituir las reservas nivales una fuente fundamental de suministro de agua, es necesario un monitoreo continuo de la extensión y tamaño de las cubiertas de nieve (Li et al., 2018) debido a que las condiciones anormalmente cálidas incrementan la tasa de derretimiento y las precipitaciones en forma de lluvia (Stewart, 2009), incrementando el riesgo asociado a crecidas (e inundaciones), roturas de presas (Zhang et al., 2018) e incluso avalanchas (Keikhosravi, 2021). A todo esto hay que añadirle que las zonas montañosas, donde se produce la mayor acumulación de nieve, son las más vulnerables al calentamiento global debido a que la tasa de calentamiento en la troposfera aumenta

con la altitud y, por lo tanto, las temperaturas aumentarán más en las zonas de altitudes elevadas (Schaffhauser et al., 2008). De forma adicional, en el hemisferio norte, especialmente en las áreas de América del Norte, Europa y el Himalaya, se prevé que la ocurrencia de años de nieve extremadamente baja se generalice y que la escorrentía y el deshielo se incrementen considerablemente (Diffenbaugh et al., 2013). Debido a esto, es necesario desarrollar técnicas y analizar metodologías que permitan monitorear la variabilidad de esas capas de nieve y su interacción con el resto de sistemas asociados.

Los humedales son ecosistemas de transición entre los sistemas terrestres y acuáticos donde el nivel freático se encuentra en superficie, o próximo a esta (Mahdavi et al., 2018), y se caracterizan por su alta productividad (Hu et al., 2017). Cubren aproximadamente el 5% de la superficie terrestre, siendo más frecuentes en el hemisferio norte (Nitta et al., 2017) y mejoran la calidad del agua, recargan acuíferos, amortiguan la escorrentía y los efectos de las inundaciones y proporcionan hábitats únicos para diferentes especies de flora y fauna (Guo et al., 2017). En diferentes estudios llevados a cabo en Canadá (Fang & Pomeroy, 2008, Assini & Young, 2012) se ha visto como la variabilidad de las diferentes cubiertas de nieve influye sobre procesos como la escorrentía o evaporación que modifican la hidrología de los ecosistemas lénticos como humedales, lagos o lagunas.

La teledetección es una técnica basada en la obtención de datos de la superficie terrestre a partir de sensores instalados en satélites debido a la interacción electromagnética entre la superficie terrestre y el sensor (Instituto Geográfico Nacional, 2020). Los sensores utilizados registran información de la superficie midiendo la transmisión de energía electromagnética reflectante y radiante (Sivakumar, 2003). Esta técnica es una herramienta muy útil que se ha utilizado ampliamente para investigaciones relacionadas con los recursos hídricos (Zhang et al., 2018). Muchas variables del ciclo hidrológico pueden ser estimadas y analizadas mediante teledetección por satélite (Tang et al., 2009) lo cual ofrece, entre otros aspectos, la posibilidad de examinar diferentes propiedades de la nieve como su variabilidad espacial y temporal, albedo, tamaño de grano e incluso diferenciar entre nieve húmeda y seca (Snapir et al., 2019).

Este tipo de técnicas generan una gran diversidad de datos difíciles de almacenar, administrar y procesar. Es por ello que surgen plataformas que ofrecen una mayor accesibilidad a este tipo de información (Tamiminia et al., 2020). Ejemplo de ello es Google Earth Engine (GEE), plataforma de computación que posee grandes cantidades de imágenes satelitales que permiten cuantificar los cambios en la superficie terrestre

(Zhang et al., 2018). GEE se encuentra alojado en la nube, es de uso libre y cuenta con más de 40 años de datos de detección remota, datos climáticos o datos geofísicos (Tamiminia et al., 2020).

La plataforma permite tratar las imágenes espectrales obtenidas de diferentes misiones como pueden ser Sentinel o Landsat. Concretamente, Sentinel-2 es una misión del Programa Copernicus de la Unión Europea que obtiene imágenes a escala global, proporcionando información a escala global de los ecosistemas terrestres y costeros. La misión está formada por dos satélites, el Sentinel-2A y el Sentinel-2B, lanzados en 2015 y 2017 cuyos sensores incluyen 13 bandas en el espectro visible, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (Liu et al., 2020).

Aplicaciones como el GEE permiten seleccionar las imágenes de las diferentes misiones de un periodo de tiempo determinado y tratarlas en función del objetivo que se pretenda conseguir. Este tratamiento se puede llevar a cabo aplicando diferentes índices espectrales, como puede ser el índice diferencial normalizado de nieve (NDSI, por sus siglas en inglés) que permite determinar la presencia y ausencia de nieve (Wayand et al., 2018). A pesar de la existencia de este tipo de herramientas que facilitan el acceso y tratamiento de cantidades ingentes de información, su uso hasta ahora ha sido muy reducido sobre todo en temas relacionados con el análisis de la variabilidad de la cobertura de nieve y sus efectos sobre los ecosistemas acuáticos adyacentes.

En este contexto, el presente trabajo analizará la variación de la cobertura de nieve y sus efectos sobre diferentes cuerpos de agua como humedales, lagos y lagunas en el Parque Nacional de Picos de Europa y su entorno. A la vista de los resultados de estudios similares, se espera observar una dinámica en la cobertura de nieve cuya variabilidad estacional afecte de forma significativa al tamaño de las masas de agua asociadas, viéndose incrementado en épocas de fusión.

## **1.1 Área de estudio**

### **1.1.1 Descripción general**

El área sobre la que se va a realizar este análisis se centra principalmente en el Parque Nacional de Picos de Europa y su entorno, abarcando con una extensión de 248.529 Ha las cuencas hidrográficas de los ríos Sella, Deva y Cares (Figura 1) (Trueba & Cañadas, 2010). El Parque Nacional de Picos de Europa fue el primer espacio natural declarado como tal en España y está formado por tres macizos que se encuentran situados al norte

de la Cordillera Cantábrica, entre las Comunidades Autónomas de Asturias, Cantabria y Castilla y León. Sus valores históricos, paisajísticos y geomorfológicos dotan de especial singularidad este entorno natural (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

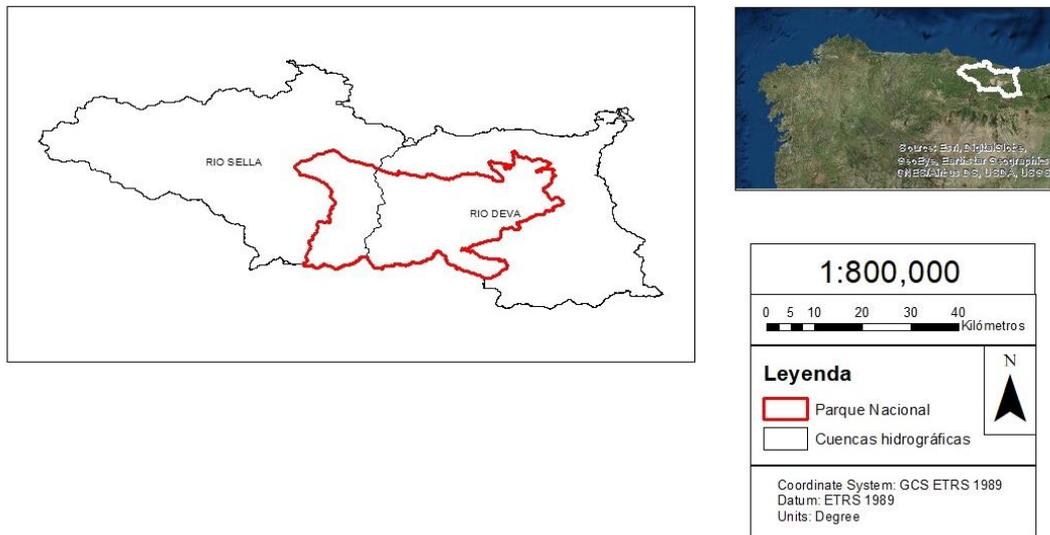


Figura 1. Mapa del área de estudio

Se ha seleccionado esta zona de estudio por ser la correspondiente al proyecto de conservación medioambiental “LIFE DIVAQUA”, que tiene como objetivo principal mantener y mejorar el estado de conservación de los hábitats y las especies de interés comunitario descritas en la Directiva Hábitats que aparecen en los ecosistemas acuáticos continentales de las cuencas que drenan el Parque Nacional de Picos de Europa (Programa Life, 2021).

### 1.1.2 Geomorfología

La altitud del área de estudio varía desde los 2.648 hasta los 0 msnm, lo que da un rango altitudinal muy amplio que dota a la zona de una gran diversidad de paisajes como pueden ser grandes masas boscosas, pastizales o roquedos.

La singular geomorfología que actualmente se observa en la zona de estudio ha sido originada por dos procesos que durante millones de años han ido originando y esculpiendo lo que actualmente conocemos como el Parque Nacional de Picos de Europa. El primero fue la actividad orogénica del Carbonífero y Terciario que hace unos 300 millones de años originó la cadena montañosa compuesta de calizas provenientes de los fondos marinos. Este entorno actualmente está formado por tres macizos entre cuyos cañones discurren los principales ríos de la zona. Además de la

orogenia alpina, el periodo glacial también ha influido sobre la geomorfología de Picos de Europa. Este proceso estuvo dominado por periodos interglaciares templados y lluviosos y épocas más frías donde se formaban los sistemas glaciares más importantes de la zona (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2021).

A pesar de que el periodo glacial ha sido reciente geológicamente hablando (abarca los dos últimos millones de años), la actividad glacial actualmente en esta zona es meramente testimonial (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

### **1.1.3 Climatología e hidrología**

En la zona de estudio domina un clima atlántico donde las temperaturas se caracterizan por ser predominantemente templadas. En cuanto a la precipitación, esta puede llegar a en algunas zonas altas a valores de 2.500 mm anuales y en zonas más bajas a los 1.200 mm (Confederación Hidrográfica del Cantábrico, 2021) .

Cabe destacar que la climatología de la zona de estudio está muy marcada por la presencia de la Cordillera Cantábrica, que, debido al gradiente altitudinal, genera una cierta variabilidad climática. Ejemplo de ello son las precipitaciones, en la vertiente norte son mucho más abundantes debido a la presencia del frente montañoso que impide que las masas de aire cargadas de humedad que provienen del Cantábrico pasen a la parte sur del sistema montañoso favoreciendo su descarga en la parte norte (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

Lo mismo ocurre con las temperaturas, en las zonas más bajas las temperaturas tienden a ser más suaves que en las zonas elevadas (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

En cuanto a la hidrología, como ya se ha mencionado anteriormente, la zona se caracteriza por la presencia de tres ríos principales como son el Sella, Cares y Deva.

A pesar de las elevadas precipitaciones que se dan en las zonas más elevadas, la presencia de cuerpos de agua superficiales es muy reducida debido a la naturaleza kárstica del macizo de los Picos de Europa que favorece una gran infiltración del agua con la presencia de cursos de agua subterráneos.

Aun así, es importante destacar la presencia de algunos humedales, lagos y lagunas vinculados en gran medida a los procesos glaciares que allí se dieron (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

### **1.1.4 Flora y fauna**

La diversidad, tanto climática como geomorfológica, favorece el desarrollo de ecosistemas muy diferentes a lo largo de toda la zona de estudio. Esto provoca a su vez la presencia de una gran cantidad especies florísticas y faunísticas.

Sólo en la zona del Parque Nacional han sido catalogadas más de 1750 especies y subespecies de flora vascular, lo que supone el 21% de la flora vascular española.

Por último, en cuanto a la fauna, la diversidad de hábitats la presencia de multitud de especies desde invertebrados hasta superpredadores (Parque Nacional Picos de Europa, 2016).

## **2. Objetivos**

El objetivo del presente estudio consiste en analizar la variación de la cobertura de nieve en el Parque Nacional de Picos de Europa en los últimos años, así como los posibles efectos sobre el hidropereodo de los ecosistemas lénticos (humedales, lagos y lagunas) de la zona.

Para alcanzar el objetivo principal se han establecido una serie de objetivos específicos:

1. Selección de variables derivadas de sensores remotos y umbrales de reclasificación para la obtención de la cobertura de nieve a través de la plataforma GEE.
2. Elaborar mapas que representen los cambios espaciales y temporales en las cubiertas de nieve.
3. Analizar la tendencia de la cobertura de nieve a lo largo del periodo de estudio.
4. Examinar la relación entre la variabilidad de la cobertura de nieve y sus efectos sobre los humedales, lagos y lagunas de la zona de estudio.

## **3. Materiales y métodos**

### **3.1. Materiales**

Durante el desarrollo de este trabajo se han utilizado tres herramientas principales de generación y tratamiento de imagen procedente de sensores remotos y otra información geoespacial, concretamente GEE (Google, 2021), ArcGIS (ESRI, 2019) y R Studio (R Core Team, 2013). Google Earth Engine, como ya se ha mencionado anteriormente, es una herramienta que facilita el tratamiento de grandes cantidades de información

facilitando la descarga de imágenes satelitales y su procesamiento. Es decir, proporciona datos e información que son exportados para su posterior representación, análisis e interpretación con programas como el ArcGIS y R Studio.

Además, ha sido necesario contar con diferentes tipos de datos que facilitasen la obtención de los resultados que se expondrán más adelante.

La información que se ha utilizado se puede clasificar en dos grupos:

1. Datos obtenidos mediante técnicas de teledetección, es decir, imágenes multiespectrales de la misión Copernicus Sentinel-2 de reflectancia TOA nivel 1C para un periodo de tiempo de cuatro años, entre 2017 y 2020.
2. Información cartográfica de la zona de estudio, proporcionada por el proyecto LIFE DIVAQUA del Instituto de Hidráulica Ambiental. Dentro de esta información se cuenta con:
  - Capa vectorial con los límites de la zona de estudio y delimitada por clústeres (Figura 2) (i.e., división de la zona de estudio en diez sub-zonas basada en una geomorfología de terreno similar; clústeres, de aquí en adelante).

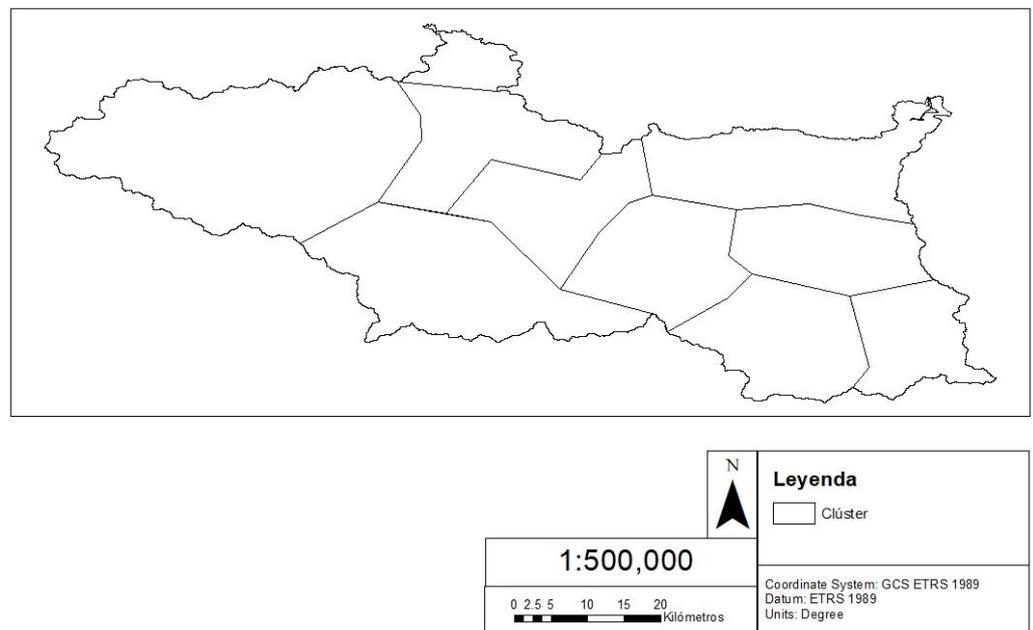


Figura 2. Mapa de la zona de estudio dividida en clústeres.

- Capa vectorial con los cuerpos de agua delimitados (Figura 3) existentes en la zona de estudio (masas de agua, de aquí en adelante).

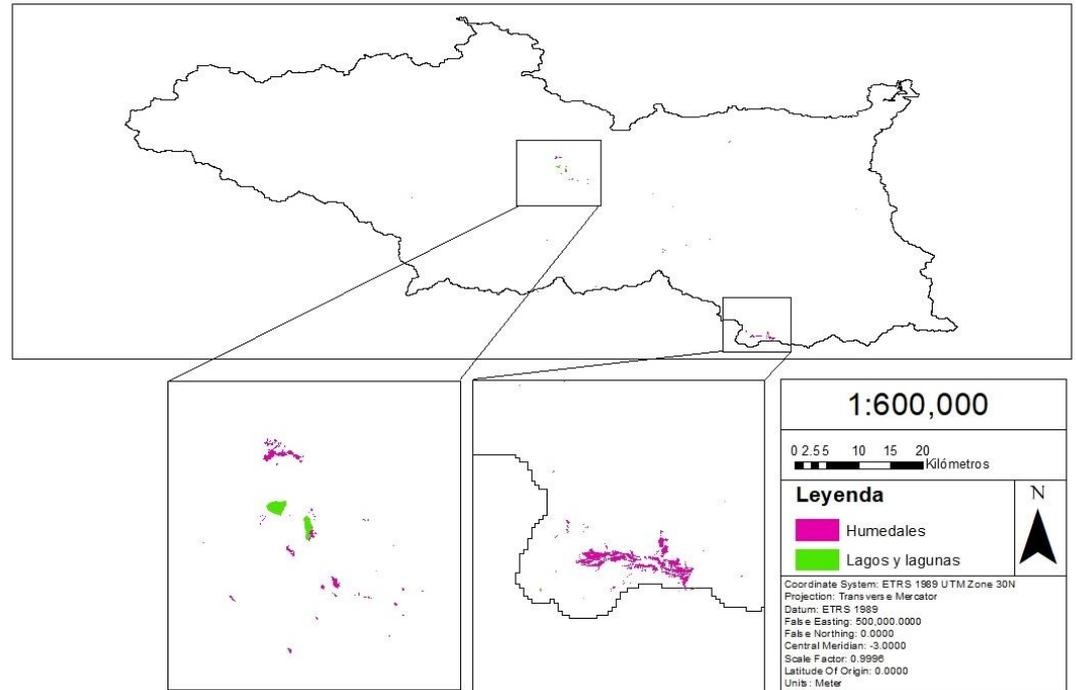


Figura 3. Mapa de las masas de agua presentes en la zona de estudio. Los paneles inferiores muestran dos zonas ampliadas a modo de ejemplo.

- Serie temporal (2017-2020) de capas ráster con información sobre la presencia y ausencia de agua (según los valores del NDWI) en los diferentes humedales, lagos y lagunas analizados a lo largo de los cuatro años de estudio, obtenida previamente en el marco del proyecto “LIFE DIVAQUA”.

### 3.2 Métodos

Para la consecución de los objetivos propuestos en este trabajo, se llevaron a cabo tres etapas principales que se detallan a continuación.

#### 3.2.1 Cálculo del NDSI y la cobertura de nieve

El NDSI es uno de los métodos más utilizados para delimitar la cobertura de nieve de una zona determinada. Este índice es una medida de la diferencia de reflectancia entre el rango visible del espectro (Green) y el infrarrojo de onda corta (SWIR) (Kulkarni et al., 2002).

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR} = \frac{Banda 3 - Banda 11}{Banda 3 + Banda 11}$$

Este índice da como resultado un valor por píxel comprendido entre -1 y 1. Los píxeles con un valor superior a 0 se considera cobertura de nieve; un valor inferior identifica otro tipo de superficies. El cálculo de este índice en la zona de estudio se ha llevado a cabo a partir de la herramienta GEE y su interfaz de desarrollo. Esta parte del programa permite introducir una serie de scripts (códigos) que seleccionan las bandas de interés, aplican el tratamiento oportuno y en este caso, proporcionen un valor de cobertura de nieve (km<sup>2</sup>).

Para poder obtener ese valor de cobertura, el flujo de trabajo del GEE tuvo varias etapas:

1. Delimitar la zona de estudio sobre la que aplicar el índice cargando la máscara correspondiente (capas vectoriales de clústeres o masas de agua).
2. Seleccionar la fuente de imágenes multispectrales, en este caso los satélites Sentinel-2A&2B, que proporciona imágenes con una resolución temporal de 4-5 días y una resolución espacial de 20 metros. La cantidad de imágenes que se utilizaron fueron todas las disponibles durante el periodo de estudio.
3. Determinar el porcentaje de nubes presente en las imágenes de satélite que se acepta, en este caso se utilizaron imágenes que tuvieran menos del 20% de cobertura nubosa para optimizar los análisis de cambios.
4. Calcular el índice con las bandas correspondientes, en este caso la banda 3 (verde) y banda 11 (onda corta infrarroja).
5. Establecer el umbral del índice a partir del cual se considera que los píxeles contienen cobertura nival. Este valor se ha determinado tras hacer una revisión bibliográfica y comprobar los resultados obtenidos al aplicar un  $NDSI > 0$  y  $NDSI > 0.4$ . Finalmente se seleccionó un  $NDSI > 0.4$  debido a que con valores inferiores en algunos puntos las masas de agua se consideraban zonas cubiertas de nieve y por lo tanto se obtenían resultados erróneos.
6. Por último, una vez generada la capa con la cobertura de nieve media mensual, se calculó la extensión (km<sup>2</sup>) de la misma en el GEE para realizar posteriormente los análisis de comparación con la dinámica de hidropéridos de los cuerpos lénticos. La información sobre la cobertura de nieve presente en el área de estudio se extrajo de tres formas diferentes:
  - Cobertura de nieve del área total de estudio a nivel mensual, que se utilizó para generar los mapas (apartado 4.1.1).

- Cobertura de nieve media mensual presente en los dos tipos de masas de agua estudiadas, i.e. humedales y, por otro lado, lagos y lagunas, utilizando la capa vectorial de masas de agua (Figura 3). Con ella se extrajo, por separado, el área (km<sup>2</sup>) de humedales y lagos y lagunas cubierta de nieve en el GEE, y se calculó, posteriormente, el porcentaje del área cubierta de nieve para cada tipo de masa de agua respecto al área total de las mismas (apartados 4.1.2 y 4.2).
- Cobertura de nieve media mensual a nivel de clúster, utilizando la capa vectorial de clústeres (Figura 2). De esta manera se obtuvieron los datos medios para cada mes del periodo de estudio de cobertura de nieve presente en cada clúster; por ejemplo, para el mes de enero de 2017 se extrajeron 10 datos de cobertura de nieve, uno de cada clúster. Esta información se utilizó para analizar la relación de la cobertura de nieve con la cubierta de agua (apartado 4.3).

### 3.2.2 Cálculo del NDWI y cobertura de agua

La extensión de la cobertura de agua, como ya se ha mencionado anteriormente, se ha obtenido a partir de la serie temporal de capas ráster (previamente procesada en el marco del proyecto “LIFE DIVAQUA”) que contenían información sobre el NDWI. Este índice está asociado a la presencia de agua y zonas con elevada saturación de humedad, y se calcula como la diferencia de reflectancia entre el rango visible del espectro (Green) y el infrarrojo cercano (NIR) (Qiao et al., 2012).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 8}{Banda\ 3 + Banda\ 8}$$

Las capas ráster utilizadas fueron generadas a partir de una serie de imágenes satelitales obtenidas en diferentes fechas (Tabla 1) a lo largo de todo el periodo de estudio. Estas fechas fueron las siguientes:

Tabla 1. Fechas de las imágenes utilizadas para calcular el NDWI.

Año	Fechas				
2017	12/04	22/04	21/06	20/08	09/10
2018	17/04	16/06	20/08	24/10	
2019	12/04	01/06	19/09		
2020	26/05	30/07	03/09	13/09	28/09

Concretamente, las capas ráster utilizadas para este trabajo ya habían sido previamente reclasificadas para cada tipo de masa de agua por separado (i.e. humedales y lagos y lagunas) de forma que contenían píxeles con valores 1 o 0; los píxeles con valor 1 indican presencia de agua en los humedales o lagos y lagunas, y los píxeles con valor 0 indican ausencia de agua.

Con esta información se ha hecho un recuento del número de píxeles que presentaban un valor de 1 para cada tipo de masa de agua presente en el área de estudio usando el software ArcGis Desktop 10.7.1 (ESRI, 2019) y conociendo el tamaño de píxel de las capas ráster originales (10 metros) se ha obtenido el área total de humedales o lagos y lagunas cubiertos de agua.

### 3.2.3 Análisis de la relación entre la cobertura de nieve y la extensión de agua

Para evaluar la variación de la cubierta de nieve afecta a la extensión de agua de las diferentes masas de agua se realizó un análisis de la varianza (ANOVA). Para poder llevarlo a cabo se han seguido una serie de pasos:

- Primero, dividir los meses del año en dos periodos en función de los datos obtenidos de cobertura de nieve en el presente trabajo (Tabla 2): i) periodo de nieve, comprendido entre los meses de octubre y de mayo del año siguiente, ambos incluidos, y ii) periodo de agua, en el que la cobertura de nieve desaparece o es muy baja (<1%), comprendido entre los meses de junio a septiembre, ambos incluidos, y después, obtener la cobertura de nieve y agua acumulada para cada uno de los periodos a lo largo del tiempo de estudio y a nivel de clúster. Es decir, para cada año se obtendrían dos datos, uno de cobertura de nieve y otro de cobertura de agua, con un tamaño de muestra de  $n=10$ .

Tabla 2. Distribución de los periodos de nieve y agua a lo largo de los cuatro años de estudio.

Año	Periodo de nieve	Periodo de agua
2017	Enero – Mayo (2017)	Junio – Septiembre (2017)
2018	Octubre – Diciembre (2017) Enero – Mayo (2018)	Junio – Septiembre (2018)
2019	Octubre – Diciembre (2018) Enero – Mayo (2019)	Junio – Septiembre (2019)
2020	Octubre – Diciembre (2019) Enero – Mayo (2020)	Junio – Septiembre (2020)

- Una vez construida la base de datos, se verificó si la distribución de los datos de las variables independiente (cobertura de nieve) y dependiente (extensión de agua) eran normales usando el software R Studio. Para ello se realizó un test de Shapiro Wilk, en el que se observó que la distribución de los datos no era normal y por lo tanto se transformaron los datos calculando su raíz cuadrada, lo que permitió que cumplieran esta condición.
- Por último, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) mediante la función “anova” perteneciente al paquete car (R Core Team, 2013), y se evaluó el efecto de los cambios en la cobertura de nieve sobre los cambios en la extensión de agua. El modelo utilizado tuvo la siguiente estructura: la extensión de agua (variable dependiente) depende del tiempo (i.e., año de estudio) y de la cobertura de nieve, así como de la interacción entre ambos factores (tiempo y cobertura de nieve).

## 4. Resultados

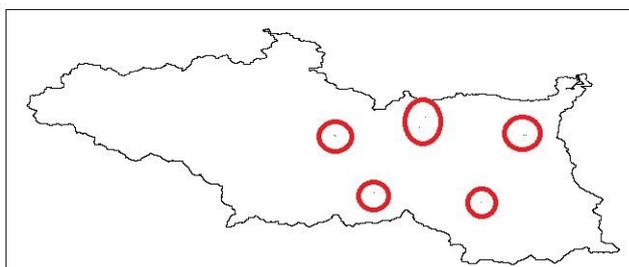
Los análisis realizados han generado una colección de resultados que se muestran a continuación, en diferentes secciones. La primera, en la que se analizará la variación de la cobertura de nieve en toda el área de estudio y en las diferentes masas de agua (humedales, lagos y lagunas), la segunda en la que se analizará la dinámica de la cobertura de nieve en ambos tipos de masas de agua y por último una tercera en la que se analizará la relación entre la cobertura de nieve y la extensión de agua en humedales.

## 4.1 Representación de la variación de la cobertura de nieve

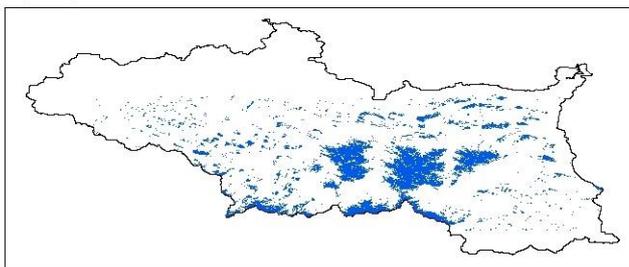
A continuación, se analiza la variación de la cobertura de nieve en toda el área de estudio (capa vectorial de toda el área de estudio) y por tipo de masas de agua (capa vectorial de humedales y lagos y lagunas) durante el periodo 2017-2020.

### 4.1.1 Variación de la cobertura de nieve en toda el área de estudio

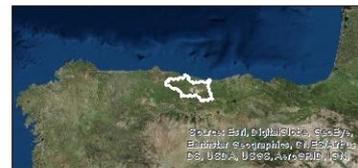
La mayor cobertura de nieve acumulada que ha podido observarse se encuentra en la parte central y sur de la zona de estudio, a diferencia de la parte norte de menor altitud, más próxima al mar y con una menor altitud. El análisis del mes con menor cobertura de nieve (i.e. año 2017, mes de mayo), ha permitido detectar que la cobertura nival se concentra zonas muy puntuales como en la localidad de Potes (círculo rojo de la parte inferior derecha) o en La Hermida (círculo rojo de la parte superior derecha) (Figura 4, Mapa 1), mientras que el análisis del máximo observado (i.e. mes de febrero) muestra una acumulación continua en la zona de mayor altitud, es decir, en los tres macizos que forman los Picos de Europa (Figura 4, Mapa 2).



Mapa 1. Mapa de cobertura de nieve mínima



Mapa 2. Mapa de cobertura de nieve máxima



Mapa 3. Mapa de la ubicación de la zona de estudio.

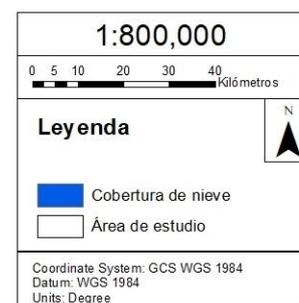
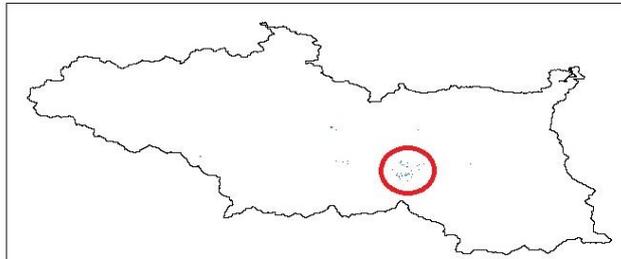


Figura 4. Mapa de cobertura de nieve mínima (mayo, Mapa 1, arriba) y máxima (febrero, Mapa 2, abajo) para el año 2017.

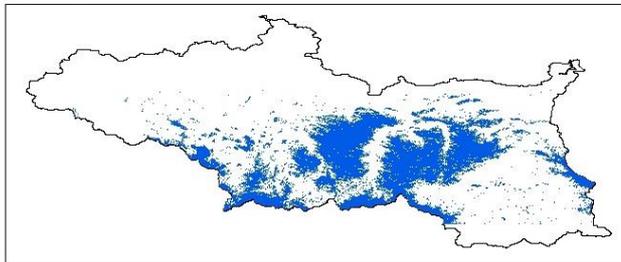
En el año 2018 (Figura 5) los valores tanto máximos como mínimos de cobertura de nieve son mayores a los observados el año anterior (Figura 4). En el mes de mayo (Figura 5, Mapa 1) la cantidad de nieve es mínima concentrándose en el macizo central

de Picos de Europa, es decir, en la zona de mayor altitud del área de estudio (señalado en el círculo rojo).

Para el mes de febrero (Figura 5, Mapa 2) la cobertura de nieve tiene un patrón de distribución muy semejante al del año anterior, es decir, se encuentra concentrada en la parte central y sur del área de estudio.



Mapa 1. Mapa de cobertura de nieve mínima



Mapa 2. Mapa de cobertura de nieve máxima



Mapa 3. Mapa de la ubicación de la zona de estudio.

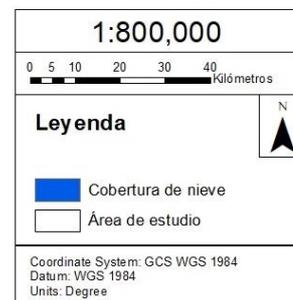
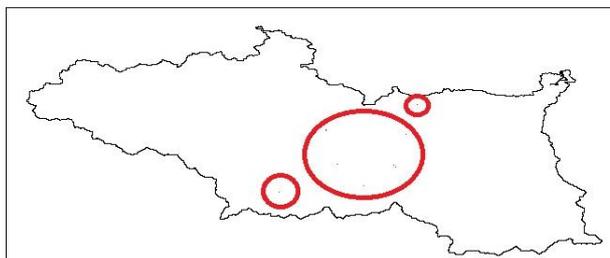
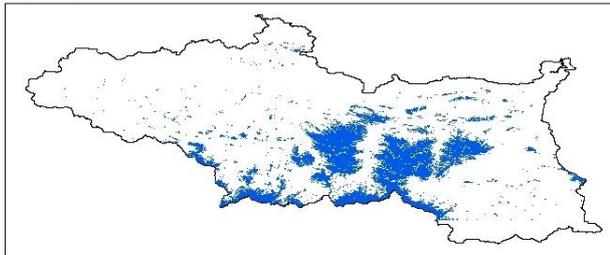


Figura 5. Mapa de cobertura de nieve mínima (mayo, Mapa 1, arriba) y máxima (febrero, Mapa 2, abajo) para el año 2018.

En el año 2019 (Figura 6) la cubierta de nieve tanto para ambos meses se reduce en comparación con el año 2018 (Figura 5), pero es ligeramente superior que en 2017 (Figura 4). En cuanto a la distribución de la capa de nieve (Figura 6), el patrón es el mismo que en los años anteriores.



Mapa 1. Mapa de cobertura de nieve mínima



Mapa 2. Mapa de cobertura de nieve máxima



Mapa 3. Mapa de la ubicación de la zona de estudio.

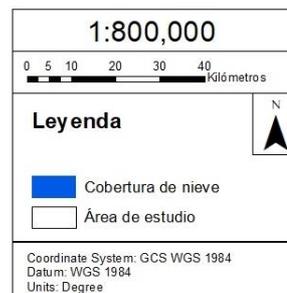


Figura 6. Mapa de cobertura de nieve mínima (mayo, Mapa 1, arriba) y máxima (febrero, Mapa 2, abajo) para el año 2019.

Por último, para el año 2020 (Figura 7) se observa una cobertura de nieve de menor tamaño para ambos meses de todo el periodo de estudio. En este caso, en el mes de febrero (Figura 7, Mapa 2) se puede ver como la cobertura de nieve se extiende ligeramente hacia el norte desde las zonas de mayor cantidad observada en la cadena montañosa ubicada en el centro y sur del área de estudio.

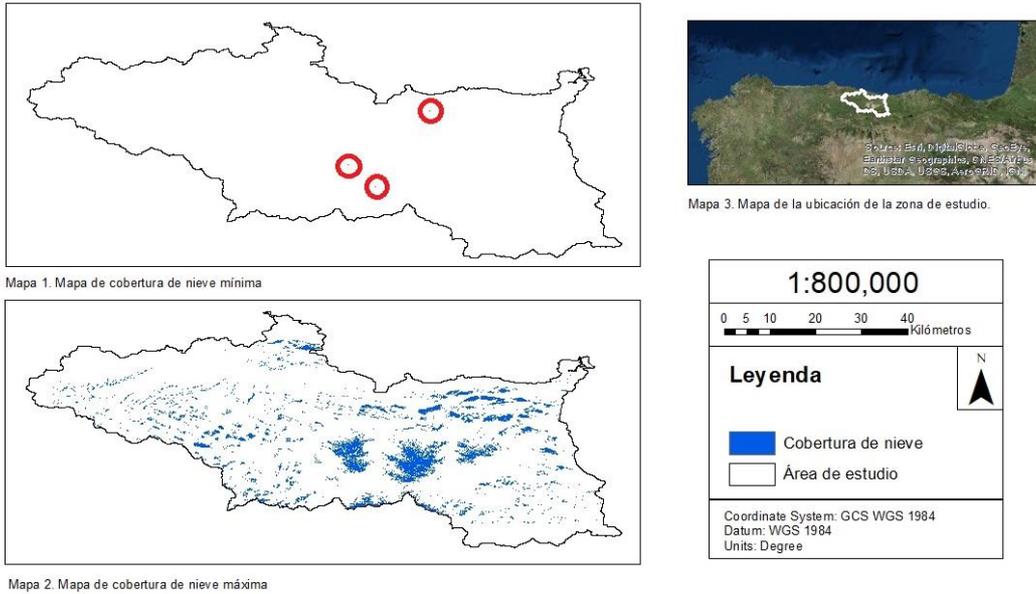


Figura 7. Mapa de cobertura de nieve mínima (mayo, Mapa 1, arriba) y máxima (febrero, Mapa 2, abajo) para el año 2020.

#### 4.1.2 Variación de la cobertura de nieve en humedales, lagos y lagunas

En el caso de los humedales, los resultados obtenidos muestran que, en el mes de febrero de los años 2018 y 2019, el 100% del área total de humedales se encuentra cubierta de nieve (Figura 8). Para los tres primeros años, los valores de cobertura de nieve en los primeros meses superan el 75%. En 2020, sin embargo, la cobertura de nieve en los humedales los primeros meses del año no supera el 20% de su área total.

Para todos los años (Figura 8) se llega al porcentaje máximo de cobertura de nieve en el mes de febrero, pero en el año 2017 el deshielo se produce a una velocidad mayor que en el resto de años. En los meses de verano, la cobertura de nieve en los humedales desaparece y en los meses finales del año se observan de nuevo precipitaciones en forma de nieve. Finalmente, esta se vuelve a acumular superando el 90% del área de humedales cubierta de nieve en la mayor parte de los años. Cabe destacar el año 2018, donde la nieve empezó a acumularse en el mes de octubre, un mes antes que en el resto de años.

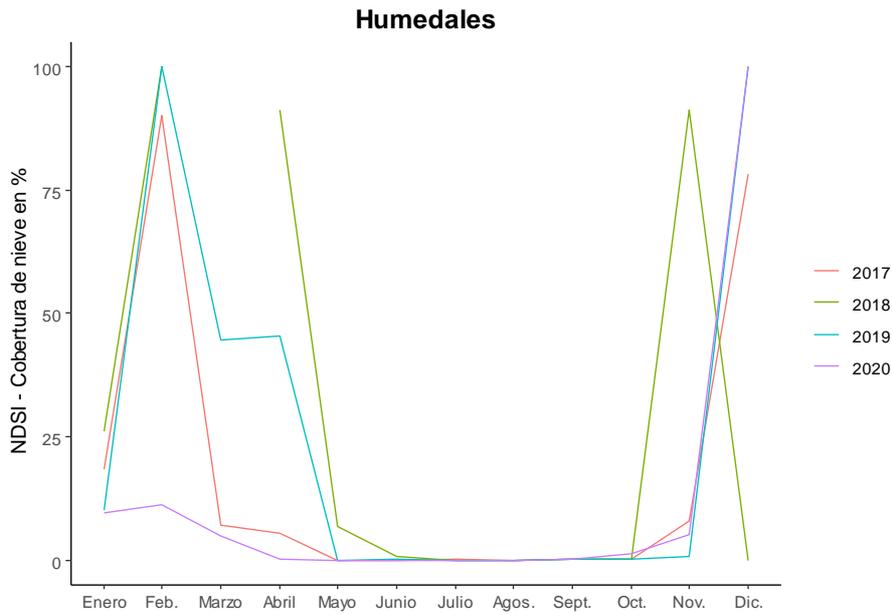


Figura 8. Gráfico del porcentaje de humedales con cobertura de nieve.

La cobertura media de nieve varía considerablemente a lo largo de los cuatro años del periodo de estudio. Para los humedales (Figura 9), si se compara la cobertura media de nieve de los tres últimos años de estudio respecto del primero (2017), se obtiene que para el 2018, se produce un incremento del 60% de la cobertura de nieve. En el 2019, la cobertura media de nieve también es un 49% superior al primer año. Por último, el último año la cobertura de nieve media disminuye un 34% respecto del 2017.

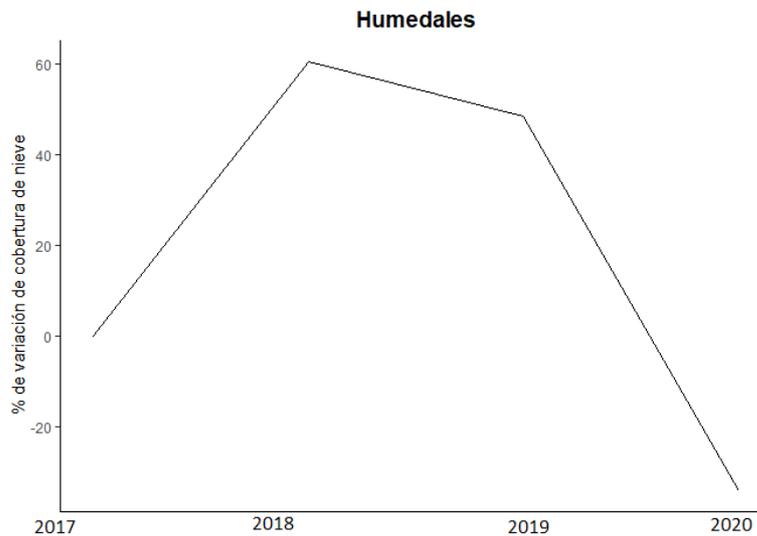


Figura 9. Gráfica del porcentaje de variación de la cobertura de nieve respecto al primer año para humedales.

La media mensual de cobertura de nieve (Figura 10) en el humedal llega a su valor máximo en el mes de febrero, alcanzando el 80%. Los valores mínimos se observan en los meses de verano y cabe destacar que para el mes de marzo de 2018 no se pudo

obtener la extensión de la cobertura de nieve por la falta de información que cumpliera con nuestros requisitos de adquisición de imágenes (i.e., todas las imágenes correspondientes a ese periodo de estudio tenían un porcentaje de nubes mayor al 20%), por eso este mes no se representa.

En los meses donde la cobertura de nieve es mayor (febrero, abril, noviembre y diciembre), existen una mayor variabilidad en la cubierta de nieve (i.e., mayor error estándar) entre los diferentes años de estudio que en los meses de menor cobertura (mayo, junio, julio, agosto y septiembre).

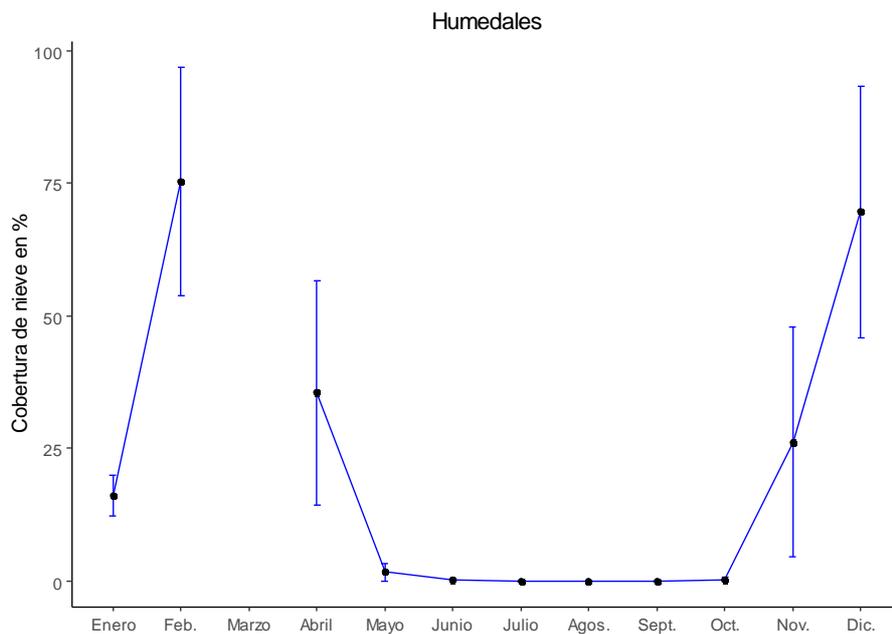


Figura 10. Gráfica de la media mensual del % de humedal cubierto de nieve.

El otro tipo de masas de agua a analizar son los lagos y las lagunas. Estos se diferencian de los humedales debido a que los lagos y las lagunas son ecosistemas de aguas retenidas caracterizados por la presencia temporal o permanente de una lámina de agua abierta y los humedales como ya se mencionó anteriormente, son ecosistemas de transición entre el medio terrestre y acuático que presentan características definitorias, lo que permite la diferenciación entre ambos ambientes (Barrera, 2015).

En el caso de los lagos y las lagunas (i.e., periodos nieve vs. agua claramente diferenciables, Figura 11) la variabilidad de la cobertura de nieve es mucho mayor que en el caso de los humedales (Figura 10). No existe una estacionalidad tan marcada (Figura 11), aunque se aprecian valores más elevados en los meses iniciales y finales del año y valores más bajos en los meses centrales.

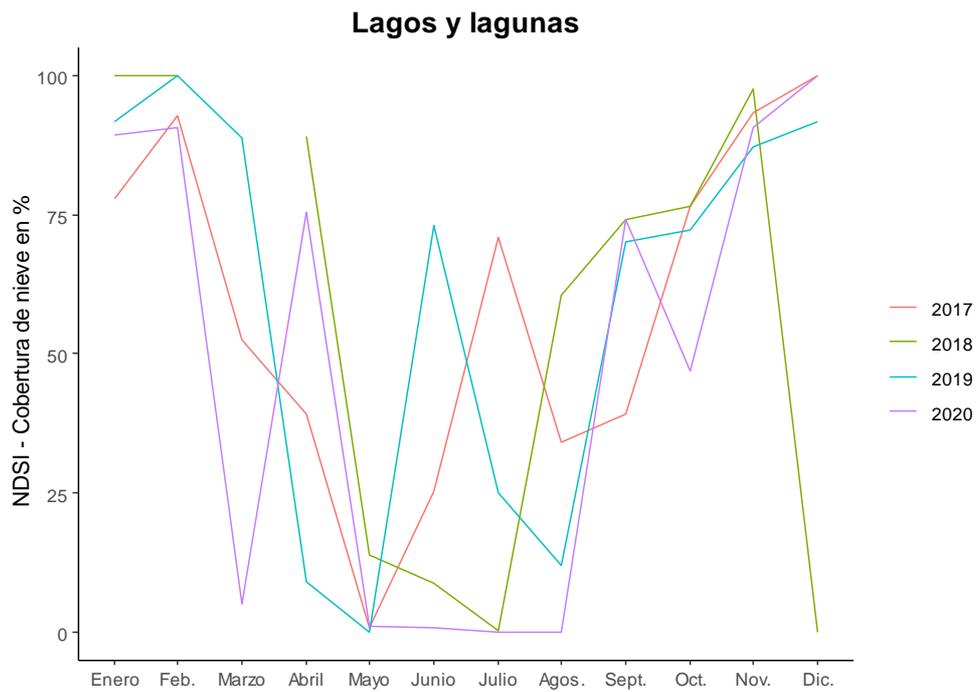


Figura 11. Gráfico del porcentaje de lagos y lagunas con cobertura de nieve.

En cuanto al porcentaje de variación de la cobertura de nieve en lagos y lagunas de los años 2018, 2019 y 2020 respecto del primer año (Figura 12), se puede observar como la cobertura disminuye los tres años. Para el 2018 se produce un descenso de la cobertura de nieve del 10% respecto del 2017. En el 2019 la cobertura media de nieve se incrementa otra vez, pero si se compara con el 2017, esta cobertura es un 1.17% más pequeña. Por último, para el año 2020, la cobertura media de nieve es un 20.44% más pequeña que en 2017.

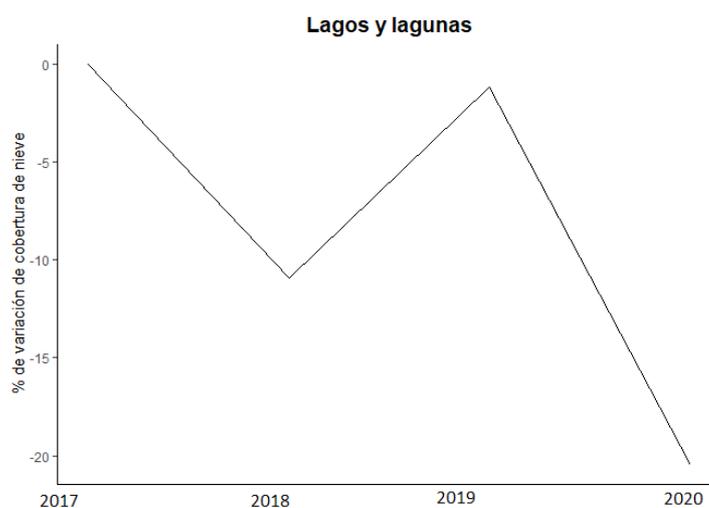


Figura 12. Gráfica del porcentaje de variación de la cobertura de nieve respecto al primer año para humedales.

La media mensual de la cobertura de nieve en lagos y lagunas muestra una estacionalidad marcada y clara (Figura 13). El mes con un valor mínimo de cobertura coincide con el mes de mayo y el mes con el valor máximo es el mes de febrero. Por último, en el caso de los lagos y lagunas la variabilidad del porcentaje de cobertura de nieve en los meses de menor cobertura es, de forma general, mayor que en los de mayor cobertura.

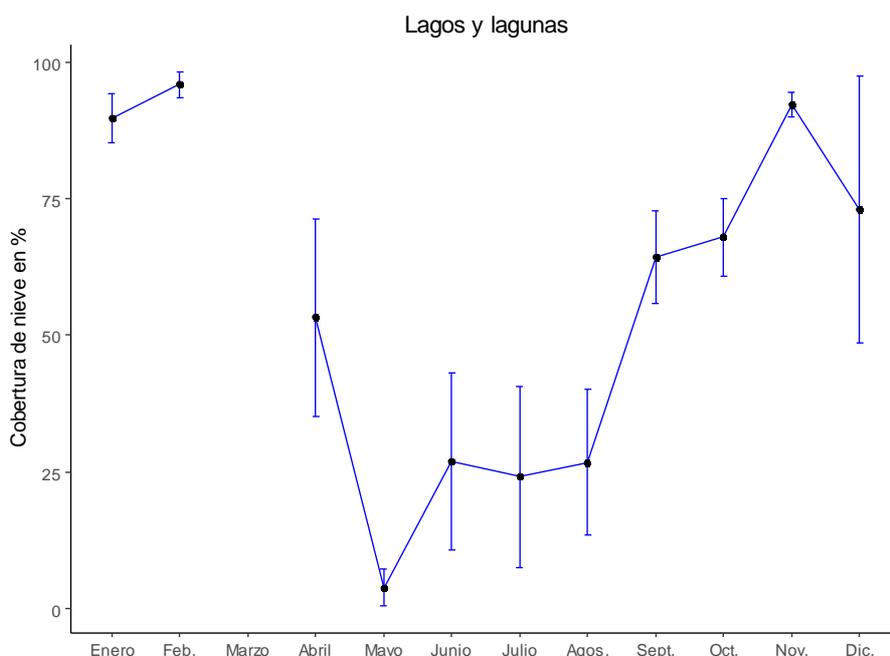


Figura 13. Gráfica de la media mensual del porcentaje de lago y laguna cubierto de nieve.

## 4.2 Análisis de la dinámica de la cobertura de nieve

Una vez hecha una descripción general de los datos de cobertura de nieve, es importante determinar si se puede observar una tendencia (i.e., durante el periodo de estudio 2017-2020) o una estacionalidad (i.e., cambios a lo largo del año) para cada uno de los tipos de masas de agua analizados (Figura 3).

### 4.2.1 Análisis de la tendencia de la cobertura de nieve en humedales

Para los humedales, la información observada (Figura 14, Gráfico 1) permite determinar la existencia de una estacionalidad bastante marcada (Figura 14, Gráfico 3), donde se observa una época donde las coberturas de nieve son máximas y una época en la que estas se reducen casi completamente.

En cuanto a la tendencia (Figura 14, Gráfico 2), al contar con un periodo de estudio muy reducido (i.e., cuatro años), solo se puede mencionar el patrón observado para el

mismo, y no determinar tendencias firmes. En concreto, se observa un ascenso de la cobertura de nieve hasta la mitad del periodo de estudio (entre 2018 y 2019) que luego decrece hasta 2020 (Figura 14, Gráfico 2).

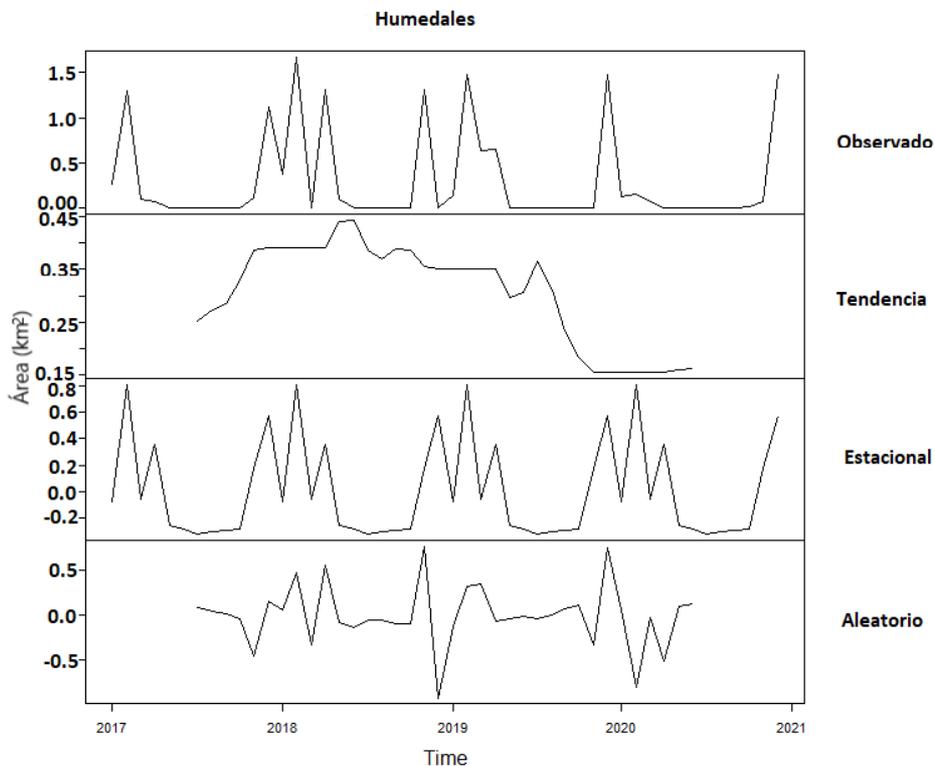


Figura 14. Análisis de la serie temporal de cobertura de nieve (km<sup>2</sup>) en humedales. De arriba hacia abajo, datos observados (Gráfica 1), tendencia (Gráfica 2), distribución estacional (Gráfica 3), distribución aleatoria (Gráfica 4).

#### 4.2.2 Análisis de la tendencia de la cobertura de nieve en lagos y lagunas

Para los lagos y las lagunas, se puede observar una disminución (Figura 15, Gráfica 2) de la cobertura de nieve con el paso de los años un poco más definida que para el caso de los humedales (Figura 14, Gráfica 2).

En cuanto a la estacionalidad (Figura 15, Gráfica 3), como ya se ha mencionado anteriormente, no es tan clara, pero si puede apreciarse como la cobertura de nieve se reduce en los meses más calurosos del año.

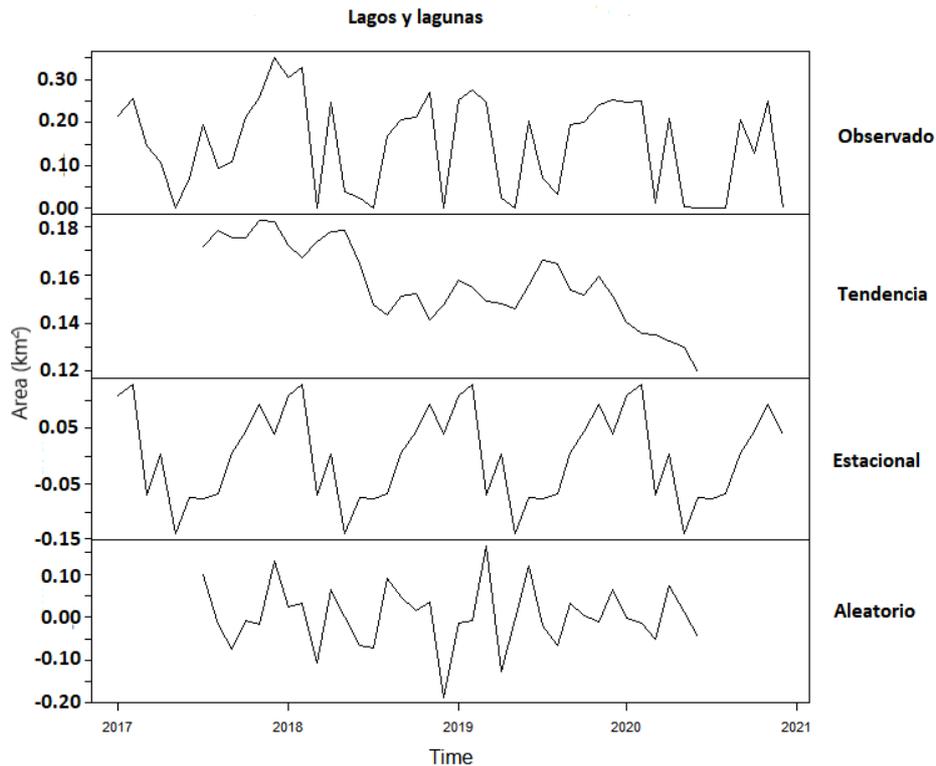


Figura 15. Análisis de la serie temporal de cobertura de nieve (km<sup>2</sup>) en lagos y lagunas. De arriba hacia abajo, datos (Gráfica 1), tendencia (Gráfica 2), distribución estacional (Gráfica 3), distribución aleatoria (Gráfica 4).

### 4.3 Análisis de la relación entre coberturas de nieve y agua.

Para determinar si existe una relación entre la variación de la cobertura de nieve y de la extensión de las masas de agua, se realizó un análisis de la varianza para los cuerpos de agua que presentan una estacionalidad marcada y más claramente diferenciada entre los periodos de presencia de nieve y agua. En este caso, los cuerpos de agua sobre los que se analizó esta relación fueron los humedales. El análisis de la varianza determinó que la variación en la cubierta de nieve tiene un efecto significativo en la extensión de los cuerpos de agua ( $P < 0.0001$ ), independientemente del año de estudio ( $P = 0.8817$ , Tabla 3)

Tabla 3. Tabla de resultados del ANOVA.

	<b>Df</b>	<b>Suma de cuadrados</b>	<b>Media de cuadrados</b>	<b>Valor de F</b>	<b>Pr (&gt;F)</b>
<b>Año</b>	3	0.4293	0.1431	0.2201	0.8817
<b>Cobertura de nieve</b>	1	19.3910	19.3910	29.8306	5.153e-06
<b>Año* Cobertura de nieve</b>	3	0.3933	0.1311	0.2017	0.8945
<b>Residuales</b>	32	20.8012	0.6500		

La relación existente entre ambas variables es lineal (Figura 16), determinando que cuanto mayor es la cobertura de nieve acumulada, mayor será la extensión de las masas de agua asociadas.

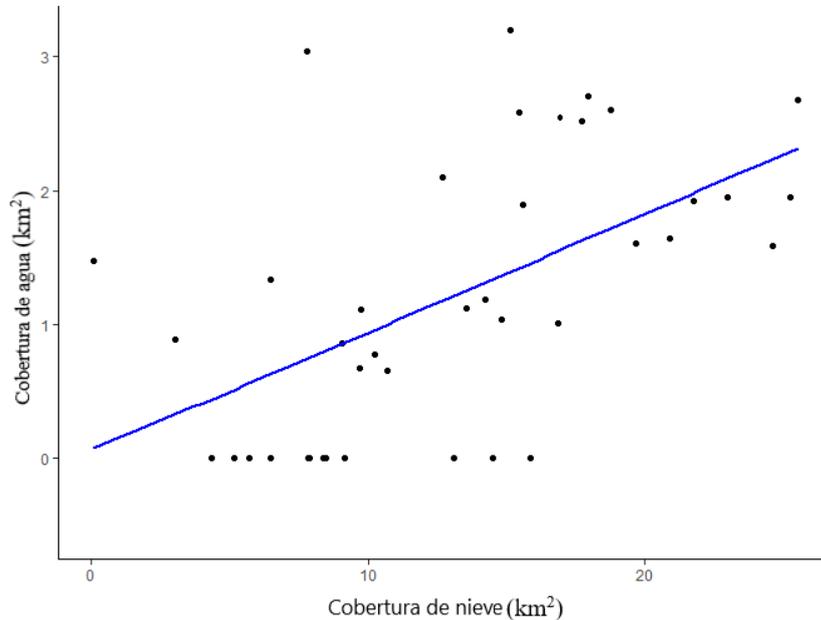


Figura 16. Relación entre la cobertura de nieve y la extensión de agua para humedales.

## 5. Discusión

Tras obtener y analizar los resultados obtenidos del presente trabajo, se ha observado la variabilidad de las coberturas de nieve tiene un efecto directo sobre la extensión de las cubiertas de agua de los humedales.

El análisis de la relación entre la cobertura de nieve y la extensión de las masas de agua, ha evidenciado la existencia de una relación positiva entre la variación de la cobertura de nieve y la extensión de agua en el caso de los humedales, de acuerdo con resultados similares observados en trabajos previos (Fang & Pomeroy, 2008). En este estudio, se ha observado este efecto de la variación de la cobertura de nieve sobre la extensión de agua en los humedales asociados a las masas de nieve cercanas mediante la aproximación de dividir el área de estudio en diferentes clústeres, asimilándolos a las posibles cuencas drenantes de los humedales que se encuentran dentro de ellos. En concreto, se ha determinado que la cuando la cobertura de nieve acumulada es mayor, la extensión de de agua de los humedales de las zonas próximas aumenta.

Sin embargo, este fenómeno solo pudo evaluarse en el caso de los humedales, para los cuales se pudieron diferenciar dos periodos dentro del mismo año de estudio; un periodo

de nieve, cuando la cobertura de esta es dominante en el área de estudio y un periodo de agua, cuando la cobertura de nieve ya se ha derretido casi en su totalidad. En el caso de los humedales, estos dos periodos diferenciados sí se dan de forma más aparente, pero para los lagos y las lagunas (Figura 11) no existe una clara distinción de ambos periodos, lo cual impide poder realizar el análisis sobre este tipo de masa de agua. En el caso de los lagos y lagunas, la no distinción entre ambos periodos se debe a la presencia de cobertura de nieve registrada por el Google Earth Engine en estas masas de agua durante prácticamente todo el año, incluidos los meses de verano. Esto se puede deber a diferentes motivos. Primero, la ocurrencia de nevadas puntuales en las zonas de mayor altitud, como ya se mencionó anteriormente (Trueba & Cañadas, 2010). Otro motivo podría ser el marcado funcionamiento hidrológico de este tipo de masas de agua, diferente al de los humedales; es decir, que estén controlados por aguas subterráneas o por el aporte de la cuenca. En este caso, los lagos y las lagunas presentes en la zona de estudio son de origen mixto, es decir, tienen aporte de aguas subterráneas, pero también tienen una parte importante de aporte de la cuenca (Centro de Estudios Hidrográficos, 2004). El tercer aspecto que podría justificar la presencia de nieve en los meses de verano en los lagos y las lagunas es que al tratarse de masas de agua con una lámina de agua más amplia y sin vegetación, hayan sido consideradas erróneamente como nieve a pesar de estar libres de la misma. Esto podría estar relacionado con el umbral de nieve establecido en el tratamiento de imágenes en el Google Earth Engine que se comentará posteriormente.

Las coberturas de nieve observadas a través de sensores remotos en el área de estudio (ver apartado 4.1.1) muestran que las zonas sobre las que se acumula más nieve al cabo de un año son las más elevadas del área de estudio, es decir, sobre los tres macizos. Aunque actualmente existen pocos estudios que hayan analizado la distribución y variabilidad de la cobertura de nieve en esta zona, se sabe que las cubiertas de nieve están sometidas a una gran variabilidad a lo largo del año (Trueba & Cañadas, 2010). Tanto en el presente estudio como en otros previos (Trueba & Cañadas, 2010), se ha observado que la cobertura de nieve empieza a acumularse a partir de los meses de septiembre y octubre y suele durar hasta los meses de marzo o abril, época en la que las temperaturas empiezan a aumentar con la entrada de la primavera y la cobertura de nieve empieza a fundirse. En la zona de estudio, este patrón se ve claramente en el caso de los humedales (Figuras 8 y 10), donde se aprecia cómo se alcanzan valores máximos de cobertura de nieve en los primeros meses del año, hasta abril, cuando comienza el

deshielo y la nieve desaparece prácticamente en su totalidad hasta llegar a octubre que vuelven las precipitaciones en forma de nieve. Además, en épocas de verano en las zonas más elevadas pueden darse nevadas muy puntuales (Trueba & Cañadas, 2010), lo cual podría explicar la presencia de nieve en los meses más calurosos del año en masas de agua como los lagos y lagunas (Figura 11) si estas masas de agua se encontrasen a una altitud superior que los humedales.

Como se ha mencionado, la temperatura media global tiende a ascender paulatinamente con el paso de los años debido al calentamiento global (D'Amato & Akdis, 2020). Existen zonas del planeta que se verán más o menos afectadas por este fenómeno (IPCC, 2007), por lo que, si nos centramos en nuestra zona de estudio, podemos determinar que, tras varios estudios llevados a cabo en las proximidades del Parque Nacional de Picos de Europa, las temperaturas tienen una tendencia positiva estadísticamente significativa más pronunciada en los meses de invierno (del Rio et al., 2007). Esto nos indica que, en un futuro cercano, los inviernos serán más cálidos lo cual va a tener una influencia directa sobre la cantidad de nieve que precipite y permanezca en la zona de estudio. Además, como ya se mencionó anteriormente, existen evidencias de que las zonas montañosas son las zonas más vulnerables al incremento de la temperatura debido a que la tasa de calentamiento en la troposfera aumenta con la altitud, lo cual provocará que las zonas donde más nieve se acumula actualmente, sean las zonas que más sufran las consecuencias de ese incremento de la temperatura (Schaffhauser et al., 2008).

Todo esto hace que la tendencia de las coberturas de nieve de todo planeta sea a disminuir su tamaño considerablemente con el paso de los años (Stewart, 2009). En este caso, en el presente estudio no se puede determinar la existencia de tendencias (Figuras 14 y 15) debido a la falta de años de datos para analizar.

La variación de la cobertura de nieve en humedales respecto al primer año analizado (2017, Figura 9), presenta una gran relación con la variación de las condiciones climáticas registradas para los diferentes años de estudio por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). El año 2017 se clasificó como un año moderadamente seco y muy cálido (AEMET, 2017), sin embargo, el año 2018 (AEMET, 2018) fue un año normal en cuanto a precipitación y cálido-normal, lo cual justificaría el incremento del 60% del porcentaje de cobertura de nieve respecto del primer año. El año 2019 (AEMET, 2019) ha sido un año normal-seco y muy cálido, en el que también se ve como se produce un descenso de la cobertura de nieve en casi un 10%. Por último, el

año 2020 (AEMET, 2020) fue un año muy húmedo pero muy cálido-extremadamente cálido, lo cual llevó a una disminución de la cobertura de nieve de más de un 80%.

Para el caso de los lagos y las lagunas (Figura 12), no existe una relación tan marcada entre las condiciones climáticas y la variación de la cobertura de nieve, lo cual nos podría indicar que este tipo de ecosistemas está influenciado por otro tipo de variables como ya se mencionó anteriormente (e.g., aporte de agua subterránea, altitud) o que los datos de cobertura de nieve obtenidos tienen cierto error procedente del procesamiento de los datos (e.g., umbral del NDSI para diferenciar coberturas de nieve y de agua), lo cual tendrá que revisarse y ajustar en el futuro en base a las características del ecosistema de estudio, ya que la metodología seguida para obtener los datos ha sido exactamente la misma para ambos tipos de masas de agua.

## **6. Conclusiones**

De este Trabajo Fin de Máster se pueden sacar las siguientes conclusiones:

1. La cobertura de nieve presente en la zona de estudio presenta una variabilidad anual y estacional muy marcada para los humedales, mientras que en el caso de los lagos y lagunas no existe una estacionalidad tan marcada debido a la permanencia de cobertura de nieve en los meses más calurosos del año.
2. La cubierta de agua de humedales se ve afectada por la variación de la cobertura de nieve, pero se desconoce si ocurre lo mismo con los lagos y las lagunas de la zona de estudio, debido a la presencia de una cantidad considerable de nieve durante los meses de verano que imposibilita la división de los dos periodos analizados.
3. El monitoreo continuo de la cobertura de nieve es imprescindible ante la tendencia climática que nos encontramos y Google Earth Engine se presenta como una herramienta fundamental para garantizar este seguimiento de forma sencilla.
4. Google Earth Engine se revela como una plataforma con un gran potencial para generar y tratar gran cantidad de información satelital de forma rápida debido a su capacidad de análisis geoespacial y reducido tiempo de procesamiento.
5. Es necesario analizar detalladamente el porcentaje de nubes permitido en las imágenes y el umbral de nieve aplicado al NDSI para intentar obtener resultados más precisos.

## 7. Limitaciones

La metodología aplicada para obtener la distribución de la cobertura de nieve en este estudio ha revelado un gran potencial de las herramientas utilizadas. Los resultados obtenidos han sido interesantes, pero existen una serie de vías de mejora que favorecerían un desarrollo más completo del estudio.

El primer aspecto a tener en cuenta es la selección de la fuente de información. En este caso se ha escogido la utilización de imágenes satelitales en lugar de realizar mediciones in situ debido a la multitud de inconvenientes que ello conlleva, como por ejemplo el difícil acceso a zonas remotas o el alto gasto económico que supondría. Además, el empleo de imágenes de satélite permite el acceso a datos e información histórica que con campañas de muestreo no se podría obtener. Aun así, la utilización de imágenes de satélite tiene una serie de limitaciones que hay que analizar rigurosamente. Una de ellas es disponibilidad de las imágenes utilizadas. Como se mencionó en la metodología, las imágenes multiespectrales que se utilizaron en este trabajo fueron las proporcionadas por la constelación de satélites Sentinel-2. Dentro de la disponibilidad de imágenes que ofrece, existen dos niveles, el 1C y el 2A. Para obtener mejores resultados, se deberían haber utilizado las de nivel 2A ya que estas presentan una corrección atmosférica, si bien finalmente se optó por las de nivel 1C ya que son las únicas que cubrían todo el periodo de estudio. Las de nivel 2A se empezaron a generar a partir del 28 de marzo de 2017 (Google Earth, 2021) y este trabajo tiene un periodo de estudio más amplio.

Otra limitación es la presencia de nubes en las diferentes imágenes ya que supone un impedimento para el análisis de la superficie terrestre ya que las nubes que imposibilitan la observación de la superficie terrestre (Singh & Komodakis, 2018). Para poder paliar este inconveniente, diferentes herramientas permiten seleccionar el porcentaje de cobertura de nubes que se admite en las imágenes a utilizar. Para ello, a la hora de utilizar el GEE es necesario aplicar el porcentaje seleccionado para que filtre las imágenes disponibles. La selección de este porcentaje es un aspecto delicado ya que, si la cantidad de nubes es elevada, la pérdida de información es importante. Tras una revisión bibliográfica se determinó que los porcentajes más utilizados eran un 10% (Arif et al., 2021), 30% (Wayand et al., 2018) y en menor medida un 50% (Singh & Komodakis, 2018). Una vez recopilada esta información y tras probar con los diferentes porcentajes, se determinó que el valor óptimo era un 20% debido a que un porcentaje

más restrictivo provocaba que en muchos meses del periodo de estudio no hubiera imágenes disponibles. Con un valor del 20% la cantidad de información era abundante para casi todo el periodo de estudio (en el mes de marzo del 2018 no hay información) y con un valor superior la calidad de los datos sería insuficiente.

El segundo aspecto a tener en cuenta es el umbral a partir del cual el resultado del NDSI se considera nieve. Este índice, como ya se mencionó en la metodología, da como resultado un valor por píxel comprendido entre -1 y 1. Esta primera salida de resultados que ofrece es buena para diferenciar cobertura terrestre y de nubes (píxeles con un valor por debajo de 0) con la cobertura de nieve (píxeles con un valor por encima de 0), pero puede clasificar erróneamente cuerpos de agua como nieve debido a las características espectrales de ambas superficies. Esto hace necesario establecer un umbral a partir del cual ambas superficies se clasifiquen correctamente. Los valores más utilizados en la bibliografía son 0 y 0.4, por lo que se aplicaron ambos umbrales con el fin de comparar resultados y seleccionar la mejor opción para el presente estudio. Tras utilizar ambos umbrales se determinó que la mejor opción era utilizar un valor de 0.4 debido a que, para un valor de 0, grandes masas de agua como los Lagos de Covadonga eran considerados erróneamente prácticamente en su totalidad como cobertura de nieve. Con un valor de 0.4, seguían observándose masas de agua libres de nieve consideradas como zonas con una mínima parte de su extensión cubiertas de nieve. Es por ello que también se planteó incrementar ese umbral hasta 0.7, pero al comparar los resultados, la cobertura de nieve real observada mediante imágenes de ese momento tenía una extensión mucho mayor a la proporcionada por el GEE.

## **7. Posibilidades de mejora**

Una vez realizado este estudio y analizados los resultados se determina que existen diferentes análisis adicionales que podrían realizarse y completarían los resultados obtenidos. Entre estas posibilidades tenemos:

1. Recopilar información sobre otros índices que se puedan emplear para determinar la cobertura de nieve y agua y analizar minuciosamente cual proporcionaría los mejores resultados.

2. Utilizar imágenes con una corrección climática aplicada, es decir, imágenes con reflectancia de la superficie en vez de imágenes con reflectancia en el techo de la atmósfera (TOA) para reducir la fuente de error.
3. Aplicar una máscara de agua previa a la estimación de la cubierta de nieve, de forma que se diferencien fácilmente ambas cubiertas y así evitar posibles errores.
4. Ampliar la cantidad de años de estudio para determinar claramente la tendencia de la cobertura de nieve en el Parque Nacional de Picos de Europa y su entorno utilizando por ejemplo otras fuentes de información como por ejemplo los satélites Landsat.
5. Obtener información de cobertura de agua con una mayor periodicidad para como mínimo contar con datos mensuales.
6. Recopilar más información en los próximos años sobre las cubiertas de agua de las diferentes masas de agua para poder realizar estudios más detallados sobre los diferentes cuerpos de agua existentes.
7. Vincular los análisis a diferentes tipos de cuerpos de agua de los cuales se sepa que tienen un funcionamiento hidrológico específico (por ejemplo, alimentados por aguas subterráneas o sólo por escorrentía, etc.). Lo cual permitiría estimar el nivel de vulnerabilidad de cada cuerpo de agua en función de su funcionamiento hidrológico específico.
8. Incluir las cubetas de recarga para cada cuerpo de agua, utilizando un ráster de acumulación de flujo y asignándole a ese cuerpo de agua el área con nieve que lo alimenta.

## 8. Bibliografía

- AEMET. (2017). *Informe mensual climatológico - Julio 2017*.
- AEMET. (2018). *Informe mensual climatológico - Julio 2018*.
- AEMET. (2019). *Informe mensual climatológico - Julio 2019*.
- AEMET. (2020). *Informe mensual climatológico - Julio 2020*.
- Arif, H., Mehmood, S. A., & Ahmad, H. H. (2021). Spatiotemporal Variations in Snow Cover using Google Earth Engine in Gilgit-Baltistan, Pakistan. *HYDROLOGY AND WATER RESOURCES*.
- Assini, J., & Young, K. L. (2012). Snow cover and snowmelt of an extensive High Arctic wetland: spatial and temporal seasonal patterns. *Hydrological Sciences Journal*, 57(4), 738–755.
- Barrera, F. B. (2015). *Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de España. Los litorales*.
- Centro de Estudios Hidrográficos. (2004). *Caracterización de los tipos de ríos y lagos*.
- Confederación Hidrográfica del Cantábrico. (2021). *Deva*.  
[https://www.chcantabrico.es/gl/sistemas\\_explotacion/deva](https://www.chcantabrico.es/gl/sistemas_explotacion/deva)
- D'Amato, G., & Akdis, C. (2020). Global warming, climate change, air pollution and allergies. *Authorea Preprints*.
- del Rio, S., Fraile, R., Herrero, L., & Penas, A. (2007). Analysis of recent trends in mean maximum and minimum temperatures in a region of the NW of Spain (Castilla y León). *Theoretical and Applied Climatology*, 90(1), 1–12.
- Diffenbaugh, N. S., Scherer, M., & Ashfaq, M. (2013). Response of snow-dependent hydrologic extremes to continued global warming. *Nature Climate Change*, 3(4), 379–384.
- ESRI. (2019). *ArcGIS: Versión 10.8.1*.
- Fang, X., & Pomeroy, J. W. (2008). Drought impacts on Canadian prairie wetland snow hydrology. *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(15), 2858–2873.
- Giorgi, F., Bi, X., & Pal, J. (2004). Mean, interannual variability and trends in a regional climate change experiment over Europe. II: climate change scenarios (2071–2100). *Climate Dynamics*, 23(7–8), 839–858.
- Google. (2021). *Google Earth Engine - Code Editor*.  
<https://code.earthengine.google.com/>

- Google Earth. (2021). *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-1C*.  
[https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S2#description](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2#description)
- Guo, M., Li, J., Sheng, C., Xu, J., & Wu, L. (2017). A review of wetland remote sensing. *Sensors*, *17*(4), 777.
- Hu, S., Niu, Z., & Chen, Y. (2017). Global wetland datasets: a review. *Wetlands*, *37*(5), 807–817.
- Instituto Geográfico Nacional. (2020). *Teledetección*. 2–3. <http://www.ign.es>
- IPCC. (2007). *El cambio climático proyectado y sus impactos*.  
[https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/syr/es/spms3.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/syr/es/spms3.html)
- Keikhosravi, G. (2021). Evaluating the effect of heat waves on early melting of snow covers of Karkheh catchment in Iran. *Natural Hazards*, 1–20.
- Khasnis, A. A., & Nettleman, M. D. (2005). Global warming and infectious disease. *Archives of Medical Research*, *36*(6), 689–696.
- Kulkarni, A. v, Srinivasulu, J., Manjul, S. S., & Mathur, P. (2002). Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, *30*(1), 73–80.
- Liu, L., Xiao, X., Qin, Y., Wang, J., Xu, X., Hu, Y., & Qiao, Z. (2020). Mapping cropping intensity in China using time series Landsat and Sentinel-2 images and Google Earth Engine. *Remote Sensing of Environment*, *239*, 111624.  
<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2019.111624>
- Li, Z., Liu, C., Zhang, P., & Tian, B. (2018). Assessment of Snow Cover Product Using Google Earth Engine Cloud Computing Platform. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 5203–5205.
- Mahdavi, S., Salehi, B., Granger, J., Amani, M., Brisco, B., & Huang, W. (2018). Remote sensing for wetland classification: A comprehensive review. *GIScience & Remote Sensing*, *55*(5), 623–658.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021). *Picos de Europa: El medio natural*. <https://www.miteco.gob.es/es/red-parques-nacionales/nuestros-parques/picos-europa/valores-naturales/valores-naturales-entorno.aspx>
- Nitta, T., Yoshimura, K., & Abe-Ouchi, A. (2017). Impact of arctic wetlands on the climate system: Model sensitivity simulations with the MIROC5 AGCM and a snow-fed wetland scheme. *Journal of Hydrometeorology*, *18*(11), 2923–2936.

- Parque Nacional Picos de Europa. (2016). *Parque Nacional Picos de Europa* .  
<https://parquenacionalpicoseuropa.es/el-parque/el-medio-natural/geologia>
- Pons, M. R., San-Martín, D., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2010). Snow trends in Northern Spain: analysis and simulation with statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology*, 30(12), 1795–1806.
- Programa Life. (2021). *LIFE DIVAQUA* . <https://lifedivaqua.com/>
- Qiao, C., Luo, J., Sheng, Y., Shen, Z., Zhu, Z., & Ming, D. (2012). An adaptive water extraction method from remote sensing image based on NDWI. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40(3), 421–433.
- R Core Team. (2013). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.
- Schaffhauser, A., Adams, M., Fromm, R., Jörg, P., Luzi, G., Noferini, L., & Sailer, R. (2008). Remote sensing based retrieval of snow cover properties. *Cold Regions Science and Technology*, 54(3), 164–175.
- Singh, P., & Komodakis, N. (2018). Cloud-gan: Cloud removal for sentinel-2 imagery using a cyclic consistent generative adversarial networks. *IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1772–1775.
- Sivakumar, M. V. K. (2003). *Satellite remote sensing and GIS applications in agricultural meteorology*. World Meteorological Organisation.
- Snapir, B., Momblanch, A., Jain, S. K., Waine, T. W., & Holman, I. P. (2019). A method for monthly mapping of wet and dry snow using Sentinel-1 and MODIS: Application to a Himalayan river basin. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 222–230.
- Stewart, I. T. (2009). Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydrological Processes: An International Journal*, 23(1), 78–94.
- Tamiminia, H., Salehi, B., Mahdianpari, M., Quackenbush, L., Adeli, S., & Brisco, B. (2020). Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 164, 152–170.
- Tang, Q., Gao, H., Lu, H., & Lettenmaier, D. P. (2009). Remote sensing: hydrology. *Progress in Physical Geography*, 33(4), 490–509.
- Trueba, J. J. G., & Cañadas, E. S. (2010). Snow in the Picos de Europa: geomorphological and environmental implications. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 36(2), 61–84.

- Wayand, N. E., Marsh, C. B., Shea, J. M., & Pomeroy, J. W. (2018). Globally scalable alpine snow metrics. *Remote Sensing of Environment*, 213, 61–72.
- Zhang, M., Chen, F., & Tian, B. (2018). An automated method for glacial lake mapping in High Mountain Asia using Landsat 8 imagery. *Journal of Mountain Science*, 15(1).