



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
UNIVERSIDAD DE OVIEDO

MÁSTER EN RECURSOS TERRITORIALES
Y ESTRATEGIAS DE ORDENACIÓN



Universidad de Oviedo

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Directores: Domingo Rasilla Álvarez y Manuel del Jesus Peñil

Curso: 2017-2018

**LOS RECURSOS HÍDRICOS EN UNA
CUENCA DE MONTAÑA:
MODELIZACIÓN DE LA CABECERA
DEL RÍO ESLA**

**WATER RESOURCES IN A MOUNTAIN BASIN:
MODELLING THE HEADWATERS OF RIVER ESLA**

Carolina Yedra Arnaiz

28 de septiembre de 2018

ÍNDICE

RESUMEN	4
SUMMARY	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. FUENTES Y METODOLOGÍA	9
2.1. Fuentes de información	9
2.1.1. Fuentes meteorológicas.....	9
2.1.2. Series foronómicas.....	11
2.1.3. Fuentes cartográficas	12
2.2. Metodología	13
2.2.1. Modelado hidrológico.....	13
2.2.2. Análisis de la variabilidad de los recursos hídricos.....	19
2.2.3. Evaluación y gestión de los recursos hídricos	20
3. RESULTADOS	21
3.1. Caudales en régimen natural: simulación hidrológica	21
3.2. Variabilidad temporal de variables meteorológicas y caudales	25
3.3. Caudal y variables climáticas: escalas de análisis.....	28
4. DISCUSIÓN	36
5. CONCLUSIONES	38
AGRADECIMIENTOS	40
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES	41
ANEXOS	45

ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS

Figura 1: Área de estudio: tramo alto de la cuenca del río Esla	6
Figura 2: Usos consuntivos medios anuales (en %), en la cuenca del río Esla. 2017	7
Figura 3: Evolución de la población en la cabecera del río Esla. 1900-2017	8
Figura 4: Base de datos con la presión atmosférica a nivel del mar en formato “rejilla” es NCEP R1 (National Centers for Environmental Prediction)	10
Figura 5: Estaciones climáticas y foronómicas	11
Figura 6: Esquema Modelo TETIS	15
Figura 7: Periodo calibrado, validado y simulado	18
Figura 8: Caudales anuales en régimen natural	21
Figura 9: Comparación régimen hidrológico antes y después de la puesta en marcha del embalse.....	22
Figura 10: Caudal mensual observado y simulado en las estaciones 2067, 2102 y 2032E	23
Figura 11: Caudal mensual observado y simulado en las estaciones 2067 y 2032E.....	25
Figura 12: Terciles de caudal, precipitación, temperatura y nieve	29
Figura 13: Presión del mar en octubre – noviembre.....	32
Figura 14: Presión del mar en diciembre – enero – febrero	32
Figura 15: Presión del mar en marzo – abril – mayo.....	33
Figura 16: Correlación entre las temperaturas y las precipitaciones con la NAO.....	35
Figura 17: Correlación entre las temperaturas y la precipitación con la EA.....	35
Figura 18: Aportación media mensual (en hm ³), por unidad territorial, en la cuenca del Duero. 1980-1981 y 2005-2006	37
Figura 19: Demanda total media mensual (en hm ³), por unidad territorial, en la cuenca del Duero. 1980-1981 y 2005-2006	37
Tabla 1: Índices atmosféricos utilizados	9
Tabla 2: Fuentes cartográficas	12
Tabla 3: Factores de calibración	22
Tabla 4: Resultados simulación hidrológica.....	24
Tabla 5: Análisis de Mann-Kendal en caudal.....	26
Tabla 6: Resultados del análisis de tendencia en la precipitación mediante el método de Mann-Kendall	27
Tabla 7: Resultados del análisis de tendencia de la temperatura mediante el método de Mann-Kendall	27
Tabla 8: Correlación estacional entre caudal, precipitación, temperatura e innivación .	30
Tabla 9: Coeficientes de correlación de Spearman entre variables hidrológicas e índices climáticos	31
Tabla 10: Coeficientes de correlación de Spearman entre variables hidrológicas e índices climáticos	34

RESUMEN

Las graves consecuencias que resultan de una excesiva demanda de agua, un recurso vital pero escaso, ponen de manifiesto que el análisis de su disponibilidad es un requisito obligado para su correcta planificación y gestión. Con esta premisa se plantea el análisis del tramo alto del río Esla, donde se localiza uno de los mayores embalses de la Meseta Norte, esencial para la propuesta de ampliación de regadío que pretende desarrollarse en la cuenca del Duero. El objetivo del trabajo es evaluar los recursos hídricos a partir de una modelización del caudal durante los últimos 30 años, a escala diaria, mediante la utilización del modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual TETIS. Los resultados obtenidos servirán para conocer el papel que la variabilidad reciente del clima y los cambios en los usos del suelo han tenido sobre la disponibilidad de los recursos hídricos en el ámbito de estudio y, en definitiva, realizar una primera aproximación a su futuro.

Palabras clave: Recursos hídricos, disponibilidad, evaluación, modelo hidrológico.

SUMMARY

The serious consequences resulting from an over-demand of water, a vital but scarce resource, highlight that the analysis of its availability is essential for its correct planning and management. Keeping that in mind, we focus our analysis on the upper section of river Esla, where one of the largest reservoirs of the Spanish Northern Plateau is located, essential for the proposal of expanding the irrigation in the Duero basin. The aim of this essay is to evaluate the water resources by modelling the river Esla natural streamflow during the last 30 years, on a daily basis, using the hydrological distributed simulation model TETIS. The obtained results will serve to know the role of the recent atmospheric variability and changes of land uses upon the water resources on the area of study and, overall, to make a preliminary approach to their future.

Keywords: Water resources, availability, evaluation, hydrological model.

1. INTRODUCCIÓN

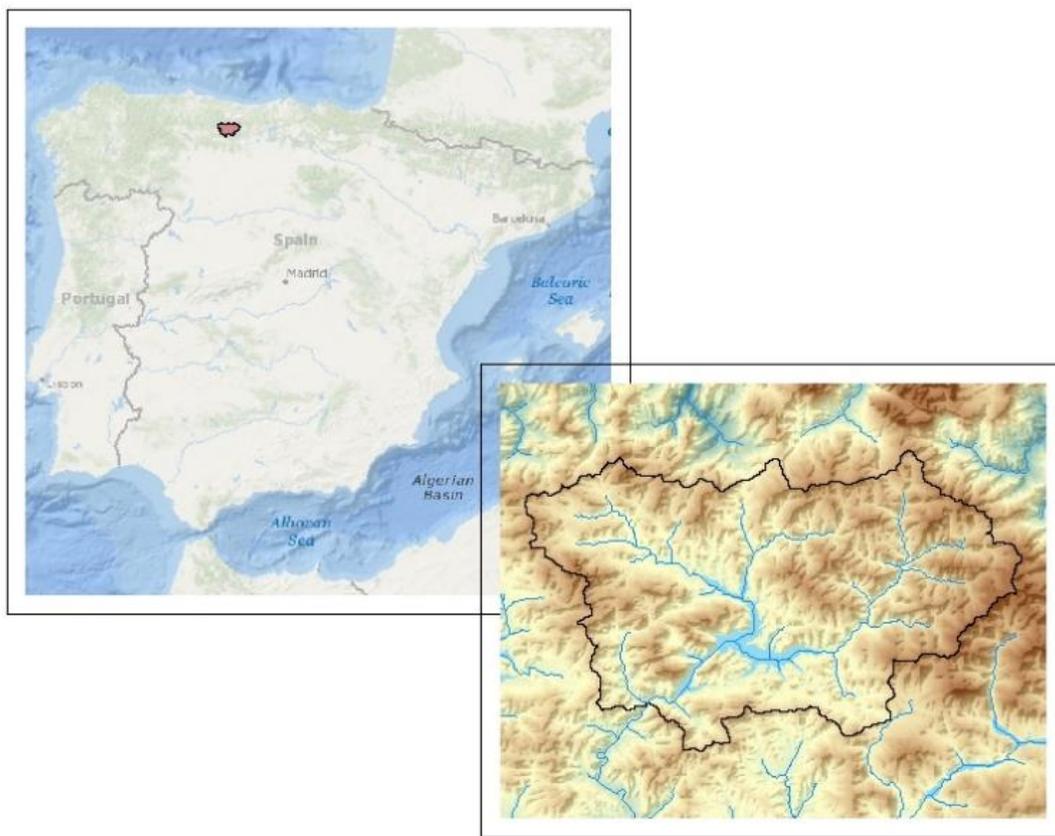
El agua es un bien preciado pero escaso y sometido a múltiples presiones procedentes, en gran medida, de la competencia que se establece entre los numerosos usos que la demandan. Por ello, se hace necesaria la existencia de una planificación hidrológica, cuyo objetivo principal sea la satisfacción de las demandas de agua, en armonía con el medio ambiente y el resto de los recursos naturales, contribuyendo a paliar efectos de inundaciones y sequías (MAPAMA, 2018b).

Los Planes Hidrológicos en España han de cumplir la Directiva Marco del Agua (DMA) de la Unión Europea, cuyo reto principal es la toma “*de medidas para proteger las aguas tanto en términos cualitativos como cuantitativos y garantizar así su sostenibilidad*”, debido a las presiones crecientes del aumento de la demanda, de buena calidad y con capacidad de dar suministro a todos los usos (MAPAMA, 2018a).

Es por ello que el análisis de la disponibilidad hídrica es un requisito obligado para su correcta planificación y gestión. Las demarcaciones hidrográficas españolas cuentan con redes de medición de aguas, modelos matemáticos complejos, sistemas de diagnóstico y seguimiento de las masas de agua, sistemas de información geográfica e infraestructuras, que permiten, *a priori*, su estudio y valoración (MAPAMA, 2018b).

El ámbito de estudio del presente trabajo se localiza en la cuenca del Duero, uno de los mayores sistemas hídricos de la Península Ibérica, y más concretamente en la cabecera río Esla (Figura 1). Inscrita en el tramo central de la Cordillera Cantábrica, se caracteriza por presentar unas elevadas altitudes (comprendidas entre los 1.000 m y casi los 2.500 m) y fuertes pendientes medias, alrededor de un 35-37%, si bien pueden llegar a alcanzar un 140% en el sector occidental. El paisaje es el típico de alta montaña, dominado por bosques de frondosas en casi un 60% del ámbito de estudio. Las superficies de pastizal ocupan el 20% del territorio, concentrándose sobre todo en su sector más occidental. El resto del ámbito se encuentra ocupado por suelo desnudo, masas de agua, cultivos agrícolas, plantaciones forestales y suelos urbanos (IGN, 2006; IGN, 2015).

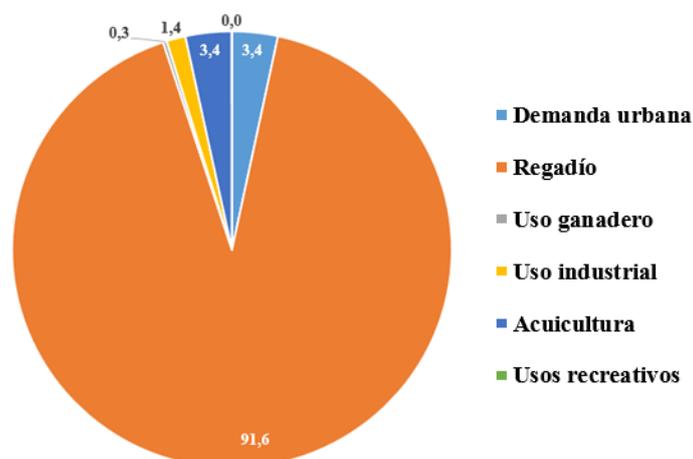
Figura 1: Área de estudio: tramo alto de la cuenca del río Esla



Fuente: Elaboración propia a partir de Base oceános mundiales de ArcGIS y IGN (2015).

Dentro del área de estudio se localiza el Embalse de Riaño, que ocupa unas 2.300 ha, con un papel muy importante en el conjunto de la cuenca del Duero pues sus aportes representan algo más de la quinta parte del total de dicha demarcación (Figura 2; CHD, 2017: 22). Y es este el motivo del interés en la elección de este área de estudio, pues las autoridades regionales han planteado que en el año 2021 se incremente en casi 20.000 ha la superficie de regadío y que este aumento llegue a ser de más de 150.000 ha para 2027. En la actualidad, la cuenca del Esla soporta 491.646 ha de cultivos en secano y 71.604 ha en regadío, siendo estas últimas las que se van a incrementar dado que son las que proporcionan mayor rentabilidad (CHD, 2016).

Figura 2: Usos consuntivos medios anuales (en %), en la cuenca del río Esla. 2017



Fuente: Elaboración propia a partir de CHD, 2017.

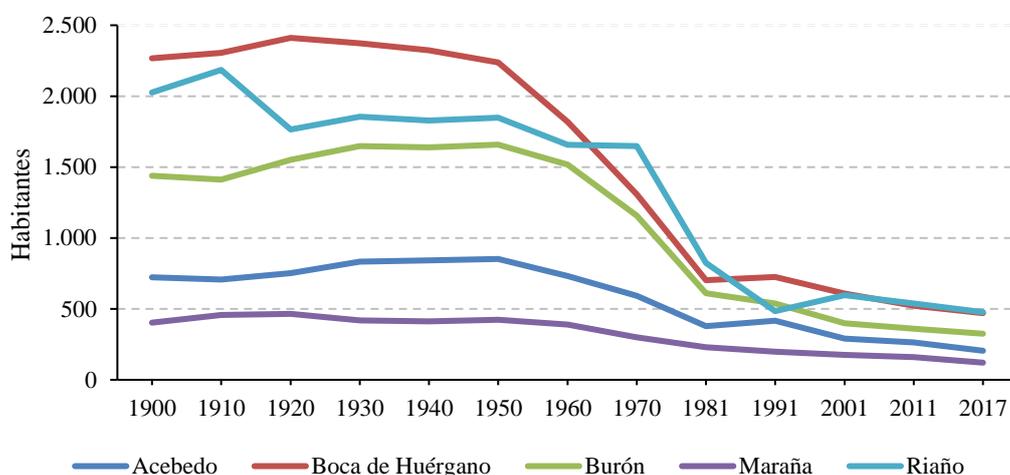
Por otro lado, la zona elegida se inscribe en un ámbito de alta montaña particularmente sensible a los cambios ambientales que se están produciendo en la actualidad (Beniston, 2005), lo que le confiere un interés mayor por cuanto su estudio es esencial para vislumbrar cual es la disponibilidad existente aguas abajo. Los escenarios de cambio climático plantean transformaciones graduales en la precipitación y la temperatura, que incrementará la evapotranspiración, provocando cambios en el ciclo hidrológico (Milly, Dunne y Vecchia, 2005).

Pero las actividades humanas también tienen su impacto: la misma construcción de un embalse genera una serie de alteraciones en el régimen de los ríos, modificando la cuantía y distribución temporal de los caudales aguas abajo, resultado de la infiltración y evapotranspiración de la lámina de agua (Consandey y Robinson, 2000; Verstraeten y Poesen, 2000; Maingi y Marsh, 2002; Nilsson *et al*, 2005; Bonacci y Roje-Bonacci, 2003).

A ello se suma una lenta recuperación de la vegetación natural debido al abandono de las tierras de pastoreo y cultivo. Esto repercute en un descenso de la escorrentía, lo que lleva a una disminución de los caudales de los ríos (Crockford y Richardson, 2000). En el Esla estas transformaciones comenzaron en los años cincuenta (Figura 3), momento en el que el éxodo rural empieza a ser evidente y, paralelamente, disminuye la actividad ganadera y se abandonan las zonas de pastoreo. No será hasta los ochenta, con la

construcción del embalse de Riaño que, entre otras cosas, supuso la desaparición de nueve pueblos bajo sus aguas, cuando la transformación sea más evidente.

Figura 3: Evolución de la población en la cabecera del río Esla. 1900-2017



Fuente: Elaboración propia a partir de INE, 2018a; INE, 2018b; INE, 2018c.

La cuenca del Esla se encuentra, pues, sometida a numerosas presiones, naturales y antrópicas, que le convierten en un área de gran interés por lo que se hace necesaria la evaluación de la disponibilidad a la que se enfrenta. Y es en este contexto se plantea un doble objetivo en este trabajo, por un lado, se pretende analizar la disponibilidad de los recursos hídricos en su cabecera hasta el embalse de Riaño, para lo cual es necesario realizar una aproximación a su evolución estudiando los cambios producidos en las variables climáticas y en la evolución de los caudales de este sector en el periodo 1932-2006. Para la reconstrucción del caudal natural del río a lo largo de la segunda mitad del siglo XX a escala diaria, se ha utilizado el modelo hidrológico TETIS, un modelo distribuido de tipo conceptual. A través de la reproducción de diferentes procesos físicos involucrados en el ciclo hidrológico, este modelo simula las aportaciones en régimen natural, al igual que las alteraciones causadas por embalses y usos consuntivos del agua.

Por otro lado, se pretende analizar cómo influye esa variabilidad hidrológica en la gestión de los recursos hídricos, para lo que se comparan los caudales de entrada y salida del embalse de Riaño y se examinan las demandas estimadas en el nuevo plan de regadíos.

En definitiva, los resultados obtenidos servirán para determinar la disponibilidad hídrica en el ámbito de estudio y con ello la adecuación de las demandas previstas.

2. FUENTES Y METODOLOGÍA

2.1. Fuentes de información

2.1.1. Fuentes meteorológicas

Los datos de precipitación (mm) y temperatura media diaria (°C) han sido proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2018). Se han seleccionado 28 estaciones (Anexo 1) con datos de precipitación y una (2624 - Riaño) con datos de temperatura (Figura 5). Ésta última procede de la unión de dos series, la 2624 (Riaño) y la 2624I (Embalse de Riaño). La primera dejó de proporcionar datos en 1986, mientras que la segunda comenzó a funcionar en 1988. Su diferente ubicación, y la capacidad de los embalses para modificar el clima a escala local, particularmente la temperatura (García Codron, 1994), obligó a someterla a un proceso de rellenado y homogeneización, a partir de su comparación con estaciones próximas.

El análisis de la dinámica atmosférica a escala regional y hemisférica ha usado un conjunto de índices, que pueden dividirse en dos grupos en función de la magnitud del ámbito espacial analizado. A escala regional (Tabla 1; Figura 4) los índices calculados son los siguientes (Jenkinson y Collison, 1977):

Tabla 1: Índices atmosféricos utilizados

SLP	Presión media a nivel del mar.
W	Componente zonal del viento geostrófico en superficie, equivalente al gradiente de presión entre los paralelos 40° N y 60° N.
S	Componente meridiana del viento geostrófico en superficie, equivalente al gradiente de presión entre los meridianos 20° W y 10° E.
F	Velocidad del viento geostrófico (ms^{-1}) obtenida de S y W.
ZW	Componente zonal de la vorticidad.
ZS	Componente meridional de la vorticidad.
Z	Vorticidad total obtenida a partir de ZW y ZS.

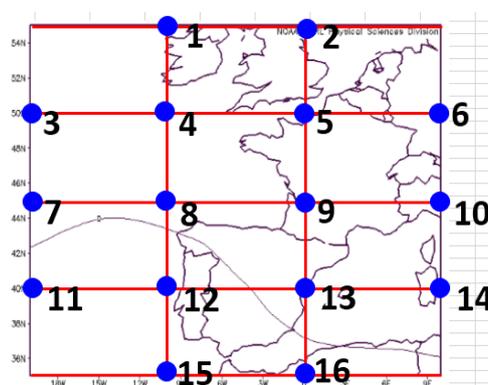
Fuente: Elaboración propia.

Las ecuaciones para obtener los índices anteriores son las siguientes (en negrita, los puntos de rejilla cuyos valores se introducen en las ecuaciones) (Figura 4):

- $SLP = 0,125 \cdot [(4 + 5) + 2 \cdot (8 + 9) + (12 + 13)]$

- $W = 0,5 \cdot (12 + 13) - 0,5 \cdot (4 + 5)$
- $S = 1,74 \cdot [0,25 \cdot (5 + 2 \cdot 9 + 13) - 0,25 \cdot (4 + 2 \cdot 8 + 12)]$
- $F = (S^2 + W^2)^{0,5}$
- $ZW = 1,07 \cdot [0,5 \cdot (15 + 16) - 0,5 \cdot (8 + 9)] - 0,95 \cdot [0,5 \cdot (8 + 9) - 0,5 \cdot (1 + 2)]$
- $ZS = 1,52 \cdot [0,25 \cdot (6 + 2 \cdot 10 + 14) - 0,25 \cdot (5 + 2 \cdot 9 + 13) - 0,25 \cdot (4 + 2 \cdot 8 + 12) + 0,25 \cdot (3 + 2 \cdot 7 + 11)]$
- $Z = ZW + ZS$

Figura 4: Base de datos con la presión atmosférica a nivel del mar en formato “rejilla” es NCEP R1 (National Centers for Environmental Prediction)



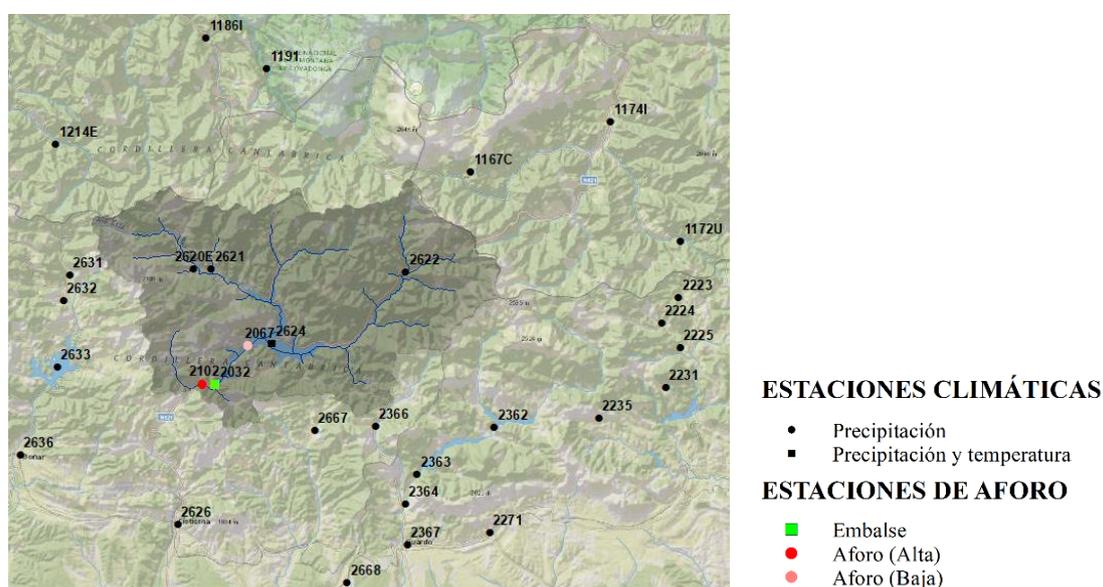
Fuente: Reanalyses; Kalnay *et al.*, 1996.

Para el análisis de la dinámica atmosférica a escala hemisférica se han utilizado los valores correspondientes a las principales teleconexiones (patrones de baja frecuencia) que afectan a Europa Occidental. Estos valores se han obtenido del Climate Prediction Center (CPC, 2012), perteneciente a NOAA. Son los siguientes:

- La oscilación del Atlántico Norte (NAO): consiste en un dipolo norte-sur de anomalías, con un centro ubicado sobre Groenlandia y el otro centro, de signo opuesto, que abarca las latitudes centrales del Atlántico Norte entre 35 N y 40 N. La fase positiva de la NAO refleja alturas y presiones superiores a las normales en Europa occidental, mientras que la fase negativa refleja un patrón opuesto de anomalías de altura y presión (NOAA, 2012).
- La oscilación del Atlántico Este (EA): es similar a la NAO, consiste en un dipolo norte-sur de centros de anomalías que abarca el Atlántico Norte de este a oeste. La fase positiva del patrón EA se asocia con temperaturas superficiales superiores a la media en Europa y con precipitaciones inferiores a la media en el sur de Europa (NOAA, 2012).

- La oscilación del Atlántico Este-Western Russia (EA_WR): es uno de los tres patrones prominentes de teleconexión que afectan a Eurasia durante todo el año, consta de cuatro principales centros de anomalías. La fase positiva está asociada con anomalías de altura positivas ubicadas en Europa (NOAA, 2012).
- La oscilación Escandinavia: consiste en un centro de circulación primaria sobre Escandinavia, con centros más débiles de signo opuesto sobre Europa occidental y Rusia oriental/Mongolia occidental. La fase positiva de este patrón está asociado a precipitaciones superiores a la media en Europa central y meridional (NOAA, 2012).

Figura 5: Estaciones climáticas y foronómicas



Fuente: Elaboración propia a partir de información proporcionada por AeMet y CEDEX.

2.1.2. Series foronómicas

Los datos de caudal (m^3/s), salida (m^3/s) y volumen de embalse (hm^3) diarios para el periodo de estudio han sido obtenidos a partir del *Anuario de Aforos* (CEDEX, 2018). Los caudales proceden de dos estaciones: la 2067, que posee datos desde 1932 hasta 1960, y la 2102, que ha estado activa desde 1964. Por otro lado, se han utilizado los datos del embalse 2032E (Embalse de Riaño), que cuenta con información desde 1988 hasta la actualidad (Anexo 2). Dado que los datos de las estaciones de aforo se ven alterados por la construcción del embalse, se ha decidido generar una serie de caudal del embalse, a partir de la siguiente fórmula:

$$Q_i = (Volumen_i - Volumen_{i-1}) * 1000000 / (24 * 3600) + Q_o$$

2.1.3. Fuentes cartográficas

Las bases cartográficas utilizadas en este proyecto son las 11 hojas (55, 56, 79, 80, 81, 104, 105, 106, 107, 131 y 132) del modelo digital del terreno (MDT), con una resolución de 25 m, proporcionadas por el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2018) (Tabla 2), la base de datos vectorial de usos del suelo Corine Land Cover de 2006 (CLC06), también proporcionada por el CNIG, y la base europea de propiedades hidráulicas del suelo en 3D a 250 m (ESDAC, 2018).

Tabla 2: Fuentes cartográficas

Capa	Origen	Formato y resolución original	Formato y resolución final
MDT	CNIG	Raster a 25 m	Raster a 100 m
CLC	CNIG	Vectorial	Raster a 100 m
Capacidad de campo a 0 cm	ESDAC	Raster a 250 m	Raster a 100 m
Conductividad hidráulica a 0 cm	ESDAC	Raster a 250 m	Raster a 100 m
Conductividad hidráulica a 30 cm	ESDAC	Raster a 250 m	Raster a 100 m
Punto de marchitez a 0 cm	ESDAC	Raster a 250 m	Raster a 100 m

Fuente: Elaboración propia.

A partir del MDT se han generado las pendientes en tanto por uno, y a partir de estas, la velocidad de ladera, mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Velocidad de ladera} = 1,4142 \sqrt{\text{pendiente en tanto por } 1}$$

Por otro lado, mediante la caja de herramientas *Archydro Tools*, de *ArcGIS*, se han creado las capas de dirección de flujo, de celdas acumuladas y la divisoria de la cuenca. Así mismo, se han extraído las series de radiación solar extraterrestre de la estación de temperatura, para la estimación de la evapotranspiración potencial, y los *raster* de radiación global mensual del área de estudio.

En cuanto a los usos del suelo, se han seleccionado nueve tipos de los establecidos por Corine Land Cover de 2006 (CLC06): bosque de hoja perenne, bosque de hoja caduca, sin vegetación o vegetación pobre, cultivo arbóreo perenne, cultivo arbóreo caduco, cuerpos de agua y vegetación acuática, zona urbana, pastos cultivados, y cultivo estacional. Así mismo, a la superficie que ocupa el embalse se le ha dado el valor de

pastos cultivados ya que el análisis de los recursos hídricos en régimen natural en la cuenca del río Esla se ha realizado sin contar con la existencia del embalse.

En cuanto a la base de datos de propiedades hidráulicas del suelo 3D de Europa a 250 m, se han tratado las capas de capacidad de campo a 0 cm, conductividad hidráulica a 0 cm y a 30 cm, y la capa de punto de marchitez a 0 cm, para calcular el contenido de agua disponible y a partir de él calcular otros parámetros, como el volumen de agua que pueden absorber las plantas (H_u), la capacidad de infiltración del suelo (K_s), la capacidad de percolación del sustrato (K_p), la conductividad hidráulica de la zona no saturada (K_{ss}) y la capacidad de percolación al acuífero profundo (K_{ps}).

2.2. Metodología

En función de los objetivos propuestos, la metodología planteada se estructura en varias fases:

- a) La modelización y reconstrucción de los caudales en régimen natural mediante un modelo hidrológico.
- b) El análisis de la variabilidad de los recursos hídricos en régimen natural, mediante el análisis de su evolución a largo plazo y su relación con la dinámica atmosférica a escala local, regional y hemisférica.
- c) La evaluación de la disponibilidad hídrica y la gestión que se pretende hacer del recurso hídrico.

2.2.1. Modelado hidrológico

La reconstrucción del caudal en régimen natural se ha realizado a partir de una simulación, implementando el modelo hidrológico TETIS, desarrollado por el Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental de la Universidad Politécnica de Valencia (GIMHA, 2018b). TETIS simula las aportaciones en régimen natural, al igual que las alteraciones causadas por embalses y usos consuntivos del agua, reproduciendo los diferentes procesos involucrados en el ciclo hidrológico. El resultado es una serie temporal de caudales simulados a la escala temporal deseada (diaria en este trabajo) en aquellos puntos de la red de drenaje de interés, el embalse de Riaño en este trabajo. Además, el modelo permite generar mapas con la frecuencia temporal deseada de las

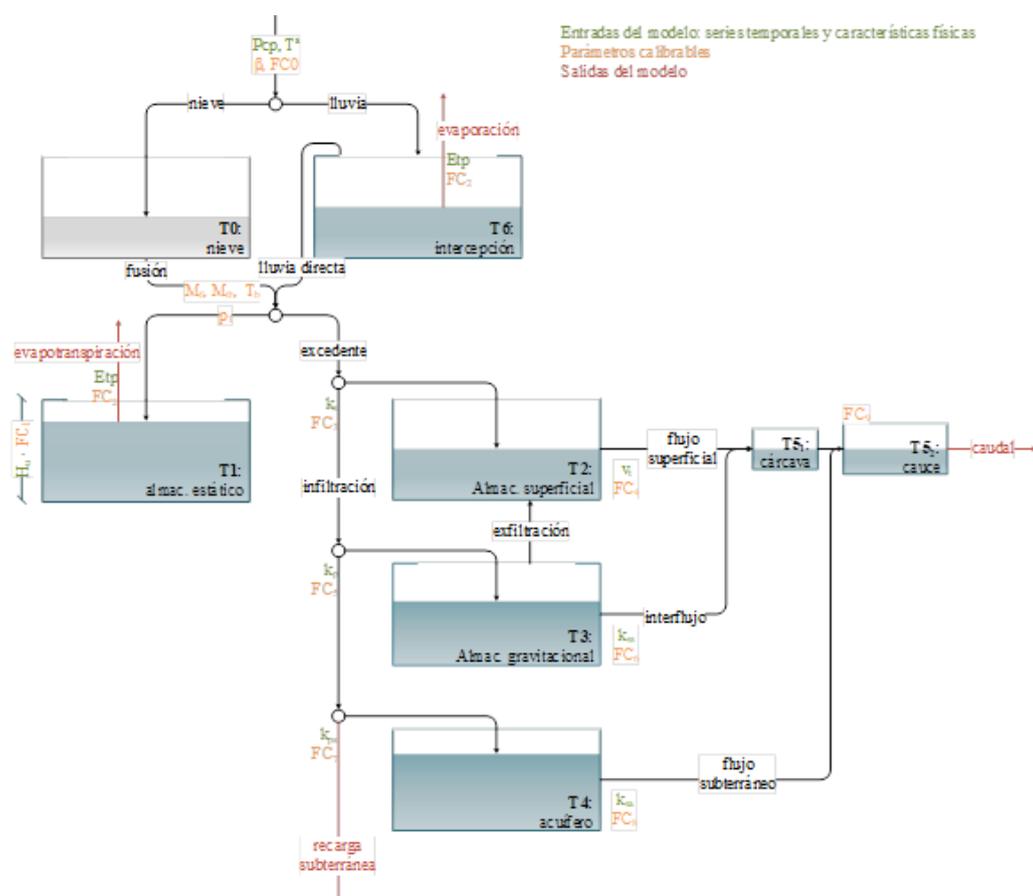
variables de estado del modelo (almacenamiento en cada uno de los tanques) y de los flujos entre ellos.

2.2.1.1. Características del modelo hidrológico TETIS

TETIS es un modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual, capaz de estimar y predecir eventos de crecida y evaluar la disponibilidad de los recursos hídricos. La modelación distribuida reproduce mejor la variabilidad espacial y temporal de los fenómenos hidrológicos, ofreciendo un mejor conocimiento de los procesos en el ámbito de estudio (GIMHA, 2018b). TETIS permite la integración de los procesos kársticos, la laminación de embalses y lagos, y la traslación de la escorrentía.

El objetivo final del modelo es simular el caudal circulante por un río. La escorrentía es generada a partir del cálculo del balance hídrico en cada celda, distribuyendo el agua en siete tanques de almacenamiento conceptuales, conectados entre sí tal y como muestra la Figura 6 (GIMHA, 2018a). El tanque 0 acumula la precipitación en forma de nieve hasta que, por fusión, pasa al resto del ciclo junto con la lluvia directa, siendo ésta la que no es interceptada por la vegetación en el tanque 6 (intercepción). El tanque 1 muestra el agua que queda retenida en balsas y la que retiene el suelo por capilaridad. El agua almacenada en los tanques 6 y 1 tiene como única salida la evapotranspiración. El excedente de agua, es decir, aquella que no entra al tanque 1, pasa al proceso de infiltración a lo largo de la columna de suelo. En este proceso aparecen tres tanques: el tanque 2 (almacenamiento superficial) almacena el agua que se mueve por la ladera, el tanque 3 (almacenamiento gravitacional) representa la zona no saturada, y el tanque 4 (acuífero) la zona saturada. A partir de los tres tanques del suelo se generan tres flujos que van a dar a los cauces (tanque 5): el flujo superficial, interfono y flujo subterráneo respectivamente. Hay una parte del agua que continúa infiltrándose llegando a la recarga subterránea.

Figura 6: Esquema Modelo TETIS



Fuente: Comunicación personal de Jesús Casado Rodríguez.

El modelo TETIS utiliza como variables climáticas de entrada la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración potencial. Para el cálculo de esta última variable se ha empleado el método de Hargreaves-Samani (Lu *et al.*, 2005), a partir de la siguiente fórmula:

$$\lambda PET = 0.0023 \cdot R_a \cdot TD^{0.5} \cdot (T + 17.8)$$

Donde PET es la precipitación diaria (mm / día), λ es el calor latente (MJ / kg), T es la temperatura media diaria (°C), R_a es la radiación solar extraterrestre (MJ / m² / día) y TD es la diferencia de temperatura diaria (°C).

Los datos de entrada (Anexo 3) consisten en observaciones puntuales, es decir, en las series temporales de esas variables registradas en las estaciones meteorológicas. Estos valores son interpolados al conjunto del ámbito de estudio para conformar una superficie

raster, usando como método de interpolación el inverso de la distancia al cuadrado. Dada la estrecha relación de ciertas variables meteorológicas con la altitud, ésta última se incluye como variable auxiliar en la interpolación a partir de la siguiente fórmula (GIMHA, 2018a):

$$X_0 = \sum_{j=l}^n w_{0j} [X_j + X_j \cdot \beta(z_0 - z_j)]$$

Donde w_{0j} es el factor de ponderación, una función entre la distancia del punto en el que se quiere predecir el valor de la variable y las estaciones de medición, obtenido a partir de la siguiente función:

$$w_{0j} = \frac{\frac{1}{d_{0j}^2}}{\sum_{i=l}^n \frac{1}{d_{0i}^2}}$$

β varía entre 0 y 1, representando el porcentaje de incremento de X con la altura y tiene unidades de m^{-1} .

Además de los valores de precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, un modelo distribuido requiere de otros parámetros para simular procesos como infiltración, escorrentía, acumulación etc. Esta información es elaborada a partir de una serie de mapas, con una resolución de 100 m, con los siguientes parámetros: la altitud, la pendiente, las direcciones de flujo, las celdas acumuladas, el almacenamiento estático del suelo (Hu), la capacidad de infiltración (Ks), la capacidad de percolación (Kp), la conductividad hidráulica de la zona no saturada (Kss), la conductividad hidráulica del acuífero (Ksa), la capacidad de pérdidas del acuífero profundo (Kps), la velocidad de ladera, la cobertera vegetal y los mapas de radiación (6, que se repiten para los restantes 6 meses), obtenidos tal y como se muestra en el apartado 2.1. En el presente trabajo se ha simulado a escala diaria, que es la resolución temporal de las series meteorológicas disponibles.

2.2.1.2. Calibración y validación del modelo

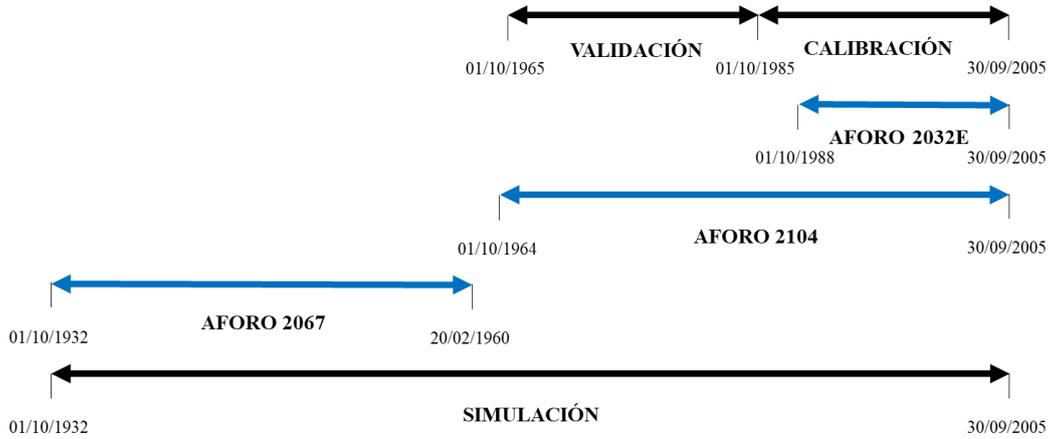
El modelo cuenta con una serie de factores correctores útiles para la calibración de los caudales simulados, que corrigen los diferentes parámetros de forma global, dentro de unos rangos mostrados en la Tabla 4 (resultados). La calibración del modelo permite obtener valores óptimos de los parámetros que minimizan las diferencias entre los valores observados y los resultados predichos por el modelo. Así mismo, es necesaria la validación del modelo para comprobar la bondad de los parámetros calibrados en un escenario de simulación distinto. La validación puede ser temporal, cuando se realiza en otro periodo de tiempo y en el mismo punto en el que se calibró; espacial, cuando es en otro punto de la cuenca y en el mismo periodo de tiempo que la calibración; o espacio-temporal, cuando se realiza en otro punto de la cuenca y en un periodo de tiempo distinto al de calibración (GIMHA, 2018a).

TETIS permite la calibración manual o automática de los factores correctores de los procesos de producción y propagación de la escorrentía, de los valores iniciales del estado de almacenamiento de cada uno de los tanques, del coeficiente de la interpolación de la precipitación con la altura, y de los parámetros del sub-modelo de nieve (GIMHA, 2018a).

El algoritmo de calibración automático utilizado es *shuffle complex evolution-University of Arizona* (SCE-UA) (Duan, Sorooshian y Gupta, 1994). Para ello selecciona puntos aleatorios y calcula el valor de la función objetivo en cada punto, clasificando los puntos asumiendo que la meta es minimizar el valor de la función (GIMHA, 2018a).

La calibración se ha realizado únicamente a caudal, comprobando que los criterios de rendimiento se ajustaban a los valores deseables. La calibración se ha realizado sobre la serie de caudal de la estación 2032E, entre el 1 de octubre de 1985 al 30 de septiembre de 2005; por su parte, la validación del modelo se ha realizado sobre la serie de caudal de la estación 2102, desde el 1 de octubre de 1965 al 30 de septiembre de 1985, haciendo así una validación espacio-temporal (Figura 7).

Figura 7: Periodo calibrado, validado y simulado



Fuente: Elaboración propia.

Los criterios de rendimiento utilizados para la calibración y validación del modelo han sido el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) y el sesgo (%errVol), mostrando a su vez en los resultados la raíz del error medio cuadrático (RMSE), obtenidos a partir de las siguientes formulas:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Q}_i - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$

Donde \hat{Q} es el caudal simulado, Q_i el caudal observado, n es el número de observaciones y \bar{Q} es el valor medio de los caudales observados.

$$\%errVol = \frac{V_0 - \hat{V}_P}{V_0} \cdot 100\%$$

Donde \hat{V}_P es el volumen total simulado y V_0 el volumen total observado.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_i - \hat{Q}_i)^2)}{n}}$$

Se considera como valores aceptables de NSE los situados por encima de 0,5, siendo 1 el ideal. El sesgo es aceptable en el rango de $\pm 10\%$, siendo 0 el ideal. El RMSE es considerado aceptable cuanto más próximo a 0.

2.2.2. Análisis de la variabilidad de los recursos hídricos

Para el análisis de la variabilidad temporal de los recursos hídricos en la cabecera del río Esla se han utilizado varios procedimientos: el análisis de tendencia mediante el test de Mann-Kendall, el cálculo del coeficiente de correlación de Spearman entre pares de variables y la técnica del *compositing*.

2.2.2.1. Análisis de tendencia: test Mann-Kendall

El análisis de la evolución en el tiempo que presentan las series meteorológicas (temperatura y precipitación) e hidrológicas (caudal) y su significación estadística se ha efectuado mediante el test de Mann-Kendall (Mann, 1945). Este test evalúa la significación estadística de una tendencia temporal (Helsel y Hirsch, 2002). El test tiene como hipótesis nula (H_0) la no existencia de tendencia y como hipótesis alternativa (H_1) su existencia. Dada la serie temporal de t valores $\{y_t\}$, se calcula la diferencia para cada par de valores $y_i - y_j$ ($i > j$). La desviación estándar es definida como el número de pares positivos (P) menos el número de pares negativos (M), quedando definida como $S = P - M$. Para un número de pares de valores (n) mayor a 10, se puede definir una estadística Z que sigue la distribución estándar normal donde:

$$Z = \begin{cases} (S - 1)/\sigma_s & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ (S + 1)/\sigma_s & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad \sigma_s = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}$$

El estadístico Z se compara con el nivel de significancia adoptado, existiendo tendencia si Z es inferior a dicho nivel de significancia. En este trabajo se ha adoptado como nivel de significancia 0,05.

2.2.2.2. Coeficiente de correlación: Spearman

El coeficiente de correlación de Spearman (Spearman, 1904), es una medida de la relación lineal entre dos variables aleatorias cuantitativas, basado en los rangos (posición) de ambas variables dentro de una serie estadística. Para su cálculo se aplica la siguiente fórmula:

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

Donde d es la diferencia entre los correspondientes estadísticos de orden de x - y y N es el número de parejas de datos. El valor del índice de correlación varía en el intervalo $[-1,1]$, indicando el signo el sentido de la relación. Para determinar si el valor del coeficiente de correlación de Spearman entre dos variables es significativo o consecuencia del azar, se aplica el Test de Student con un nivel de probabilidad del 95%.

En este trabajo, las variables cuantitativas son el caudal, las variables meteorológicas locales (temperatura, precipitación e innivación) y los índices de la circulación atmosférica, agregados para diferentes momentos del año hidrológico. El periodo de análisis para la relación entre caudal y variables climáticas ha sido 1932-2005; el periodo de análisis empleando los índices de la circulación atmosférica ha sido 1951-2005, ya que no se dispone de información anterior a 1951.

2.2.2.3. *Compositing*

El *Compositing* es una metodología empleada en Climatología Sinóptica para el análisis de la dinámica atmosférica asociada a determinados eventos climáticos. Consiste en la selección de cierto número de mapas que satisfacen un criterio definido por el investigador (Yarnal, 1993). Estos mapas son promediados y su valor transformado en anomalías, tras sustraer el valor promedio de todos los mapas del periodo analizado. En este trabajo, el criterio utilizado para establecer las categorías de análisis está basado en la transformación de las series anuales de caudal del río Esla en terciles.

2.2.3. Evaluación y gestión de los recursos hídricos

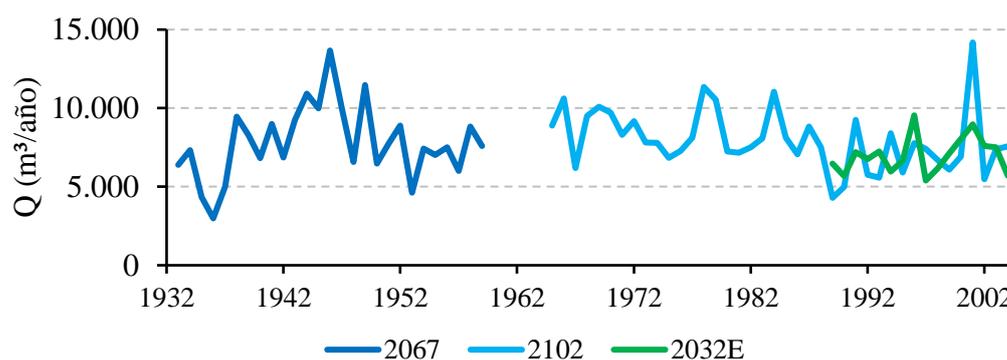
Se contrasta la información y previsiones que se plantean en el *Plan Hidrológico del Duero 2015-2021* (CHD, 2016) y en el *Plan Especial de Sequía, Demarcación Hidrográfica del Duero* (CHD, 2017), con los resultados obtenidos en el análisis que se aborda en este trabajo. Ello permite realizar una aproximación a la evaluación de la disponibilidad hídrica, su variabilidad, evolución y cómo afecta esto a la gestión del recurso hídrico.

3. RESULTADOS

3.1. Caudales en régimen natural: simulación hidrológica

En primer lugar, se ha realizado una reconstrucción de la evolución de los caudales en la cuenca del Esla desde 1932 hasta 2005 (Figura 8) a partir de la agregación de todas las series disponibles. Los resultados obtenidos muestran varios problemas. Por ejemplo, se observa una diferencia entre los valores medios de las estaciones 2067 y 2102, que puede estar relacionada con la ubicación de ambas estaciones. La serie 2067 registraba el caudal en Riaño, antes de la confluencia del Esla con el Yuso, mientras que la serie 2102 lo registraba aguas abajo, tras la unión de ambos ríos, por lo que el caudal es la suma de las aportaciones provenientes tanto de la cabecera del Esla como la del Yuso.

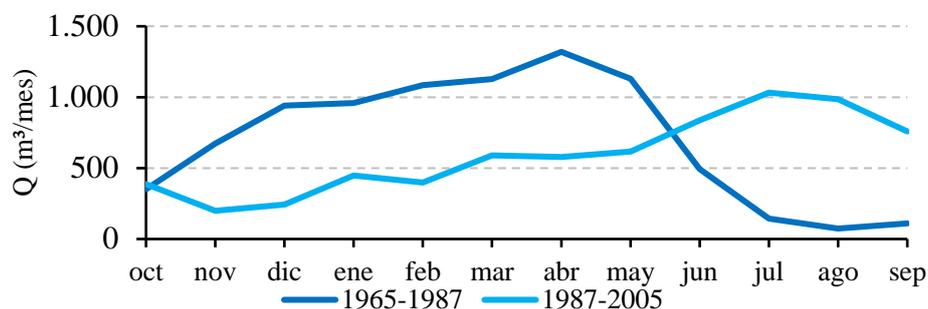
Figura 8: Caudales anuales en régimen natural



Fuente: Elaboración propia a partir de CEDEX, 2018.

Además, a partir de 1988 esta serie se ve afectada por la entrada en funcionamiento del Embalse de Riaño, que supone una alteración drástica del régimen fluvial. Si se comparan los caudales mensuales del periodo 1965-1987 con los del periodo 1987-2005 se observa esa alteración del régimen fluvial (Figura 9). En el primer caso, los caudales más elevados se registraban en el periodo comprendido entre diciembre y mayo, como correspondería a un río en régimen natural. Por el contrario, en el segundo periodo, los máximos se registran en julio y agosto, debido a la liberación de agua desde el embalse para atender a las demandas de agua para la agricultura.

Figura 9: Comparación régimen hidrológico antes y después de la puesta en marcha del embalse



Fuente: Elaboración propia a partir de CEDEX, 2018.

Estas deficiencias son las que justifican el recurso a una simulación hidrológica. Para ello, el primer paso consiste en la calibración del modelo, que se ha basado en la búsqueda, dentro de un rango de los valores óptimos, de factores correctores. En concreto se han calibrado los siguientes (Tabla 3) de manera manual, salvo DDF₁, DDF₂ y T_b, que se han calibrado de manera automática.

Tabla 3: Factores de calibración

Factor	Descripción	Rango		Valor Calibrado
		Mínimo	Máximo	
FC ₁	Almacenamiento capilar	0,01	3	0,1
FC ₂	Evaporación	0	2	0,4
FC ₃	Infiltración	0	1,5	0,2
FC ₅	Percolación	0	1,5	0,8
FC ₇	Pérdidas subterráneas	0	0,5	0
DDF ₁	Coefficiente de fusión de nieve sin lluvia	1	5	4,7795
DDF ₂	Coefficiente de fusión de nieve con lluvia	3	6	5,5435
T _b	Temperatura base de fusión de la nieve	-2	4	0,5777
β _{ppt}	Coefficiente de la interpolación de la precipitación con la cota	0	1	0,9

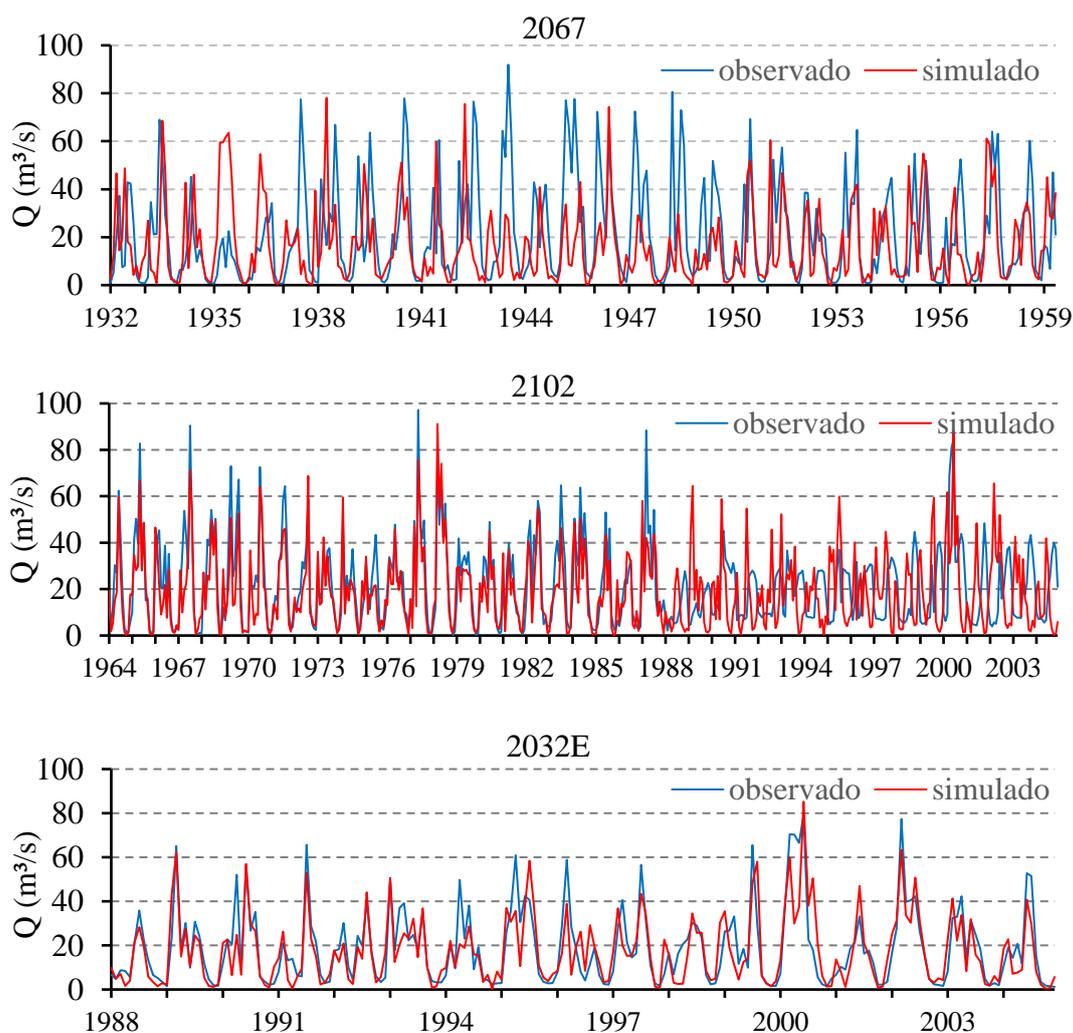
Fuente: Elaboración propia.

Los resultados y características de las tres fases de la simulación hidrológica (calibración, validación y simulación) se muestran en la Tabla 4; los criterios de rendimiento han sido calculados sobre la serie de caudal mensual. Los criterios de rendimiento de la calibración se encuentran dentro de los valores aceptables. En la

validación, el sesgo presenta un valor por encima del 10%, si bien los otros dos criterios tienen resultados aceptables.

De la comparación entre las series originales y las series simuladas podemos deducir diferentes situaciones. La simulación de la serie completa ofrece valores aceptables para la estación 2032E. Con respecto a la estación 2102 la simulación empeora con respecto a la validación, debido a que la puesta en funcionamiento del embalse alteró radicalmente los caudales, por encontrarse aguas abajo del mismo. La estación 2067 es la que muestra los peores valores de la simulación dado que existen grandes diferencias entre el valor observado y el simulado. La Figura 10 muestra el hidrograma mensual observado y simulado en las tres estaciones de aforo.

Figura 10: Caudal mensual observado y simulado en las estaciones 2067, 2102 y 2032E



Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos obtenidos de la simulación.

Con el fin de evaluar si los resultados discutibles podrían estar condicionados con el número y calidad de las estaciones meteorológicas usadas en la simulación de los caudales, se procedió a repetir ésta en subperiodos concretos. En el caso de la estación 2067, los resultados de la simulación mejoran sensiblemente a partir de los años cincuenta. El mismo procedimiento se ha seguido con la estación 2102, cortando la serie en el momento en el que la presa empezó a funcionar; los resultados de la simulación también mejoraron con respecto a la serie completa (Tabla 4).

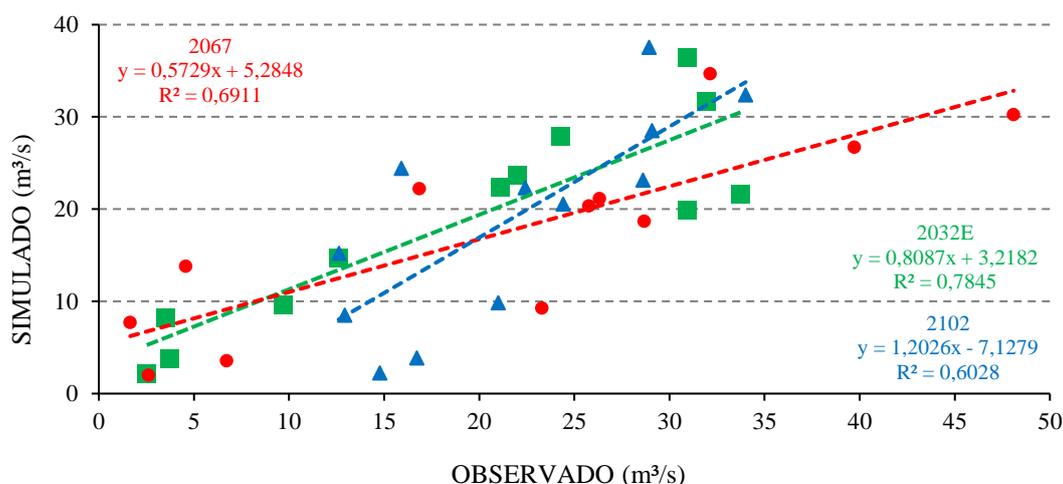
Tabla 4: Resultados simulación hidrológica

	Estación	Periodo	NSE	%errVol	RMSE
Calibración	2032E	01/10/1985 - 30/09/2005	0,689	-8,574	9,6
Validación	2102	01/10/1965 - 30/09/1985	0,766	-16,788	9,4
Simulación	2067	01/10/1950 - 20/02/1960	-0,001	-13,732	18,1
	2102	01/10/1964 - 31/12/1987	0,768	-16,284	9,2
	2032E	01/10/1932 - 30/09/2005	0,689	-8,574	9,6

Fuente: Elaboración propia.

También se ha evaluado la calidad de la simulación a lo largo del año, para determinar si la simulación es sensible a la modificación de las condiciones meteorológicas y ambientales (por ejemplo, el grado de interceptación del agua por la cobertera vegetal, mediante un procedimiento de regresión entre los valores observados y simulados. La estación 2032E muestra el mejor ajuste de las tres, siendo su R^2 más próxima a 1, presentando en los meses de enero y diciembre los peores ajustes, mientras que en junio, julio y agosto se muestran las menores discrepancias. La estación 2067 muestra grandes diferencias en los meses de octubre, enero, abril, mayo y junio, haciendo que su ajuste muestre valores menos precisos. Finalmente, la estación 2102 concentra sus mayores diferencias entre los meses de junio a agosto (Figura 11).

Figura 11: Caudal mensual observado y simulado en las estaciones 2067 y 2032E



Fuente: Elaboración propia.

3.2. Variabilidad temporal de variables meteorológicas y caudales

Como señaló en el apartado de metodología, la siguiente fase del trabajo consistió en un análisis de la evolución temporal de los componentes fundamentales del ciclo hidrológico en la cuenca del Esla, las variables meteorológicas y los caudales.

En el caso de los caudales, el análisis de tendencia se realizó tanto sobre las series de caudales medio anual originales como sobre la serie simulada. La Tabla 5 muestra los resultados de este análisis, detectándose ciertas discrepancias, que pueden estar asociadas a los diferentes periodos de análisis de cada una de las series. Por ejemplo, los resultados revelan una tendencia significativa y positiva tanto en los caudales simulados como en los observados en la estación 2032E, mostrando así que el caudal que llega al embalse está en aumento durante el periodo de análisis (1988-2005). Por el contrario, en la estación de aforo 2102 sólo los caudales observados muestran una tendencia significativa, aunque negativa, durante el periodo 1964-2005. En el caso de la estación 2067, no se ha detectado tendencia significativa alguna. Es de reseñar que el análisis de tendencia muestra las mismas conclusiones señaladas al hacer referencia a la calidad de las simulaciones. En las correspondientes gráficas (Anexo 4) se observa como la tendencia de la estación 2067 es contraria entre el observado y el simulado, siendo la primera positiva hasta 1948 y a partir de ahí negativa, mientras que en el simulado es negativa hasta 1948, continuando de manera positiva. La estación 2102 posee unas líneas de

tendencia similar entre los datos observados y simulados, en ambos casos negativa desde el principio hasta 1994 donde comienza a ser positiva. La tendencia en la estación 2032E es muy similar para los valores observados y simulados, positiva a lo largo de todo el periodo, con un pequeño descenso en los últimos años de estudio.

Tabla 5: Análisis de Mann-Kendal en caudal

Estación		Fecha inicio	Fecha fin	Significación	Tendencia
2067	Observado	10/01/1932	20/02/1960	0,705	
	Simulado			0,150	
2102	Observado	10/01/1964	30/09/2005	0,000	Negativa
	Simulado			0,302	
2032E	Observado	10/01/1988	30/09/2005	0,001	Positiva
	Simulado			0,000	

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las variables climáticas, el análisis de tendencia de la precipitación se ha centrado en los cuatro pluviómetros que se encuentran dentro de la cuenca, a pesar de haber utilizado 28 pluviómetros para la simulación hidrológica. La Tabla 6 muestra los resultados de dicho análisis. Dado que las series muestran diferentes longitudes, se procedió inicialmente a un análisis de las series completas y, posteriormente, a un segundo análisis correspondiente al periodo común 1970-2005. Las series más largas, que se inician en los años treinta, muestran ambas una tendencia positiva significativa. Sin embargo, durante el periodo común, que abarca los últimos 35 años, las precipitaciones o no muestran tendencia significativa, o esta es negativa. Así mismo, se han representado gráficamente las observaciones, las tendencias y la estacionalidad (Anexo 5), la estación 2620E posee tendencia negativa a lo largo de todo el periodo de estudio, mientras que, la tendencia en la estación 2621 es positiva hasta los años noventa, negativa hasta los 2000 y desde aquí continúa con una tendencia positiva. Por su parte la estación 2622 es al contrario que la 2621 empieza de manera negativa, continua positiva y finaliza con tendencia negativa. La estación 2624 no muestra tendencia en un principio, pero en torno a 1950 se convierte en positiva hasta 1965 donde comienza a ser negativa.

Tabla 6: Resultados del análisis de tendencia en la precipitación mediante el método de Mann-Kendall

Estación	Fecha inicio	Fecha fin	Significancia	Tendencia
2620E	01/04/1967	30/09/2005	0,000	Negativa
	01/01/1970	30/09/2005	0,001	Negativa
2621	01/12/1966	30/09/2005	0,008	Positiva
	01/01/1970	30/09/2005	0,133	
2622	01/10/1932	31/12/1995	0,012	Positiva
	01/01/1970	31/12/1995	0,014	Negativa
2624	01/10/1932	30/09/2005	0,000	Positiva
	01/01/1970	30/09/2005	0,260	

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las temperaturas, la única estación analizada (2624) muestra tendencia positiva en la temperatura media y en la mínima, sobre todo en esta última, tal y como se muestra en la Tabla 7 y en las respectivas gráficas (Anexo 6). La temperatura media presenta tendencia negativa hasta finales de los sesenta, siendo positiva hasta el final del periodo de estudio. En lo que se refiere a las máximas, éstas disminuyeron hasta principios de los sesenta y a partir de aquí aumentaron hasta los ochenta, terminando con una tendencia negativa. La temperatura mínima posee tendencia positiva desde el principio de la serie hasta el final. Si se observan los datos desde los años setenta, es sólo la temperatura mínima la que muestra tendencia (de nuevo creciente).

Tabla 7: Resultados del análisis de tendencia de la temperatura mediante el método de Mann-Kendall

Estación 2624	Fecha inicio	Fecha fin	Significancia	Tendencia
Tmax	01/10/1932	30/09/2005	0,828	
	01/01/1970	30/09/2005	0,182	
Tmed	01/10/1932	30/09/2005	0,015	Positiva
	01/01/1970	30/09/2005	0,617	
Tmin	01/10/1932	30/09/2005	0,000	Positiva
	01/01/1970	30/09/2005	0,000	

Fuente: Elaboración propia.

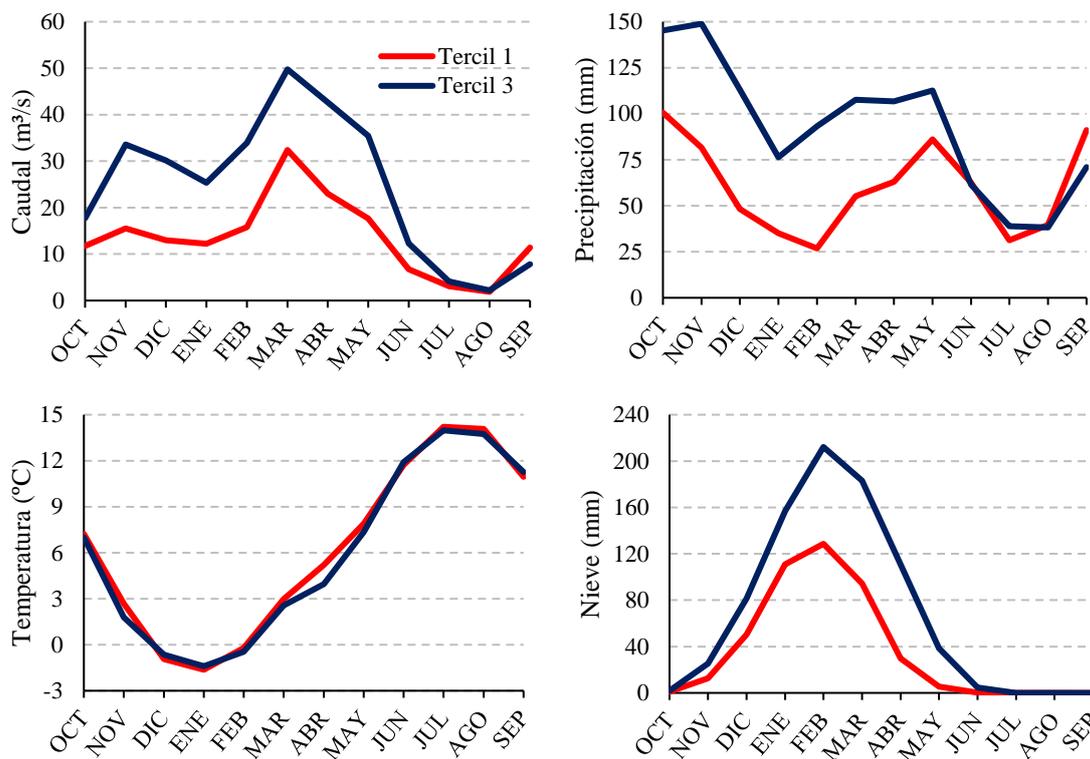
3.3. Caudal y variables climáticas: escalas de análisis

A lo largo de este apartado se analizará la relación entre los caudales del río Esla y las variables meteorológicas a diferentes escalas espaciales. Para ello se ha recurrido a diferentes procedimientos de análisis.

El primer nivel de análisis es el local. La Figura 12 muestra los valores mensuales de caudal, precipitación, temperatura media y nieve acumulada, correspondientes a años hidrológicos con escaso caudal (1^{er} tercil) y años con elevado caudal (3^{er} tercil). Como es lógico, la mayoría de las variables muestran grandes diferencias entre años húmedos y secos, salvo en el caso de la temperatura media. Aunque el régimen mensual del río Esla es similar en años extremos, se aprecian algunas diferencias entre los años con elevado y con escaso caudal. Las mayores diferencias, además del aumento generalizado de los valores mensuales entre noviembre y mayo (superan los 15 m³/s), se producen en los meses de noviembre y diciembre; también se aprecian diferencias significativas en mayo. Este periodo también corresponde a las diferencias más evidentes en precipitación, aunque en comparación con los caudales, los contrastes pluviométricos son más acentuados en otoño (una parte del exceso de precipitaciones es utilizado para reponer las reservas subterráneas) que en primavera (el exceso de caudal se nutre de las precipitaciones nivosas invernales acumuladas). El periodo de máxima acumulación de nieve coincide tanto en años húmedos como en secos en el mes de febrero, observándose las diferencias más significativas en marzo y abril.

El comportamiento de las temperaturas no muestra diferencias significativas entre años húmedos y secos, salvo en primavera (abril y mayo). En este caso, los años con mayor caudal corresponderían a primaveras frescas que retrasarían la fusión de la nieve acumulada en los meses previos.

Figura 12: Terciles de caudal, precipitación, temperatura y nieve



Fuente: Elaboración propia.

La cuantificación de las relaciones entre variables a escala estacional se realizó mediante un análisis de correlación. Este análisis muestra una estrecha relación entre caudales y precipitación en otoño e invierno, siendo menor durante la primavera. Por su parte, la relación entre caudal y temperatura es positiva, muy alta invierno, menor, pero aún significativa en otoño, y negativa en primavera. En cuanto a la nieve, sólo es significativa, pero muy elevada, en primavera. La relación entre temperatura y precipitación es positiva, pero sólo durante el invierno. Mientras que la nieve es únicamente significativa con la temperatura.

La cuantía y el signo de la correlación entre variables muestran que los caudales del otoño y del invierno dependen sobre todo de precipitaciones en forma de lluvia, con temperaturas moderadas. La reducción de las precipitaciones en primavera con respecto al otoño e invierno, hace que el caudal durante esta época del año dependa de la cantidad de nieve acumulada a lo largo del invierno anterior. Finalmente, cabe señalar que los inviernos con precipitaciones abundantes no coinciden siempre con inviernos con temperaturas bajas (la relación nieve-precipitación es débil).

Tabla 8: Correlación estacional entre caudal, precipitación, temperatura e innivación

PERIODO	VARIABLES	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)	NIEVE (mm)
OTOÑO (Octubre- noviembre)	Caudal (m ³ /s)	0,93**	0,28*	-0,15
	Precipitación (mm)		0,28*	-0,22
	Temperatura (°C)			-0,78**
INVIERNO (Diciembre-febrero)	Caudal (m ³ /s)	0,91**	0,63**	-0,14
	Precipitación (mm)		0,68**	-0,29*
	Temperatura (°C)			-0,65*
PRIMAVERA (Marzo-mayo)	Caudal (m ³ /s)	0,57**	-0,47**	0,81**
	Precipitación (mm)		-0,13	0,08
	Temperatura (°C)			-0,60**
Caudal primavera versus condiciones invierno	Caudal (m ³ /s)	0,04	-0,20	0,33**

Correlaciones superiores a 0,05 (*) y 0,01 (**).
Fuente: Elaboración propia.

El análisis de la variabilidad temporal de los componentes más relevantes del ciclo hidrológico realizado resalta el control fundamental ejercido por la variabilidad climática de los recursos hídricos en régimen natural en la cuenca alta del río Esla. Para confirmar esta afirmación, se ha procedido al análisis de la relación entre las diferentes variables hidroclimáticas y la circulación atmosférica, a dos escalas espaciales diferentes. La escala regional o sinóptica está representada por la presión a nivel del mar (SLP), la componente zonal (U) y meridiana del viento (V) y la vorticidad (Z). La escala hemisférica está representada por los índices numéricos correspondientes a los principales patrones de variabilidad de baja frecuencia (teleconexiones) que afectan a Europa Occidental.

La correlación entre variables hidrológicas e índices climáticos se ha realizado para tres periodos: los meses de octubre y noviembre (ON), los meses de diciembre, enero y febrero (DEF), y los meses de marzo, abril y mayo (MAM). Esta disgregación se ha elegido atendiendo a la duración temporal de los procesos de acumulación (lluvia y nieve) y fusión detectados en la cuenca del río Esla y señalados en las líneas precedentes.

En la Tabla 9 se presenta el coeficiente de correlación de Spearman entre las variables hidrológicas y la circulación atmosférica a escala regional, para estos tres periodos; se muestra además el grado de significancia de dicha correlación.

El caudal muestra una mayor correlación con SLP y el viento zonal, sobre todo en los meses invernales. La precipitación muestra correlaciones similares al caudal, siendo las principales el SLP y el viento zonal. La primera de ellas destaca desde octubre a febrero, mientras que la segunda muestra su mayor tendencia en los meses de invierno. Por su parte, las temperaturas no muestran correlaciones significativas con ninguno de los índices. Destaca en el periodo primaveral la relación con SLP y el viento meridiano, siendo este último con el que correlaciona en todos los periodos. Por último, la nieve sólo muestra correlación con el viento meridiano en el periodo de octubre – noviembre.

Tabla 9: Coeficientes de correlación de Spearman entre variables hidrológicas e índices climáticos

	PERIODO	SLP	VIENTO ZONAL	VIENTO MERIDIANO	VORTICIDAD
CAUDAL	ON	-0,57**	0,46**		0,31**
	DEF	-0,67**	0,62**	0,27*	0,28**
	MAM	-0,58**	0,58**		
PRECIPITACIÓN	ON	-0,61**	0,48**		0,33**
	DEF	-0,55**	0,50**		0,24*
	MAM	-0,66**	0,60**	0,28*	0,28*
TEMPERATURA	ON			0,50**	
	DEF		0,42**	0,35**	
	MAM	0,44**		0,47**	-0,31**
NIEVE	ON	-0,25*		-0,48**	
	DEF			-0,35**	0,31**
	MAM	-0,35**	0,33**		

Correlaciones superiores a 0,05 (*) y 0,01 (**).

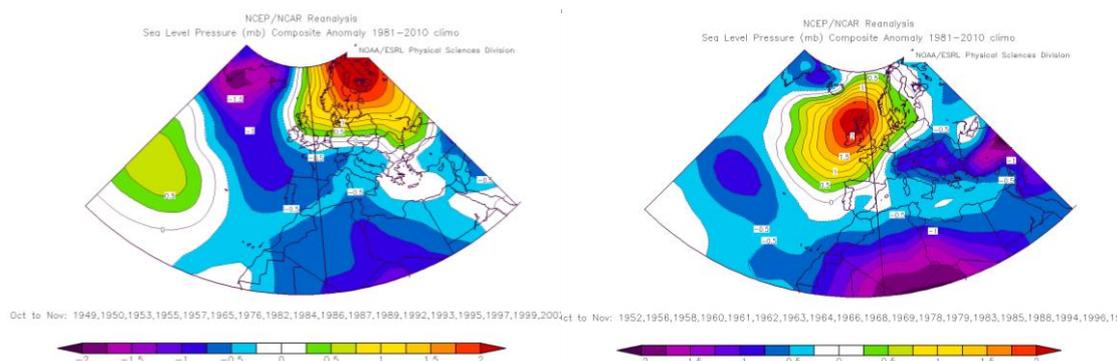
Fuente: Elaboración propia

Para ilustrar y explicar desde el punto de vista de la dinámica atmosférica las relaciones obtenidas entre las variables, se ha procedido a la obtención de los mapas de anomalías de la presión atmosféricas correspondientes a los años pertenecientes al 1^{er} y al 3^{er} tercil del caudal anual.

En los meses de octubre – noviembre, se aprecia que en el 1^{er} tercil las presiones están por debajo de lo normal, siendo notablemente más borrascosas, mientras que en el tercero las presiones se mantienen dentro de la normalidad. Esta situación de las presiones muestra que en los años con caudales por debajo de lo normal las precipitaciones son de

lluvia, mientras que cuando son por encima de lo normal las precipitaciones traen las primeras nevadas, que crean condiciones para que la nieve se mantenga hasta la primavera, generando reservas de nieve, esto es debido a que los vientos del anticiclón provienen del norte, siendo fríos, mientras que en el primer caso las precipitaciones provienen del Atlántico por lo que son cálidas (Figura 13).

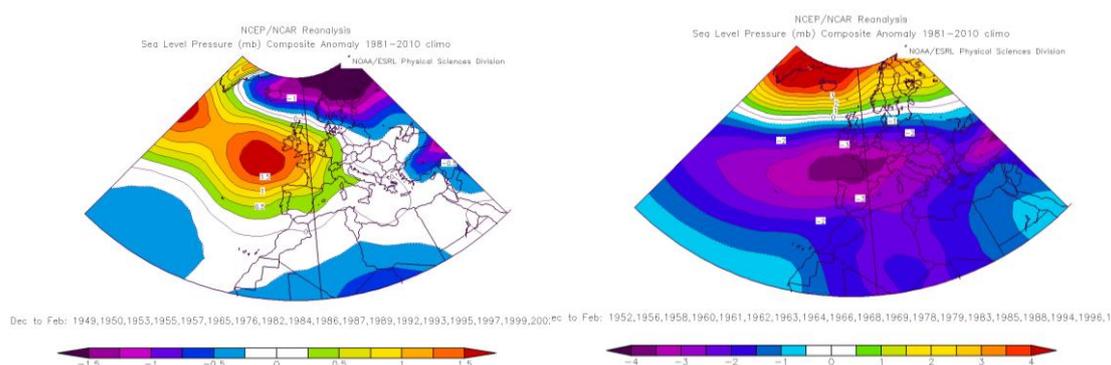
Figura 13: Presión del mar en octubre – noviembre



Fuente: NOAA, 2018.

Por su parte, en los meses invernales, se muestra como el primer tercil presenta una tendencia hacia las presiones altas, haciendo que las precipitaciones sean escasas, mientras que el tercero, se observa claramente una situación de fuertes borrascas en el ámbito de estudio, cuya precipitación será en forma de nieve (Figura 14).

Figura 14: Presión del mar en diciembre – enero – febrero

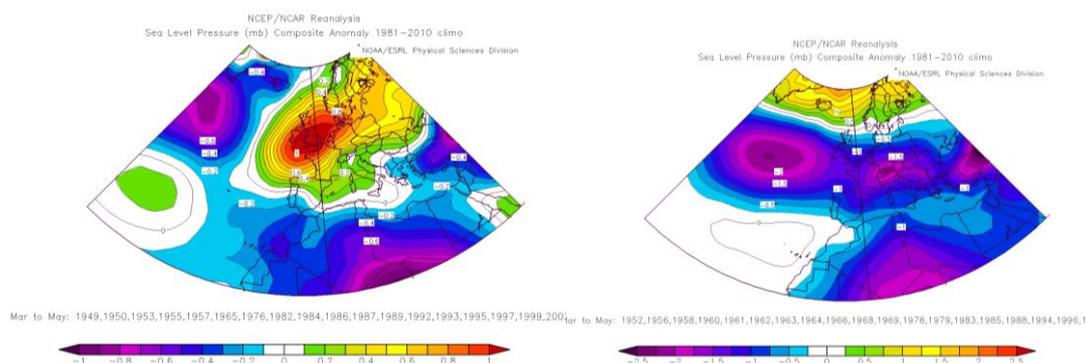


Fuente: NOAA, 2018.

En cuanto a los meses primaverales, las presiones de los años por debajo de lo normal, muestran una tendencia hacia las altas presiones, que provienen del mediterráneo, por lo que no son muy frías y las precipitaciones que puedan traer derriten la nieve, además el

anticiclón impide las borrascas con vientos secos. Por su parte, los años con caudales por encima de lo normal muestran una situación de borrascas en el ámbito de estudio, no tan fuerte como en el periodo anterior, pero que pueden traer consigo episodios nivales (Figura 15).

Figura 15: Presión del mar en marzo – abril – mayo



Fuente: NOAA, 2018.

Estos mapas de presión del mar ponen de manifiesto que, tanto en invierno como en primavera, los anticiclones afectan a los datos que se encuentran en el 1^{er} tercil, mientras que las borrascas afectan a los del 3^{er} tercil. En otoño la situación es contraria, el 1^{er} tercil se enfrenta a las borrascas, mientras que el tercero se encuentra en situación normal.

Los años con elevado caudal se deben fundamentalmente a inviernos y primaveras con abundantes precipitaciones, provocados por el paso frecuente de borrascas atlánticas con una trayectoria W-E. Por el contrario, cuando estas borrascas son sustituidas por anticiclones, en invierno situados al W de la Península Ibérica mientras que en primavera se ubican sobre las Islas Británicas, el volumen de precipitaciones disminuye acusadamente y la fusión de la nieve se acelera. El otoño muestra, por el contrario, un comportamiento singular, en relación al tipo de precipitación habitual durante esta estación. La mayor parte de ellas son precipitaciones líquidas, que se incorporan inmediatamente al caudal del río Esla; sólo cuando la dinámica atmosférica adelanta el invierno con precipitaciones sólidas éstas pueden mantenerse durante la mayor parte del invierno.

Por otro lado, la Tabla 10 presenta el coeficiente de correlación de Spearman entre las variables hidrológicas y la circulación atmosférica a escala hemisférica, para estos tres periodos con su correspondiente significación.

El caudal muestra una mayor correlación en octubre – noviembre con SCA, mientras que en los meses invernales correlaciona con la NAO y EA. Por su parte, la precipitación muestra su mayor correlación con SCA en octubre – noviembre, con la NAO correlaciona en primavera y con EA en invierno y primavera. Las temperaturas muestran correlaciones significativas con EA y SCA, destacando el primero de ellos en invierno y primavera. Por último, la nieve que correlaciona con SCA en octubre – noviembre.

Tabla 10: Coeficientes de correlación de Spearman entre variables hidrológicas e índices climáticos

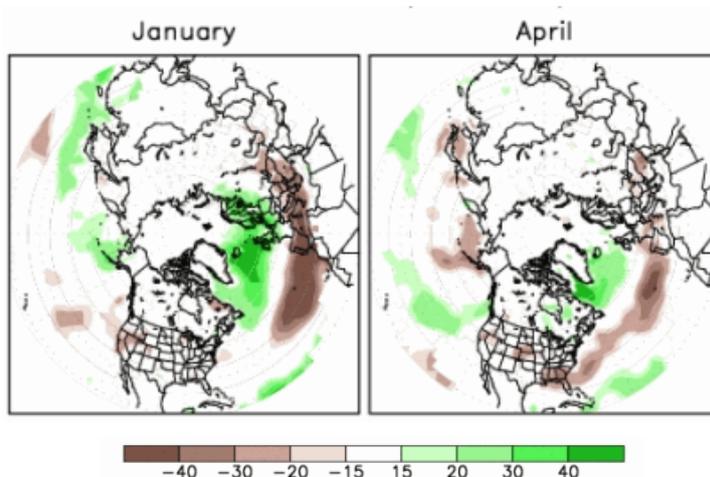
	PERIODO	NAO	EA	EA_WR	SCA
CAUDAL	ON				0,54**
	DEF	-0,43**	0,43**		
	MAM				0,28*
PRECIPITACIÓN	ON	-0,27*			0,52**
	DEF		0,39**		
	MAM	-0,40**	0,39**	-0,31*	
TEMPERATURA	ON				-0,34**
	DEF		0,44**		
	MAM		0,45**		-0,41**
NIEVE	ON				0,39**
	DEF				
	MAM	-0,27*			

Correlaciones superiores a 0,05 (*) y 0,01 (**).

Fuente: Elaboración propia.

En los mapas que ofrece la NOAA sobre la correlación existente entre 1950-2000 entre el índice de la NAO y las salidas mensuales de temperatura y de precipitación se observa como concuerdan con los resultados obtenidos anteriormente, las temperaturas no muestran tendencias en ninguna de las estaciones, mientras que las precipitaciones muestran tendencia entre diciembre y mayo, sobre todo en el primer periodo, al igual que en los datos propios (Figura 16).

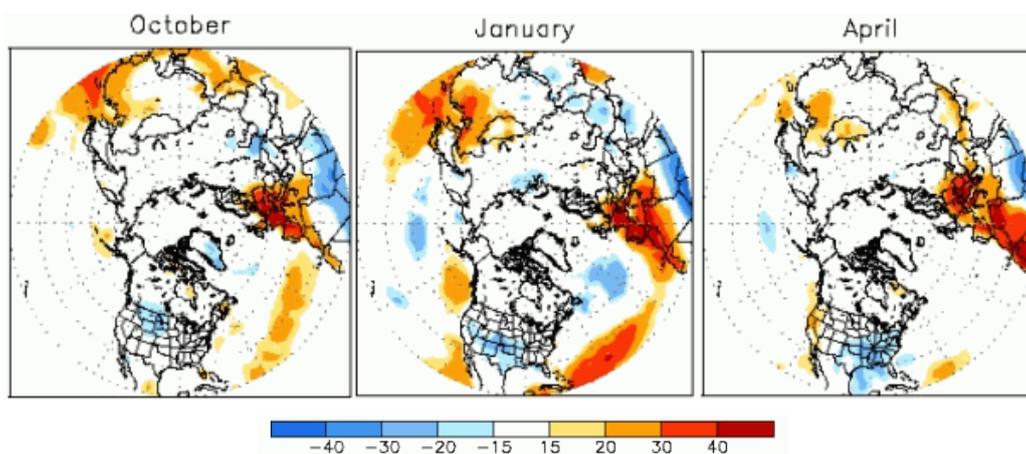
Figura 16: Correlación entre las temperaturas y las precipitaciones con la NAO



Fuente: NOAA, 2005.

Así mismo, la NOAA también realiza los mapas la correlación existente entre 1950-2000 entre el índice EA y las salidas mensuales de temperatura y de precipitación, se observa como el ámbito de estudio no encuentra una correlación con las precipitaciones, mientras que en las temperaturas sí que se observa correlación, en este caso a lo largo de todo el año, mientras que en el estudio llevado a cabo solo se produce en dos de los tres periodos analizados (Figura 17).

Figura 17: Correlación entre las temperaturas y la precipitación con la EA



Fuente: NOAA, 2005.

4. DISCUSIÓN

En el apartado anterior, se ha puesto de manifiesto la existencia de una estrecha relación entre caudales y precipitación, sobretodo en otoño e invierno. Los caudales en estas estaciones dependen de precipitaciones en forma de lluvia, con temperaturas moderadas.

Al realizar el análisis de la variabilidad temporal de los componentes del ciclo hidrológico se fundamenta el control de la variabilidad climática en la variabilidad de los recursos hídricos en régimen natural en la cuenca alta del río Esla.

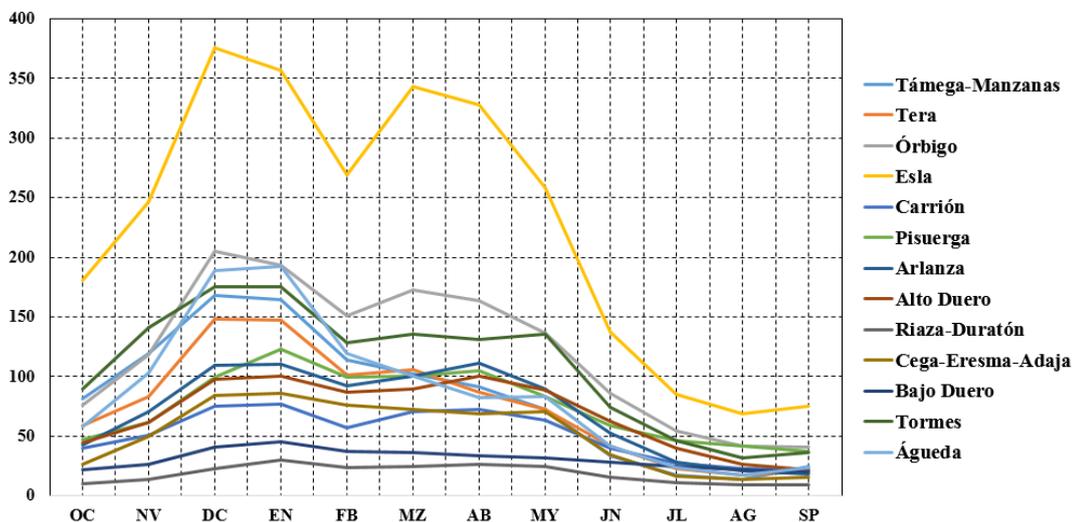
Los años con temperaturas mayores y precipitaciones menores muestran caudales por debajo de lo normal, en los meses de otoño ligados a borrascas con precipitaciones líquidas, mientras que, en invierno las precipitaciones son escasas, y en primavera las precipitaciones son cálidas, ya que provienen del Mediterráneo haciendo que se derrita la nieve. Por todo ello, los recursos hídricos pueden verse afectados por la tendencia al descenso de las precipitaciones y al aumento de las temperaturas, comprometiendo así a la disponibilidad.

En la cuenca del Esla esta situación puede ser especialmente grave si tenemos en cuenta, como ya se ha comentado, su importancia en el conjunto de la Demarcación del Duero: cubre un 10% de la demanda urbana y otro 10% de la ganadera, pero casi una cuarta parte de las necesidades hídricas de la agricultura (un 24%) y un 27% de las industriales. En definitiva, los recursos hídricos del Esla suponen unos 950 hm³/año, de los cuales el regadío representa el 83% (CHD, 2017).

Entre los objetivos del *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero. 2015-2021* (CHD, 2016), se plantea incrementar la superficie de regadío hasta tres veces más de los existentes en la actualidad para el año 2027. Como es obvio, ello supone un aumento del aporte del recurso a los canales de regadío. Esta cuestión nos lleva a plantearnos, al margen de que se pueda entrar en conflicto con el resto de las demandas de la cuenca, si ello será posible teniendo en cuenta la evolución actual de la disponibilidad hídrica, pues las variables climáticas muestran que desde 1970

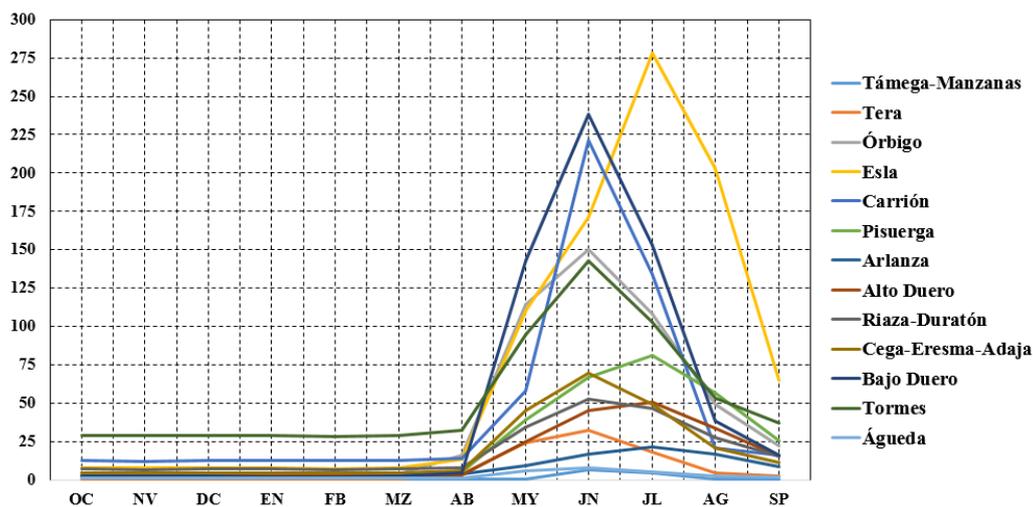
la tendencia de las precipitaciones es negativa, en particular en aquellos periodos en los que la demanda aumenta, en este caso ligada a la actividad agraria.

Figura 18: Aportación media mensual (en hm³), por unidad territorial, en la cuenca del Duero. 1980-1981 y 2005-2006



Fuente: Elaboración propia a partir de CHD, 2017: 22, Tabla 9.

Figura 19: Demanda total media mensual (en hm³), por unidad territorial, en la cuenca del Duero. 1980-1981 y 2005-2006



Fuente: Elaboración propia a partir de CHD, 2017: 36, Tabla 21.

Por otro lado, este incremento de la superficie de regadío puede afectar e incluso, a nuestro criterio, perjudicar a los objetivos que plantea el *Plan Especial de Sequía* (CHD,

2017), ya que han de garantizar la disponibilidad de agua, minimizar los efectos negativos de la sequía, y minimizar los efectos negativos en las actividades económicas.

5. CONCLUSIONES

Este documento se ha centrado en el análisis de los recursos hídricos en la cabecera del río Esla. Para ello ha sido necesaria la implementación del modelo distribuido TETIS, el cual ha permitido realizar una serie completa de los valores de caudal a lo largo del periodo de estudio.

Dicha serie muestra una tendencia positiva en las aportaciones que está llegando al Embalse de Riaño, mientras que la estación aguas abajo del mismo muestra una tendencia negativa, debido a la regulación que este ejerce sobre el agua. Por su parte, las variables climáticas muestran que desde 1970 la tendencia de las precipitaciones es negativa, mientras que la tendencia en las temperaturas es solo significativa en las mínimas, siendo esta positiva.

Mediante la comparación de años húmedos (mucho caudal) y secos (poco caudal), se ha podido determinar que las variables más importantes a la hora de explicar esas diferencias son la precipitación y la nieve, mientras que en la temperatura no tiene un impacto relevante.

La correlación estacional entre caudal, precipitación, temperatura y nieve muestra que los caudales de otoño e invierno dependen fundamentalmente de las precipitaciones líquidas, mientras que los de primavera dependen también de la nieve acumulada.

En la comparación de las variables hidrológicas y la circulación atmosférica, a escala regional, muestran caudal y precipitaciones muestran una relación estrecha con la presión a nivel del mar y el viento zonal, mientras que las temperaturas y la nieve se relacionan en menor medida con el viento meridiano. Cabe señalar que en invierno y primavera los años secos están causados por una frecuencia más alta de lo habitual de anticiclones, mientras que los húmedos corresponden a más borrascas.

A escala hemisférica, el caudal y las precipitaciones muestran relación con la Oscilación escandinava durante el otoño, mientras que en invierno y primavera las temperaturas se encuentran relacionadas con las oscilaciones Nor-atlántica y del Atlántico Este.

Este análisis muestra la necesidad de mayor información para poder realizar un diagnóstico de los recursos hídricos en la cuenca del Esla. El caudal muestra problemas de fiabilidad en la toma de datos en los años previos a 1950, y, además, se observan problemas debidos al cambio de localización de la estación de Riaño, dado que primero recogía el caudal únicamente de la cabecera del Esla y después sumaba a este el caudal del río Yuso. Se debería de disponer de un mayor número de datos para poder realizar un diagnóstico de lo que está sucediendo en esta cuenca de montaña.

La evolución que nos muestra es a un aumento de los caudales, debida a la incorporación del cauce del río Yuso, que se contrapone a las tendencias de temperatura y precipitación. Por lo que, si no se tienen en consideración los factores que afectan al ciclo hidrológico podría decirse que hay disponibilidad.

Esto nos lleva a que el *Plan Hidrológico del Duero 2015-2021* (CHD, 2016) pretenda incrementar los regadíos, abasteciéndose de la cuenca del río Esla, para los cuales se hace necesaria tener una disponibilidad hídrica elevada, que entra en contraposición con los objetivos que pretende el *Plan Especial de Sequía* (CHD, 2017).

Con los resultados obtenidos en el análisis del recurso se pone de manifiesto que el Embalse de Riaño ha de desembalsar mayores cantidades de agua para abastecer a estos nuevos regadíos, lo cual entra en conflicto con las tendencias que se han mostrado anteriormente, dado que las precipitaciones van en decrecimiento y las temperaturas en aumento, haciendo que el agua embalsada posea dos problemas, uno de llenado, puesto que si llueve menos, menor será el agua que llegue al Embalse, y otro, de disipación, dado que si aumentan las temperaturas el agua embalsada incrementará su evaporación. Haciendo que la cantidad de recurso disminuya con el tiempo, haciendo poco viable la posibilidad de triplicar los regadíos del Duero.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mis tutores, Domingo Rasilla Álvarez y Manuel del Jesus Peñil, haber aceptado la dirección de este trabajo, así como sus aportaciones y el apoyo que me han dado. Así mismo, al Departamento de Geografía, Urbanismo y Ordenación del Territorio y al Instituto de Hidráulica Ambiental (IH Cantabria), de la Universidad de Cantabria. Por último, pero no por ello menos importante, quiero agradecer la oportunidad de formar parte del equipo del IH Cantabria, así como, la acogida y ayuda que he recibido, muy especialmente la de Jesús Casado Rodríguez cuya dedicación y paciencia ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES

- AEMET (2018). *Datos de precipitación y temperatura*. Madrid: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Agencia Estatal de Meteorología.
- Beniston, M. (2005). Mountain Climates and Climatic Change: An Overview of Processes Focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8-9): 1587-1606. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-005-2684-9>
- Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2003). The influence of hydroelectrical development on the flow regime of the karstic river Cetina. *Hydrological Processes*, 17(1): 1-15. DOI: 10.1002/hyp.1190
- CEDEX. (2018). *Anuario de aforos 2014 - 2015*. Madrid: Ministerio de Fomento, Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
- CHD (2016). *Plan Hidrológico de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero 2015-2021*. Anejo 5 Demandas de agua. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Duero. Disponible, en septiembre de 2018, en: <http://www.chduero.es/Inicio/Planificaci%C3%B3n/Planhidrol%C3%B3gico20152021/PlanHidrol%C3%B3gico/tabid/734/Default.aspx>
- CHD (2017). *Plan Especial de Sequía, Demarcación Hidrográfica del Duero*. Memoria. Borrador para consulta pública (21 de diciembre de 2017). Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Confederación Hidrográfica del Duero. Disponible, en septiembre de 2018, en: <http://www.chduero.es/Inicio/Organismo/HistoriaFunciones/tabid/88/Default.aspx>
- CNIG. (2018). *Centro de descargas*. Madrid: Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional, Centro Nacional de Información Geográfica. Disponible, en septiembre de 2018, en: <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- Cosandey, C.; Robinson, M. (2000). *Hydrologie continentale*. Paris: Armand Colin.
- CPC (2012). *AAO, AO, NAO, PNA*. NOAA, National Weather Service, Climate Prediction Center. Disponible, en septiembre de 2018, en: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml
- Crockford, R.H.; Richardson, D.P. (2000). Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate.

- Hydrological Processes*, 14(16-17): 2903-2920. DOI: [10.1002/1099-1085\(200011/12\)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6](https://doi.org/10.1002/1099-1085(200011/12)14:16/17<2903::AID-HYP126>3.0.CO;2-6)
- Duan, Q.; Sorooshian, S.; Gupta, V.K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158(3-4): 265-284. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(94\)90057-4](https://doi.org/10.1016/0022-1694(94)90057-4).
- ESDAC. (2018). *3D Soil Hydraulic Database of Europe at 1 km and 250 m resolution*. European Soil Data Centre. Disponible, en septiembre de 2018, en: <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/content/3d-soil-hydraulic-database-europe-1-km-and-250-m-resolution>
- García Codron, J.C. (1994). *El impacto climático de los embalses cantábricos*. Serie Geográfica, 4: 33-44. Disponible, en septiembre de 2018, en: <http://www.divulgameteo.es/uploads/Impacto-clim%C3%A1tico-embalses-cant%C3%A1bricos.pdf>
- GIMHA (2018a). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.9.0*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental Distribuida.
- GIMHA (2018b). *Grupo de Investigación en Modelación Hidrológica y Ambiental*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia. Consultado, en septiembre de 2018, en: http://lluvia.dihma.upv.es/index_es.html
- Helsel, D.R.; Hirsch, R.M. (2002). *Statistical Methods in Water Resources*. US Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations Book 4, chapter A3. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://water.usgs.gov/pubs/twri/twri4a3/>
- IGN (2006). *Corine Land Cover 2006*. Madrid: Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.
- IGN (2015). *Modelo Digital del Terreno*. Hojas 55, 56, 79, 80, 81, 104, 105, 106, 107, 131 y 132. Serie: MTN25, 1:25.000. Madrid: Ministerio de Fomento, Instituto Geográfico Nacional.
- INE (2018a). *Censos 1981-2011*. Madrid: Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Instituto Nacional de Estadística. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.ine.es/intercensal/inicio.do>

- INE (2018b). *Censos 1900-1970*. Madrid: Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Instituto Nacional de Estadística. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.ine.es/inebaseweb/libros.do?tntp=71807>
- INE (2018c). *Padrón 2017*. Madrid: Ministerio de Economía, Industria y Competitividad, Instituto Nacional de Estadística. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.ine.es/jaxiT3/Tabla.htm?t=2877&L=0>
- Jenkinson, A.F.; Collison, F.P. (1977). *An Initial Climatology of Gales over the North Sea*. Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62, Bracknell: Meteorological Office.
- Lu, J.; Sun, G.; McNulty, S.G.; Amatya, D.M. (2005). A comparison of six potential evapotranspiration methods for regional use in the southeastern United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 41: 621-633. DOI: [10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03759.x)
- Maingi, J.K.; Marsh, S.E. (2002). Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. *Journal of Arid Environments*, 50(1): 53-79. DOI: <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0860>
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3): 245-259. Stable URL: <https://www.jstor.org/stable/1907187>
- MAPAMA (2018a). *Directiva Marco del Agua*. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/marco-del-agua/default.aspx>
- MAPAMA (2018b). *Planificación hidrológica*. Madrid: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Consultado, en septiembre de 2018, en: http://www.mapama.gob.es/es/agua/temas/sistema-espaniol-gestion-agua/Planificacion_hidrologica.aspx
- Milly, P.C.D.; Dunne, K.A.; Vecchia, A.V. (2005). Global pattern of trends in streamflow and water availability in a changing climate. *Nature*, 438: 347-350. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature04312>
- Nilsson, C.; Reidy, C.A.; Dynesius, M.; Revenga, C. (2005). Fragmentation and Flow Regulation of the World's Large River Systems. *Science*, 308(5720): 405-408. DOI: [10.1126/science.1107887](https://doi.org/10.1126/science.1107887).

- NOAA (2005). *North Atlantic Oscillation (NAO)*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Consultado, en septiembre de 2018, en: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao_pmap.shtml
- NOAA (2012). *Northern Hemisphere Teleconnection Patterns*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>
- NOAA (2018). *Physical Sciences Division*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Consultado, en septiembre de 2018, en: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/>
- Spearman, C. (1904). "General Intelligence," Objectively Determined and Measured. *American Journal of Psychology*, 15(2): 201-293.
- Verstraeten, G.; Poesen, J. (2000). Estimating trap efficiency of small reservoirs and ponds: methods and implications for the assessment of sediment yield. *Progress in Physical Geography*, 24(2): 219-251. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913330002400204>
- Yarnal, B. (1993). *Synoptic climatology in environmental analysis: a primer*. London: Belhaven Press.

ANEXOS

ANEXO 1: Estaciones Climatológicas

Estación	Datos	Fecha Inicio	Fecha Fin	Estación	Datos	Fecha Inicio	Fecha Fin
1167C	Precipitación	10/01/1971	31/12/1994	2366	Precipitación	01/01/1961	30/09/2005
1172U	Precipitación	01/01/1974	30/09/2005	2367	Precipitación	04/01/1933	30/09/2005
1174I	Precipitación	07/01/1971	30/09/2005	2620E	Precipitación	04/01/1967	30/09/2005
1186I	Precipitación	01/01/1979	30/09/2005	2621	Precipitación	12/01/1966	30/09/2005
1191	Precipitación	11/01/1955	30/09/2005	2622	Precipitación	10/01/1932	31/12/1995
1214E	Precipitación	09/01/1969	31/10/1996	2624*	Precipitación y Temperatura	10/01/1932	30/09/2005
2223	Precipitación	03/01/1963	31/03/1988	2626	Precipitación	10/01/1932	31/05/1999
2224	Precipitación	03/01/1966	30/09/2005	2631	Precipitación	10/01/1932	31/10/1995
2225	Precipitación	03/01/1967	31/10/2003	2632	Precipitación	08/02/1933	30/09/2005
2231	Precipitación	03/01/1963	30/09/2005	2633	Precipitación	01/01/1963	30/09/2005
2235	Precipitación	04/01/1935	30/11/1996	2636	Precipitación	01/01/1934	30/09/2005
2271	Precipitación	01/01/1945	28/02/1995	2667	Precipitación	10/01/1932	30/09/2005
2362	Precipitación	10/01/1932	30/09/2005	2668	Precipitación	11/01/1965	28/02/1997
2363	Precipitación	01/01/1961	30/09/2005				
2364	Precipitación	03/01/1942	31/10/2000				

* Los datos de precipitación son los resultantes de la unión de la 2624 y la 2624I, los datos de temperatura han sido tratados a partir del rellenado y homogeneizado, y de la comparación con estaciones próximas.

ANEXO 2: Estaciones de Aforo

Estación	Fecha Inicio	Fecha Fin
2067	10/01/1932	20/02/1960
2102	10/01/1964	30/09/2005
2032E*	10/01/1988	30/09/2005

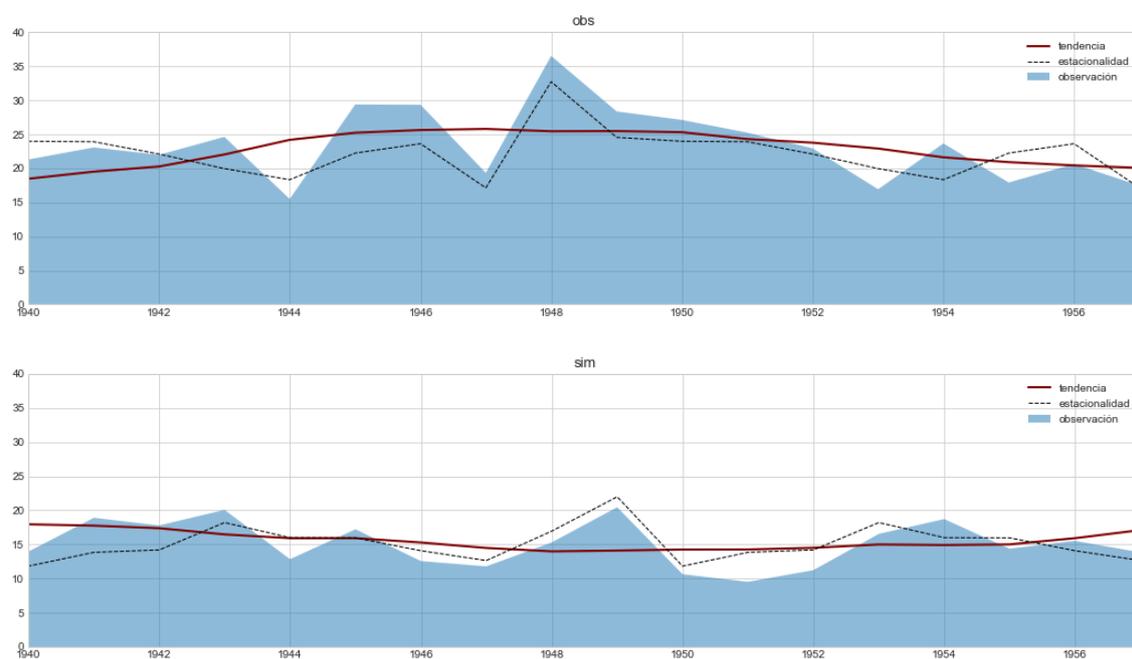
* La estación 2032E es el caudal calculado a la salida del embalse

ANEXO 3: Ficheros de entrada en TETIS

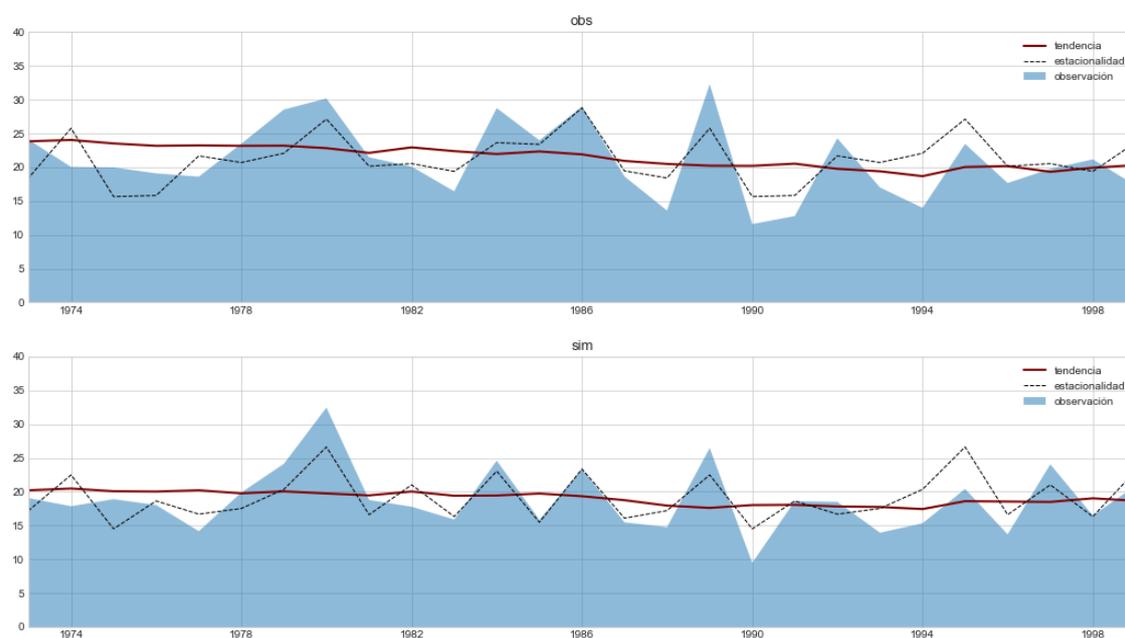
- **FactorETMes:** archivo de texto en el que se muestran los valores mensuales de reducción de evapotranspiración y de interceptación máxima.
- **Fichero_entrada:** archivo de texto en el que se muestran las series temporales de las variables hidrometeorológicas en formato CEDEX.
- **Hu:** capa ASCII en la que se muestra la capacidad máxima de almacenamiento estático en la capa superior del suelo.
- **Ks:** capa ASCII en la que se muestra la capacidad de infiltración del suelo.
- **Kp:** capa ASCII en la que se muestra la capacidad de percolación del sustrato.
- **Kss:** capa ASCII en la que se muestra la conductividad hidráulica para el interflujo, definida por la estructura de macroporos del mismo.
- **Kps:** capa ASCII en la que se muestra la capacidad de percolación al acuífero profundo.
- **Vel:** capa ASCII en la que se muestra la velocidad del flujo superficial en la ladera.
- **Cobveg:** capa ASCII en la que se muestra los índices de cobertura vegetal para la evapotranspiración.
- **Slope:** capa ASCII en la que se muestra las pendientes en tanto por 1 (m/m).
- **Dirflujo:** capa ASCII en la que se muestra la dirección del flujo.
- **Acum:** capa ASCII en la que se muestra las celdas acumuladas.
- **Rad01:** capa ASCII en la que se muestra el mapa de radiación solar en enero, hay 6 capas, una para cada mes de enero a junio, ya que los otros 6 los hace simétricos.

ANEXO 4: Líneas de tendencia en el caudal observado y simulado

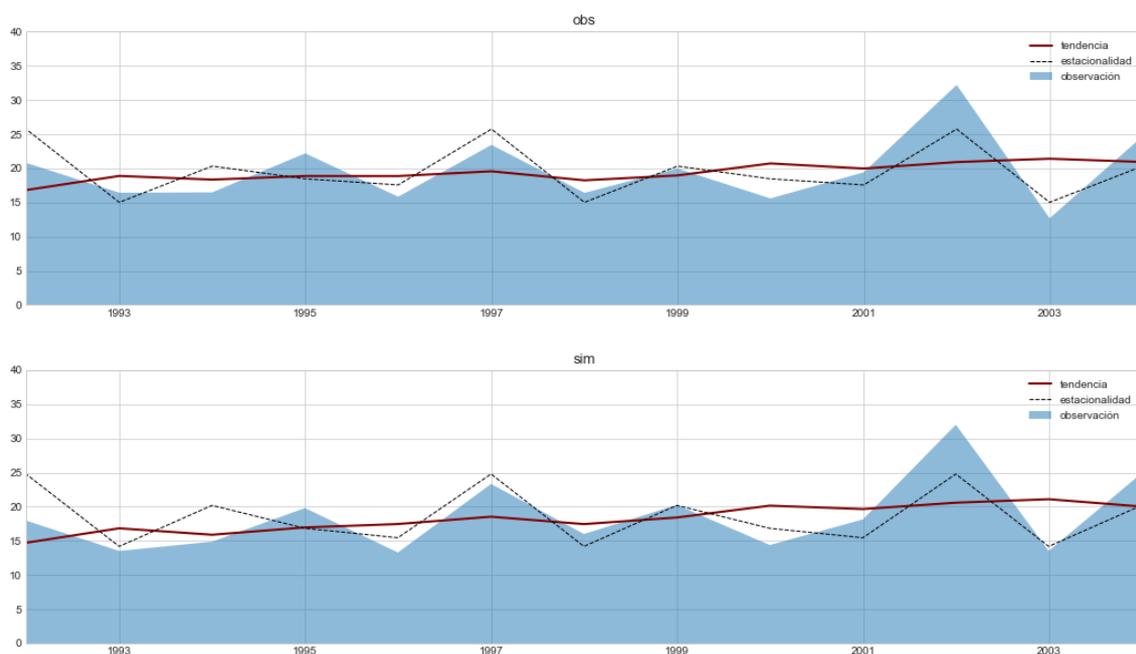
• Estación 2067



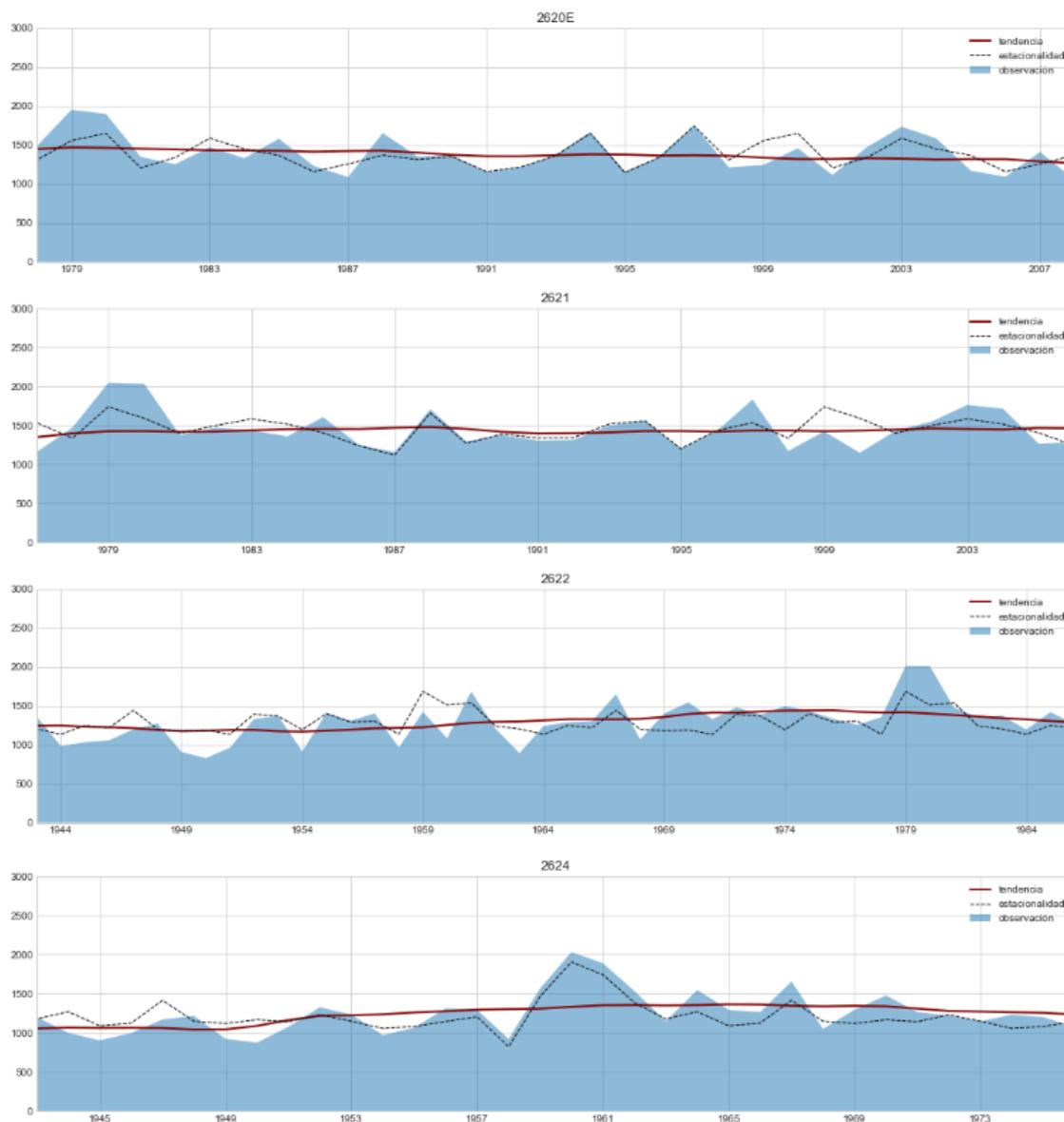
• Estación 2102



• Estación 2032E



ANEXO 5: Líneas de tendencia en las precipitaciones



ANEXO 6: Líneas de tendencia en las temperaturas

