



Trabajo fin de grado

Titulación: Grado en Ciencias Ambientales

Título del trabajo:

Evolución temporal del caudal del río Ara en el Pirineo Aragonés y su relación con los principales factores.

Temporal evolution of the streamflow in Ara river Pyrenees (Huesca) and their relation with the main drivers.

Autor:

Víctor Pintado Gascón

Directores:

Dhais Peña Angulo

José Manuel Nicolau Ibarra



Autor: Víctor Pintado Gascón

El Trabajo de Fin de Grado que presento para su exposición y defensa es original y todas las fuentes utilizadas para su realización han sido debidamente citadas en el mismo.

Fdo. Víctor Pintado Gascón

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Víctor Pintado Gascón".

Índice

Resumen.....	08
Abstract.....	09
1. Introducción.....	10
2. Objetivos.....	13
3. Área de estudio.....	14
3.1 Situación geográfica.....	14
3.2 Hidrología.....	17
3.3 Climatología.....	19
3.4 Geología.....	20
3.5 Población.....	21
4. Material y métodos.....	23
4.1 Datos.....	23
4.2 Métodos.....	24
4.2.1 Métodos estadísticos.....	24
4.2.2 Obtención de los usos del suelo.....	25
4.2.3 Estimación del balance agua azul/agua verde.....	26
5. Resultados y discusión.....	28
5.1 Descripción de las variables climáticas, hidrológicas y biológicas.....	28
5.2 Estudio de la evolución temporal de las variables climáticas, hidrológicas y biológicas.....	30
5.3 Análisis de los principales factores que explican el comportamiento hidrológico.....	35
5.3.1 Relación entre las variables de estudio a diferentes escalas temporales.....	35
5.3.2 Influencia de los factores en el caudal del área de estudio a diferentes escalas temporales.....	38
5.4 Evolución de la cobertura vegetal y efectos sobre el balance agua azul y agua verde	41

6. Conclusiones.....	45
7. Bibliografía.....	46
8. Anexos.....	50

Índice de figuras

Figura 1. Caudal medio del río Ara (hm ³ /mes) en el periodo 1962-2017.....	18
Figura 2. Número de eventos de crecida según su intensidad en Boltaña(1979-2017). Fuente: Anuario de Aforos).....	19
Figura 3. Climograma de Fiscal. Fuente: http://es.climate-data.org/	20
Figura 4: Evolución de la población en la cuenca hidrográfica del río Ara. Fuente: Instituto Nacional de Estadística Elaboración: Oaine Sánchez (2018).....	22
Figura 5. Diagrama de cajas por estaciones para el caudal, precipitación, AED y NDVI de estudio en el periodo 1982-2017.....	28
Figura 6. Diagrama de cajas por meses para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017.....	29
Figura 7. Evolución temporal y línea de tendencia de caudal, precipitación, AED y NDVI para toda la línea temporal disponible	31
Figura 8. Evolución estacional y línea de tendencia de caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017.....	33
Figura 9. Usos de suelo en la cuenca del río Ara (a) 1990, (b) 2006 y (c) 2018. Fuente: IGN. Elaboración: Víctor Pintado, y (d) la evolución de la cubierta vegetal (%) en los tres periodos de estudio: 1990, 2006 y 2018.....	42
Figura 10. Evolución de la proporción del agua azul y agua verde (%) en los tres periodos de estudio: 1990, 2006 y 2018.....	43
Figura 11 Atlas climático, para obtener la media de temperatura (AEMET).....	50
Figura 12. Evolución mensual y línea de tendencia para el caudal en el periodo 1982-2017.....	50
Figura 13. Evolución mensual y línea de tendencia para la precipitación en el periodo 1982-2017.....	51
Figura 14. Evolución mensual y línea de tendencia para el AED en el periodo 1982-2017.....	52

Figura 16. Evolución mensual y línea de tendencia para el NDVI en el periodo 1982-2017.....	53
---	----

Índice mapas

Mapa 1. Localización del área de estudio. Fuente de información: IGN. Elaboración: Víctor Pintado.....	16
--	----

Índice tablas

Tabla 1. Módulo/media mensual en la estación de aforos de Boltaña en hm ³ /mes.....	17
Tabla 2. Clasificación usos de suelo. Fuente: IGN.....	25
Tabla 3. Tabla 4. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017.....	32
Tabla 4. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI realizada por estaciones en el periodo 1982-2017.....	33
Tabla 5. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI realizada por meses en el periodo 1982-2017.....	34
Tabla 6. Matriz de correlación para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017.....	35
Tabla 7. Matriz de correlación para el caudal, precipitación, AED y NDVI por estaciones en el periodo 1982-2017.....	36
Tabla 8. Matriz de correlación para las variables de estudio por meses, en el periodo de estudio 1982-2017.....	37
Tabla 9. Modelo regresión por pasos de las variables de estudio en el periodo de estudio 1982-2017.	38

Tabla 10. Modelo regresión por pasos de las variables de estudio por estaciones para el periodo de estudio 1982-2017.....39

Tabla 11. Modelo regresión por pasos de las variables de estudio por meses para el periodo de estudio 1982-2017.....40

Índice fotografías

Fotografía 1. Picamaderos negro (*Dryocopus martius*) cazando insectos en la ribera del Ara (autor: Víctor Pintado Gascón).....14

Resumen

El presente Trabajo de Fin de Grado aborda el análisis de las variaciones en el caudal del río Ara (Huesca) a lo largo del tiempo. Se examinan los factores que influyen en estas variaciones para el periodo 1982 a 2017, como las condiciones climáticas y biológicas a través de un análisis temporal. Se exploran las tendencias mensuales, estacionales y anuales en el caudal del río, destacando patrones, anomalías significativas y correlaciones.

El caudal del río Ara muestra una tendencia negativa, reduciéndose en un 44,9% en los últimos 35 años. La precipitación actúa como la principal explicación al caudal. Por otro lado, la vegetación y la demanda evaporativa atmosférica parecen ejercer una influencia más sutil, contribuyendo de manera significativa, pero no tan directa. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada ha experimentado un aumento del 6,4%, indicando una expansión constante de la vegetación. La aplicación del modelo de Zhang para el periodo 1990-2018, estima también un incremento del agua azul, asociado al aumento del 9,5% en la superficie forestal.

Palabras clave: cambio climático, dinámica fluvial, factores hidrológicos, gestión del agua, Pirineo Aragonés, tendencias hidrológicas.

Abstract

The present Bachelor's Thesis addresses the analysis of variations in the flow of the Ara River (Huesca) over time. Factors influencing these variations for the period 1982 to 2017, such as climatic and biological conditions, are examined through a temporal analysis. Monthly, seasonal, and annual trends in the river flow are explored, highlighting patterns, significant anomalies, and correlations.

The flow of the Ara River shows a negative trend, decreasing by 44.9% over the last 35 years. Precipitation acts as the primary explanation for the river flow. On the other hand, vegetation and atmospheric evaporative demand seem to exert a more subtle influence, contributing significantly but not as directly. The Normalized Difference Vegetation Index has experienced a 6.4% increase, indicating a steady expansion of vegetation. The application of the Zhang model for the period 1990-2018 also estimates an increase in blue water, associated with a 9.5% increase in forested area.

Keywords: climate change, fluvial dynamics, hydrological factors, water management, Aragonese Pyrenees, hydrological trends.

1. Introducción

El río Ara forma parte de una red de cuencas hidrográficas situada en los Pirineos, siendo unas de las principales fuentes que vierten agua al Ebro, río más caudaloso de la península Ibérica. Este desempeña un papel crucial en la región desde tiempos inmemoriales, proporcionando recursos hídricos esenciales para la agricultura, industria y economía; siendo un factor determinante en la ubicación y desarrollo de asentamientos y comunidades humanas. Además, sustenta una biodiversidad única y diversa en sus riberas, cauces y humedales, siendo estos corredores biológicos, conectando diversos ecosistemas. Los ríos son elementos clave en el ciclo hidrológico, facilitando el movimiento del agua desde la atmósfera hasta la superficie terrestre, donde a través del cauce, infiltrar en el suelo o terminar evaporando en masas de agua, completado así el ciclo. Además, los ríos actúan como conductos esenciales en la redistribución y almacenamiento del agua y su acción erosiva y sedimentaria da forma al paisaje, dando lugar a valles, cañones y llanuras aluviales. Además, forman y mantienen deltas y estuarios, contribuyendo a la diversidad geofísica de las regiones que atraviesan. La preservación y gestión de los ríos de cabecera resulta indispensable para asegurar a la sociedad un recurso tan importante como es el agua a lo largo del tiempo.

Las áreas de cabecera de los ríos han sufrido importantes transformaciones ligados en algunos casos a los cambios en el manto nivoso, en otros a los cambios en los usos del suelo, y en otros ligados a la regulación de dichos ríos. Desentrañar la influencia de los cambios en la vegetación y el clima sobre el régimen hídrico de los ríos, así como su efecto en la partición de las precipitaciones en agua azul y verde, es un tema de investigación prioritario (Vicente-Serrano, 2021).

La gestión sostenible de los recursos hídricos y cómo los factores ambientales influyen en la dinámica de los ríos es un reto medioambiental en la actualidad. Por un lado, nos encontramos en un contexto de cambio climático, aumento de temperaturas, cambios en la precipitación y eventos climáticos extremos, todo lo cual afecta directamente a la dinámica de los ríos. Por otro lado, las transformaciones en los usos de suelo, abandono de tierras y posterior transición vegetal, también influyen notablemente; como la intensificación en el medio agrícola mediante la ampliación del regadío, la cual interaccionan con el medio generando déficit hídrico, así como contaminación. Comprender estas variaciones es fundamental para anticipar y mitigar los efectos en el medioambiente y en la sociedad; la adaptación de este cambio global requiere compresión y colaboración.

El río Ara, situado en los Pirineos españoles, es un escenario singular para investigar los cambios en las dinámicas fluviales y su relación con los cambios de vegetación y de los

patrones climáticos. Destaca entre los ríos en España por no contar con presas o regulación del caudal. Esta característica lo convierte en uno de los pocos ríos en el país que fluye de manera natural, sin intervenciones humanas significativas en términos de embalses o estructuras de control de caudal. La ausencia de presas implica que el río mantiene un comportamiento más próximo a sus condiciones naturales, permitiendo que su caudal evolucione de acuerdo con los ciclos estacionales y las variaciones climáticas sin las modificaciones asociadas a la regulación.

El estudio de la evolución temporal del caudal de ríos ha sido un tema de interés en la investigación científica, especialmente en áreas geográficas con características específicas, como el Pirineo Aragonés. La comprensión de las variaciones en el caudal es esencial para evaluar su dinámica fluvial y su relación con factores clave. No obstante, no hay mucha información que contemple una cuenca hidrológica sin regular o analice más detalladamente la influencia de la vegetación. El primer estudio realizado que analizamos es de Beguería, *et al* (2003); en él se utilizaron datos de precipitación y temperatura para analizar tendencias regionales en los vertidos de las cuencas del Pirineo central español desde mediados del siglo XX. Se observaron aumentos significativos de precipitación en octubre, abril y julio, así como un incremento de temperatura en enero y febrero. Se concluye que los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal son el único factor no climático que puede explicar la pérdida de aproximadamente el 30% del caudal medio anual.

Unos de los estudios de referencia para el presente trabajo es Vicente-Serrano, *et al* (2021), donde en un análisis realizado en la cuenca alta del río Aragón, en los Pirineos centrales en España, sometida a una intensa forestación, se determinó que los cambios en la vegetación son un factor determinante en la disminución significativa de la disponibilidad de agua azul. Los resultados subrayan la importancia de los cambios en la vegetación como refuerzo de la disminución en la disponibilidad de recursos hídricos. Se evidencia que las interacciones entre el clima y las prácticas de gestión del suelo están exacerbando el riesgo futuro de sequías hidrológicas en la región. Otro estudio abordando el agua azul y verde es Orth *et al* (2018), donde analiza la propagación de los déficits de precipitación que desencadenan la sequía, centrándose en las reducciones de la humedad del suelo y sus impactos en los flujos de agua azul y verde. Utilizando datos integrales de varias décadas de más de 400 cuencas en toda Europa, se demuestra que la sequía en la humedad del suelo afecta a la disminución de la escorrentía con mayor intensidad y rapidez que a la evapotranspiración en todo el continente. Mientras que la escorrentía responde en unas semanas, la evapotranspiración puede no verse afectada durante meses.

En el estudio de Lasanta, *et al.*, (2005) se aborda los cambios en la cobertura vegetal en un valle del Pirineo Central español durante la segunda mitad del siglo XX, centrándose en la influencia de la extensificación de las actividades agrícolas. Se empleó un método que incluyó la cartografía de la evolución de la cobertura vegetal, el uso de índices paisajísticos y análisis espacial de la presión ganadera. Actualmente, el bosque predomina en el paisaje y el estudio evidencia que la retirada de tierras agrícolas y la reducción de la carga ganadera han contribuido a un entorno más natural. Del mismo autor, Lasanta, *et al.*, (2015) se revisan los efectos de la evolución del clima y los cambios en el uso del suelo y la cobertura vegetal en el Pirineo Central español a diferentes escalas espaciales y temporales. Se utilizan estudios paleoclimáticos basados en diversos análisis de sedimentos lacustres, glaciares, espeleotemas y registros dendrológicos para examinar las fluctuaciones climáticas desde el Pleistoceno Superior hasta el Holoceno. El análisis del último siglo y medio muestra cambios significativos en la estructura y distribución de la vegetación en el piso montano y subalpino, afectando la generación de escorrentía, la erosión del suelo y las fuentes de sedimento.

En el Pirineo español, el proceso de revegetación o matorralización es la característica más importante de la dinámica actual de los paisajes (Lasanta y Vicente-Serrano, 2007). Los estudios anteriores indican la necesidad de profundizar en el conocimiento de la relación entre el caudal y los cambios en los usos del suelo a lo largo del tiempo, y sobre todo el interés de cuantificar dichos efectos. En el presente estudio se va a describir la evolución temporal (interanual y estacional) de los caudales del río Ara. La interacción entre la vegetación, las precipitaciones y otros aspectos climáticos en la cuenca constituye un enfoque clave de nuestro trabajo. Nos proponemos entender cómo los cambios en el clima, así como la expansión de la vegetación, causada por los cambios de uso de suelo tras la despoblación rural han influido en la tendencia del caudal. Los estudios de modelización sugieren un aumento general del agua verde en las últimas décadas, como consecuencia de una mayor superficie foliar de las plantas (Forzieri, 2020; Zeng, 2018) y una mayor demanda evaporativa atmosférica (AED) (Vicente-Serrano, 2020).

Además, abordaremos la relación entre el agua azul y verde, es decir, la generación de escorrentía y el consumo de agua por la vegetación; los estudios indican que la reducción de la cobertura arbórea aumenta la generación de escorrentía tras las perturbaciones (Bosch, 1982). La variabilidad climática interanual y estacional también será objeto de estudio, ya que influye en la dinámica hidrológica. El análisis que realizaremos pone en valor el peso de la vegetación, factor que en el pasado ha sido poco relevante, pero que cada vez más investigadores y entidades ponen en valor.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es analizar la evolución temporal del caudal del río Ara (Huesca) en los últimos 36 años (1982 - 2017) y su relación con los principales factores climáticos y con la cubierta vegetal.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Describir los cambios en el uso del suelo en los años 1990, 2006 y 2018.
- Estudiar la evolución temporal del caudal, precipitación, AED y NDVI entre 1982 y 2017.
- Analizar el efecto de diferentes variables climáticas sobre los caudales (precipitación, temperatura, AED¹).
- Analizar el efecto de los cambios en la vegetación sobre los caudales, a través del indicador NDVI² y sobre el balance agua azul y agua verde, según el modelo de Zhang.

AED¹: Cantidad de agua que la atmósfera solicita o "demanda" de la superficie terrestre y cuerpos de agua debido a los procesos de evaporación. Influenciada por varios factores ambientales, como la temperatura, la humedad relativa del aire, la velocidad del viento, la radiación solar y la disponibilidad de agua en la superficie.

NDVI²: Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, por sus siglas en inglés, el cual se utiliza para evaluar y cuantificar la salud y vigor de la vegetación en un área determinada. Se calcula utilizando mediciones de la reflectividad de la luz en el espectro visible e infrarrojo cercano.

3. Área de estudio

3.1. Situación

El área de estudio del presente trabajo corresponde a la cuenca hidrográfica del río Ara (*mapa 1*), ubicada en la vertiente sur de los Pirineos dentro de la provincia de Huesca (Aragón). Esta cuenca hidrográfica pertenece a la cuenca del río Ebro; El Ara nace en el circo glaciar del Ara (altitud 2800 m) y desemboca en Aínsa (altitud 525 m). Se nutre principalmente de los siguientes afluentes (por orden desde el nacimiento): Ordiso, Otal, Arazas, Sorrosal, siendo este último el más importante en términos de aportación hídrica; además cuenta con una numerosa red de barrancos que aportan caudal en la época del deshielo y con las lluvias. La cuenca abarca una superficie de 626 km² y comprende una red fluvial densa y diversificada, con el río Ara como su arteria principal. Este río, con una longitud de 65 km, es uno de los afluentes más destacados de la región que aporta un caudal medio anual de 500 hm³, equivalente a un 17,3% del caudal del río Cinca (éste, en conjunto, aporta una media de 2896 hm³ anuales al río Ebro). Por ello desempeña un papel crucial en diversos aspectos, incluyendo el abastecimiento de agua, la agricultura, el turismo y la biodiversidad de la zona.

La cuenca alberga especies de interés como el tritón pirenaico (*Calotriton asper*), el desmán de los pirineos (*Galemys pyrenaicus*), picamaderos negro (*figura 2*) (*Dryocopus martius*), *Borderea chouardii* (*Dioscorea chouardii*). Muchas de estas, desarrollan su vida en las diferentes zonas protegidas que incluye el lugar, que son: Parque Nacional de Ordesa y Monte Perdido, LIC Bujaruelo - Garganta de los Navarros y el LIC Río Ara.

El río Ara no está regulado, habiéndose desestimado el proyecto de la presa de Jánovas en el 2001. Las poblaciones más importantes de la cuenca son Torla, Broto, Fiscal, Boltaña y Aínsa, que durante los meses estivales sufren una gran presión turística. En la época invernal tiene menos turismo debido a la nieve y el hielo ya que el acceso empeora, además de que la mayoría de actividades deportivas y al aire libre no se pueden realizar debido a la



Fotografía 1. Picamaderos negro (*Dryocopus martius*) cazando insectos en la ribera del Ara. Autor: Víctor Pintado Gascón

peligrosidad y el cierre por parte de las autoridades de ciertos senderos. A diferencia de otras zonas del Pirineo que cuentan con instalaciones deportivas de esquí, donde el efecto es el contrario. La cuenca del Ara se encuentra aislada, no teniendo influencia de las mismas.

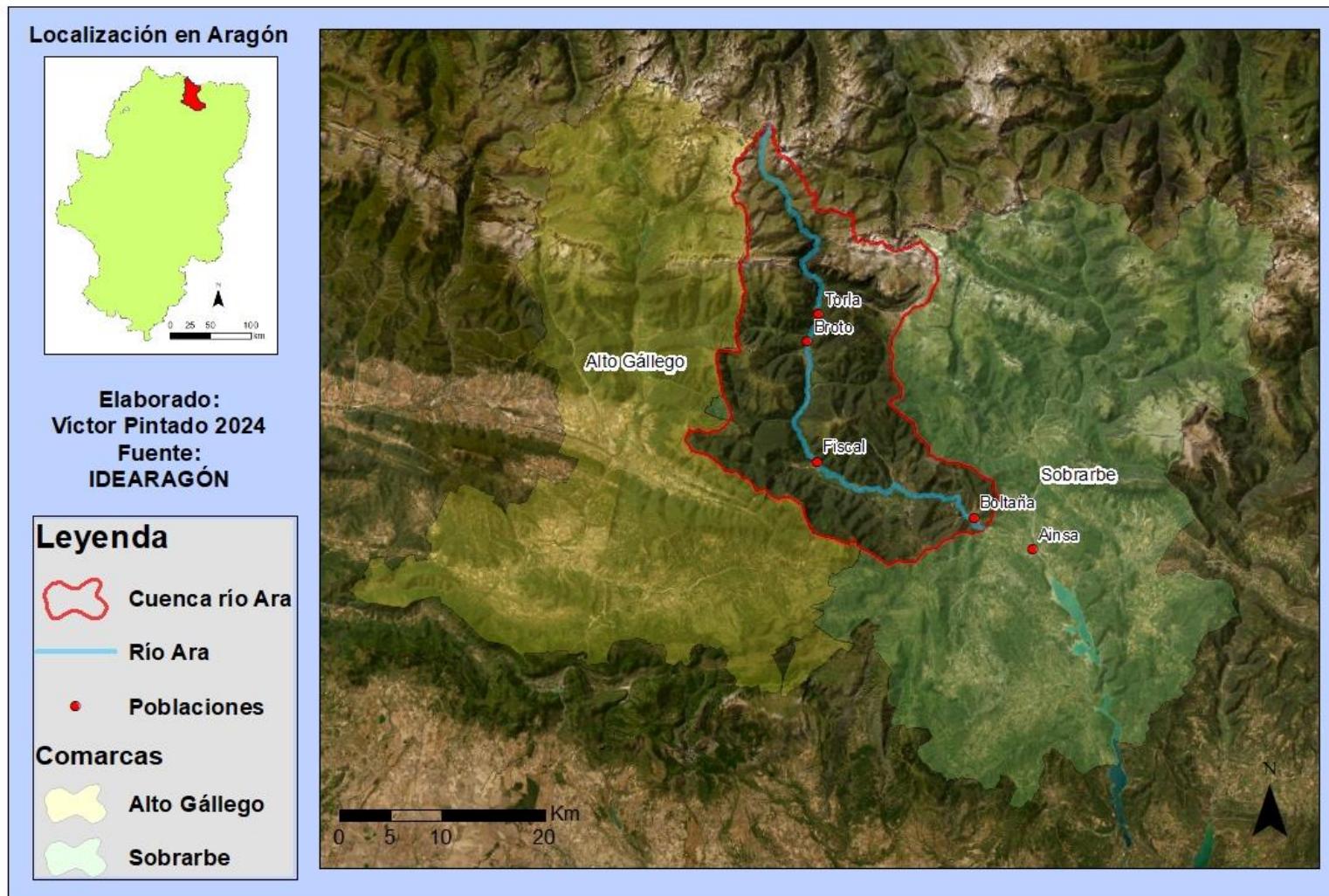
Para caracterizar y describir las diferentes secciones del río, tomaremos como referencia un estudio de calidad ecológica (Confederación Hidrográfica del Ebro, 2022):

Cabecera: fluye a través de un valle confinado, experimenta cambios significativos en su morfología a medida que avanza. En su cuenca alta, desde su nacimiento hasta el Valle de Ordiso, el cauce es recto, recorriendo alrededor de 10 km con una pendiente del 8 %. Esta área se caracteriza por paisajes alpinos, pastos, y laderas con vegetación herbácea y arbustiva, que a menudo se encuentran cubiertos de nieve y hielo. Desde el Valle de Ordiso hasta su confluencia con el río Arazas, el río atraviesa un valle confinado, con tramos encajados y una pendiente reducida al 5 %. Aquí, la vegetación en las laderas es diversa, con la presencia de hayas, pinos albares, y pinos negros, además de especies de ribera como el serbal de cazadores y abedules. Esta área es muy visitada y utilizada para la acampada controlada, así como punto de partida para diversas excursiones y travesías.

Tramo medio: El rango de altitud va de 700 a 1.000 m. Este sector se extiende a lo largo de 27 km, con una pendiente media suave, alrededor del 1%. En la base de datos de la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE) constan cuatro captaciones superficiales que suman una concesión de caudal instantáneo de 354 L/s para acuicultura en la Piscifactoría de Planduvial, abastecimiento de Broto y para agricultura. La extracción conjunta anual es una pequeña parte del caudal circulante por el río. Hasta llegar a Broto, se distingue una vegetación que se compone principalmente de delgadas franjas de sauces (*Salix spp.*) y abedules (*Betula spp.*). En este punto, también hacen su primera aparición las áreas de chopos (*Populus alba*). A medida que llegamos a fiscal los sotos se desarrollan.

Entre Fiscal y el río Cinca: Es el tramo final del río Ara, con un recorrido de 19 km y una pendiente del lecho suave, entorno al 1 %. Según los datos aportados por la CHE constan cuatro captaciones superficiales, todas ellas destinadas a la agricultura como uso principal y a abastecimientos urbanos como uso secundario (10.275 m³ /año). Hacia la desembocadura de Fiscal, se distingue una vegetación fragmentada donde se suceden bosques mixtos de quercíneas y pinares maduros que se extienden hasta las orillas del cauce, junto con áreas de choperas.

LOCALIZACIÓN DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO ARA



Mapa 1. Localización del área de estudio. Fuente: IDEARAGON. Elaboración: Víctor Pintado

Dependiendo de la geomorfología de la cuenca, los márgenes fluviales aparecen ocupados por formaciones arbustivas y arbóreas que conforman el bosque de ribera o soto. En otros casos, el ambiente ribereño puede estar formado por cortados rocosos, en los que la vegetación de ribera no encuentra asiento, pero que constituyen hábitats de gran interés para la nidificación de aves rapaces.

La importancia del río Ara en la cuenca se relaciona estrechamente con su caudal, que experimenta variaciones significativas a lo largo del año debido a una serie de factores hidrológicos, climáticos y geológicos. El estudio del caudal en esta cuenca tiene implicaciones directas en la gestión de recursos hídricos, la planificación del uso de la tierra y la preservación de los ecosistemas acuáticos.

3.2. Hidrología

En el presente trabajo se describe las características hidrológicas del río Ara, su caudal, variación estacional y crecidas, para ello se ha utilizado la estación de aforo de la estación EA-195 (Fiscal), datos de la CHE para la línea temporal 1962 a 2017. En primer lugar, el caudal muestra un módulo de 43,39 hm³/mes, según se detalla en la *Tabla 1*.

Tabla 1. Módulo/media mensual en la estación de aforos de Boltaña en hm³/mes.

Enero	39,06	Julio	32,50
Febrero	31,62	Agosto	18,54
Marzo	42,77	Septiembre	21,63
Abril	57,99	Octubre	43,13
Mayo	75,52	Noviembre	51,79
Junio	66,46	Diciembre	39,65

Se calcula el caudal específico en la estación. Éste es 25,85 l/s/km², que es el caudal (l/s) para la superficie hidrográfica. El río Ara tiene un caudal significativo, influenciado por las grandes precipitaciones que la cuenca experimenta a lo largo de su curso, especialmente en su cabecera. Esta región sirve como una amplia cuenca de recepción de agua proveniente de lluvias y nevadas.

En segundo lugar, las variaciones estacionales experimentan fluctuaciones en su caudal, viendo su disponibilidad de agua sujeta a cambios. Estas variaciones son influidas por diversos factores, como el clima y el relieve circundante.

El régimen estacional del río Ara (figura 1) forma parte de los regímenes complejos originales. Este régimen tiene dos períodos de aguas altas (Octubre-Noviembre y Marzo-Junio), así como dos períodos de aguas bajas, abarcando Diciembre-Febrero y Julio-Septiembre.

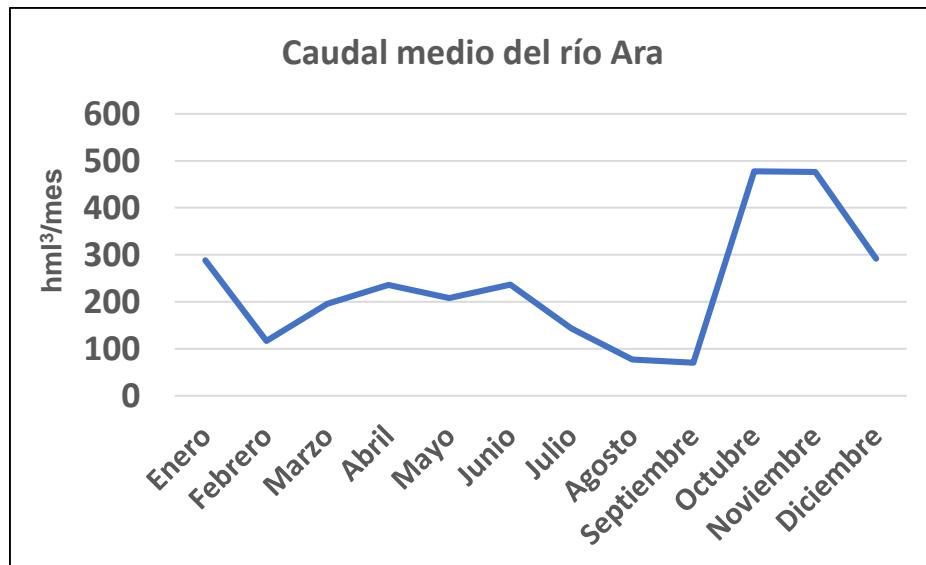


Figura 1. Caudal medio del río Ara (hm³/mes) en el periodo 1962-2017

A pesar de enfrentarnos a un régimen hídrico originalmente complejo, se destaca la clara influencia nival en el río Ara, evidenciada por el primer periodo de caudal elevado en primavera. Este fenómeno se atribuye al deshielo ocasionado por el aumento de las temperaturas, en combinación con las precipitaciones características de la estación. El segundo pico se manifiesta en otoño, principalmente derivado de precipitaciones en forma de lluvia otoñales.

El mínimo más pronunciado tiene lugar en verano, momento en el cual la fusión nival ya ha concluido y las precipitaciones son limitadas. El segundo mínimo se registra en invierno, en este caso, a causa de la retención de las precipitaciones en forma de nieve.

Los eventos de crecidas se contabilizan y clasifican según su intensidad. Se considera avenida toda aquella variación de caudal que supere en tres o más veces el módulo (Brutsaert, 2005).

La figura 2 muestra que hay numerosas crecidas, siendo las más comunes las ordinarias. Se han registrado 61 ocasiones donde el caudal superó el módulo tres veces y 69 ocasiones donde superó el módulo cinco veces, siendo las más habituales. Aunque las crecidas de 10

a 25 veces el módulo son menos frecuentes, se han producido en 44 ocasiones. Las crecidas extraordinarias se han dado 9 veces. En total, según el criterio utilizado, se han registrado 174 crecidas en el río Ara durante los 38 años de registro del anuario. Como en cualquier río pirenaico, en el río Ara, las crecidas son numerosas y, en muchas ocasiones, voluminosas (Sánchez, 2018).

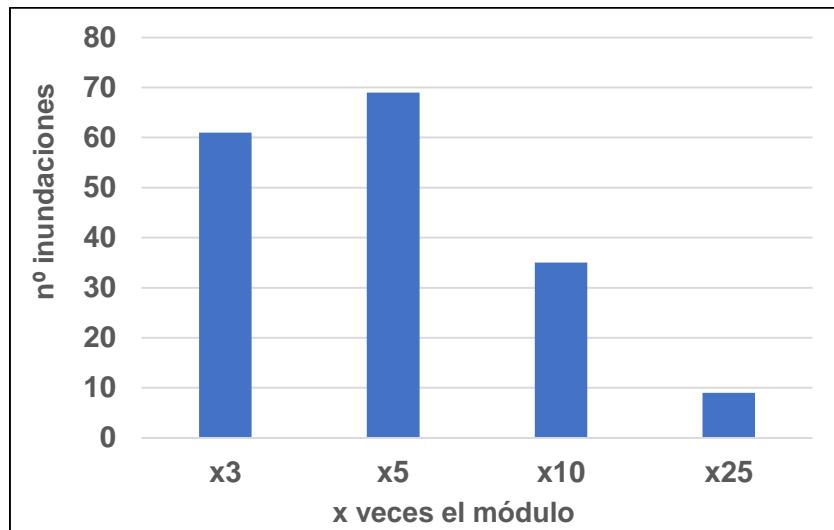


Figura 2. Número de eventos de crecida según su intensidad en Boltaña (1979-2017). Fuente: Anuario de Aforos.

3.3. Climatología

La cuenca hidrográfica del río Ara está situada en la zona climática de montaña. No obstante, a medida que nos desplazamos hacia el sur, el clima va manifestando ciertos aspectos propios del clima mediterráneo continentalizado. Las características climáticas generales vienen dadas principalmente por el efecto del relieve, que hace que las precipitaciones anuales sean abundantes, aunque se puede apreciar una diferencia importante entre el máximo equinoccial y el mínimo invernal. Esto está causado, en primavera, por el incremento en la frecuencia en el paso de borrascas atlánticas gracias al debilitamiento de las altas presiones en Centroeuropa y, en otoño, por la llegada de perturbaciones procedentes del Mediterráneo (Atlas Climático de Aragón, 2006).

El relieve desempeña un papel significativo en las temperaturas, afectando tanto al gradiente térmico como a las precipitaciones y la radiación solar. La presencia de obstáculos montañosos obstaculiza la influencia marina, lo cual se traduce en un clima con valores térmicos extremos, más acusados.

Tomamos la población de Fiscal para obtener el climograma, este servirá como valor medio para la región ya que esta se encuentra latitudinal y longitudinal centrada respecto al área de estudio.

Como se evidencia en la Figura 3, se constata que el mes de julio exhibe el nivel más reducido de precipitaciones, registrando únicamente 57 mm. Por el contrario, el mes de octubre se caracteriza por ser el periodo con la máxima cantidad de precipitaciones, alcanzando un promedio de 112 mm. El total anual de precipitación asciende a aproximadamente 1021 mm.

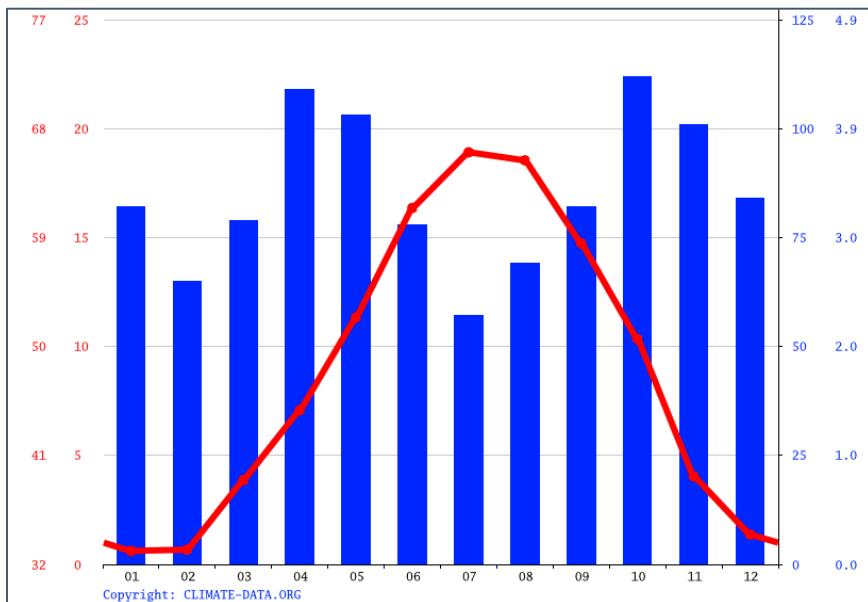


Figura 3. Climograma de Fiscal. Fuente: <http://es.climate-data.org/>

El mes con temperaturas más altas es julio. La temperatura media durante este periodo alcanza hasta los 18.9 °C, por lo que es la época más calurosa del año. El mes de enero se caracteriza por las temperaturas más bajas, que tienen una lectura media de 0.6 °C. La temperatura media anual registrada en Fiscal es 9.0 °C, según los datos disponibles (Figura 4).

3.4. Geología

Con una orientación de su recorrido sureste, el río atraviesa las principales unidades estructurales y litológicas del Pirineo: el Paleozoico de las zonas axiles, con calizas, cuarcitas y granitos (la parte más oriental del Macizo de Panticosa); el Mesozoico de las Sierras Interiores y el tramo oriental de la Sierra de Tendeñera además de los escarpados relieves

del Valle de Ordesa hasta llegar a la zona de la Depresión Media. Finalmente el río desemboca en el Cinca a la altura de la ciudad de Aínsa (Hernández Santón & Rubio Fernández, 1990).

La cuenca del Ara alberga una gran diversidad de formaciones geológicas típicas de la cadena pirenaica, macizos, valles de formación glaciar, barrancos, gargantas, etc. Se encuentra en una zona de interacción entre distintas unidades geológicas, lo que ha llevado a la formación de una gran variedad de características geológicas. Entre las principales unidades geológicas presentes se encuentran: pico de Monte Perdido, Viñamala, valle de Ordesa (valle glaciares), cascada del Sorrosal, la Garganta de los Navarros y muchos otros. Estas formaciones proporcionan pistas sobre los procesos geológicos que han tenido lugar a lo largo del tiempo, desde eventos tectónicos hasta procesos erosivos y sedimentarios. Su formación está vinculada a eventos geológicos clave. Además, la composición de los sedimentos y rocas presentes en la región puede ofrecer información valiosa sobre la historia climática y ambiental como es el caso de las morrenas y los valles glaciares.

De la misma manera hay una amplia diversidad con los estratos: en la zona superior encontrarnos batolito granítico, paleozóico metamórficos, calizas; siendo gran parte de ellas cortadas por el paso del río Ara. Ocupando la mayor extensión, concretamente la central, aparece el flysch, formado a su vez por areniscas, calizas y margas. Al sur de la zona de estudio se hayan paquetes de calizas lutecianas. Finalmente hay varios depósitos fluviales en Broto y Sarvisé formando distintos niveles de terraza.

3.5. Población

El área de estudio alberga 7 municipios: Ainsa, Boltaña, Broto, Fanlo, Fiscal, Torla/Ordona y Yebra de Basa. Teniendo importancia por extensión Boltaña, Broto, Fiscal y Torla, de las cuales se observa una tendencia a la baja en su población desde el siglo XX. Siendo Fiscal el más destacado con una reducción del 75%. Además, en la cuenca contabilizamos 22 localidades despobladas y salvo los núcleos principales ya mencionados, cuentan con poblaciones muy reducidas (figura 4).

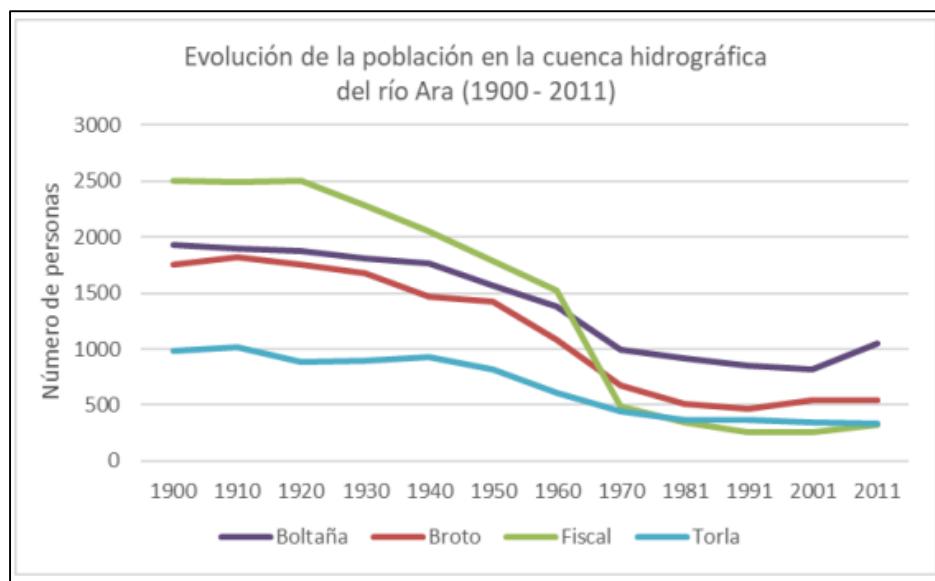


Figura 4: Evolución de la población. Fuente: Instituto Nacional de Estadística Elaboración: Oaine Sánchez (2018)

La zona de estudio no presenta grandes alteraciones antrópicas, sin embargo, en el pasado tuvo proyectos que no llegaron a realizarse, como el embalse y presa del río Ara que fue encargado por el gobierno español a la empresa Iberduero en 1951. El objetivo era aprovechar el caudal del río para fines agrícolas en Monegros y producción hidroeléctrica. La construcción se ubicó en Jánovas, llevando a expropiaciones en las localidades afectadas.

Desde el inicio, la población resistió abandonar sus hogares, lo que resultó en la demolición de edificios, cierre de servicios públicos y forzó a los residentes a emigrar. En 1984, se completó el desalojo. La población sigue deshabitada desde entonces y se están llevando a cabo proyectos de rehabilitación para que pueda albergar nuevos habitantes.

En 2001, ante la lentitud de las obras y problemas geológicos, se desestimó el proyecto en 2005. Las razones principales incluyeron la oposición de los habitantes locales y grupos ecologistas, el impacto económico y ambiental, así como problemas geológicos. En 2008, se inició el proceso de devolución de propiedades expropiadas y en 2015, comenzaron las labores de restauración del entorno.

4. Material y métodos

4.1. Datos

En el presente trabajo como parte de los objetivos se estudian las siguientes variables; caudal, precipitación, AED, NDVI y los usos del suelo. A continuación, se va definir cada una de estas variables y sus fuentes de información. El periodo de trabajo es de 1982 a 2017 en relación a la disponibilidad de datos de las fuentes consultadas, y la escala temporal es anual, estacional y mensual. Además, se utilizó un segundo periodo de trabajo, más extenso, de 1962 al 2017 para comprobar que las tendencias de caudal y precipitación obtenidas en el periodo corto se sustentaban también con las tendencias del periodo más largo.

Los datos de precipitación y AED se obtuvieron a partir de un conjunto de datos semanales cuadriculados de alta resolución (1,1 km) para el área de estudio desde 1982 hasta 2017. Este conjunto de datos se desarrolló utilizando el registro más completo de datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional Español (Agencia Estatal de Meteorología, AEMET). Los datos brutos se sometieron a un control de calidad, se homogeneizaron y se interpolaron a una resolución de cuadrícula común de 1,1 km. Para más detalles sobre el desarrollo de este conjunto de datos, véase Vicente-Serrano et al. (2017). Los datos de temperatura del aire, humedad relativa, duración de insolación y velocidad del viento se utilizaron la AED mediante la ecuación Penman-Monteith de la FAO-56 (Pereria et.al 2015). Las unidades obtenidas corresponden a hm^3 mensuales para ambos factores respecto a la superficie total del área de estudio.

Los datos de caudal se obtuvieron de la base de datos MSED (Peña-Angulo et al, 2022), la cual está disponible en la página web <https://msed.csic.es/>, la cual pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) del Gobierno de España. Esta base de datos dispone de datos de caudal mensual de una extensa red de cuencas hidrográficas europeas, las cuales son gestionadas por diferentes organismos nacionales e internacionales. En el presente estudio se utilizan los datos de la estación de aforo EA-195 ubicada en las cercanías de la población de Fiscal, los cuales pertenecen a la Confederación Hidrográfica del Ebro (<https://www.chebro.es/>). Se obtuvo el caudal (hm^3) de toda la cuenca hidrográfica a escala mensual.

Los datos de NDVI se obtuvieron del estudio Vicente-Serrano, Martín-Hernández et al., 2020. A partir de un conjunto de datos semanales cuadriculados de alta resolución (1,1 km) para el área de estudio desde 1982 hasta 2017. Utilizando las imágenes NOAA-AVHRR que cubren un periodo de 1981 a 2017 combinados con MODIS NDVI. Ambos conjuntos de datos se

estandarizaron utilizando un periodo de referencia 2000-2015. Las unidades no son espaciales y tienen un rango de 0 a 1.

Los datos de temperatura media del 1971 al 2000 (solo para el modelo de Zhang) se obtuvieron mediante la herramienta del Atlas Climático de España del AEMET.

Por último, los mapa de uso de suelo CLC (Corine Land Cover) correspondientes a los años 1990, 2006 y 2018 fueron facilitados la institución IGN (Instituto Geográfico Nacional) a través del (<https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=SIOSE#>; última actualización: 5 de octubre de 2023). A partir de las superficies de los diferentes usos de suelo mediante las capas del Corine Land Cover (CLC). A partir de la interpretación de fotografías aéreas estos mapas crearon la ocupación del suelo en España escala 1:100.000.

4.2. Métodos

4.2.1. Métodos estadísticos

Con el fin de conocer la relación entre el caudal y las variables secundarias comentadas previamente, se utiliza diferentes análisis estadísticos y representaciones gráficas, a partir de diferentes programas informáticos: Excel, Rcommander, ArcGIS. A continuación, se comenta las principales pruebas estadísticas realizadas.

En primer lugar, se realiza una matriz de correlación, a partir del coeficiente de Pearson, con las variables caudal, precipitación, AED y NDVI a escala anual y estacional y se visualiza mediante gráficos de dispersión. Posteriormente, se realiza un análisis de la evolución temporal de estas variables, mediante la obtención de la tendencia, y para ello se utiliza el test de Mankendall los datos con el mismo formato del apartado anterior, tomaremos como resultados el Test Z (se interpreta a p-valor, así como signo de cambio), los valores significativos y la pendiente de Shen (Q).

Por último, se obtiene el modelo de regresión lineal con variable dependiente el caudal, siendo el resto independientes para obtener el resultado de la pendiente y varianza. Posteriormente aplicaremos el método stepwise (por pasos), su objetivo es encontrar el subconjunto óptimo de variables predictoras que proporcionen el mejor ajuste al modelo, eliminando las variables irrelevantes o redundantes y manteniendo sólo aquellas que tienen un impacto significativo en la variable de respuesta. Para ello optamos por el proceso “Selección hacia delante” (Forward Selection). Usaremos el último conjunto de variables predictoras que obtengamos

en caso de obtener varios modelos. Recopilamos sobre los mismos el coeficiente de determinación y el p-valor de las regresiones lineales.

4.2.2. Obtención de los usos de suelo

Catalogamos los usos de suelo según los datos del Corine Land Covers para los años 1990, 2006 y 2017 para el área de estudio. Los diferentes tipos de suelo (tabla 2) se reclasificaron en la siguiente clasificación: urbano, agrícola, pastos y pastizales, landas y matorral, bosque, ecosistema fluvial y roquedo.

Tabla 2. Clasificación usos de suelo. Fuente: IGN.

Clasificación CLC	ID	Agrupación
Tejido urbano discontinuo	112	Urbano
Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados	122	
Instalaciones deportivas y recreativas	142	
Tierras de labor en secano	211	Agrícola
Terrenos regados permanentemente	212	
Mosaico de cultivo	242	
Terrenos principalmente agrícolas con importantes espacios de vegetación natural	243	
Praderas	231	
Pastizales naturales	321	Pastos y pastizales
Praderas	231	
Landas y matorrales	322	
Vegetación esclerófila	323	Landas y matorrales
Matorral boscoso de transición	324	
Bosques de frondosas	311	
Bosques de coníferas	312	Bosque
Bosque mixto	313	
Playas, dunas y arenas	331	
Roquedo	332	Ecosistema fluvial
Espacios con vegetación escasa	333	
Zonas quemadas	334	

Recortamos las capas del Corine Land Cover utilizando un modelo de cuenca del río Ara generado mediante líneas de elevación para los años 1990 2006 y 2018. Agrupamos las capas que tienen relación en subgrupos mediante la aplicación ArcGis (*tabla 2*), usando la calculadora geométrica obtuvimos las áreas en hectáreas de cada subgrupo, de las cuales realizamos diferentes gráficos. Además, realizamos diversos mapas interpretativos del área de estudio.

4.2.3. Estimación del balance agua azul/agua verde

La producción de agua se ha estimado mediante la aplicación del modelo de Zhang et al. (2001), el cual reparte la precipitación anual en dos componentes: evapotranspiración (agua verde) y escorrentía o drenaje profundo (agua azul), lo que permite visualizar los efectos de los cambios en la cobertura vegetal sobre el balance de agua (García-Estríngana et al., 2014). Este modelo se fundamenta en la ecuación del equilibrio hidrológico: $P = ET + Q + D + \Delta S$, donde P representa la precipitación, ET la evapotranspiración real, Q la escorrentía superficial, D la recarga del agua subterránea y ΔS el cambio en el almacenamiento de agua en el suelo (puede considerarse nulo para intervalos de tiempo entre 5 y 10 años) según Zhang et al. (2001).

EL dato de precipitación es el mismo para los tres escenarios, corresponde a la media de la suma anual entre 1971 y 2000. La base de datos es la misma que para los apartados 5.1, 5.2 y 5.3, donde calculamos las tendencias y correlaciones.

La evapotranspiración real se puede expresar a partir de la precipitación y la evapotranspiración potencial (ETP) de la siguiente manera:

$$ET = \frac{P \left(1 + \frac{wETP}{P} \right)}{1 + \frac{wETP}{P} + \frac{P}{ETP}}$$

Donde ETP equivale a la evapotranspiración potencial vinculada a la temperatura en diversas latitudes, y w simboliza el coeficiente que refleja la accesibilidad del agua para las plantas.

Varios años después, Komatsu et al. (2012) evidencian que el modelo de Zhang et al. (2001) exagera el valor del factor ETP en las zonas de climas templados y boreales. Sugieren la rectificación de los cálculos de ETP en diversas latitudes como sigue:

$$E_0 = 0.488T^2 + 27.5T + 412 (R^2 > 0.99)$$

De esta manera empleamos la ecuación revisada por Komatsu et al. (2012):

$$ET = \frac{P \left(1 + \frac{wE_0}{P} \right)}{1 + \frac{wE_0}{P} + \frac{P}{E_0}}$$

El modelo reconoce cuatro categorías de uso del suelo: bosque, suelo desnudo, vegetación mixta y herbáceo, aplicando los siguientes coeficientes de disponibilidad de agua (w) para cada una de ellas: 0.1 para suelo desnudo, 0.5 para áreas de herbáceos y cultivos, 1 para vegetación mixta y 2 para bosques (Zhang et al., 1999; 2001).

Por lo tanto, fue necesario clasificar los diversos usos del suelo identificados en los mapas cartográficos en estas cuatro categorías. Las descripciones de los cuatro tipos de uso del suelo en el modelo se detallan de la siguiente manera (Enguita, G., 2016):

- Bosque: Áreas con densa cobertura de árboles.
- Vegetación mixta: Combinación de arbustos, plantas herbáceas y árboles con una baja densidad de árboles.
- Herbáceo: Zonas destinadas a pastos y cultivos.
- Suelo desnudo: Superficies sin vegetación, como afloramientos rocosos o áreas como pistas forestales y otras vías de comunicación.

Los diversos usos del suelo recopilados y reclasificados de Corine Land Cover (apartado 4.2.2) se han clasificado en las categorías del modelo de Zhang de la siguiente manera:

- Bosque: bosque
- Vegetación mixta: landas y matorral
- Herbáceo: pastos y pastizales, agrícola
- Suelo desnudo: roquedo, ecosistemas fluviales, urbano

5. Resultados y discusión

5.1. Descripción de las variables climáticas, hidrológicas y biológicas

En primer lugar, se analiza el comportamiento de las variables de estudio (caudal, precipitación, AED y NDV) en cada una de las estaciones y meses.

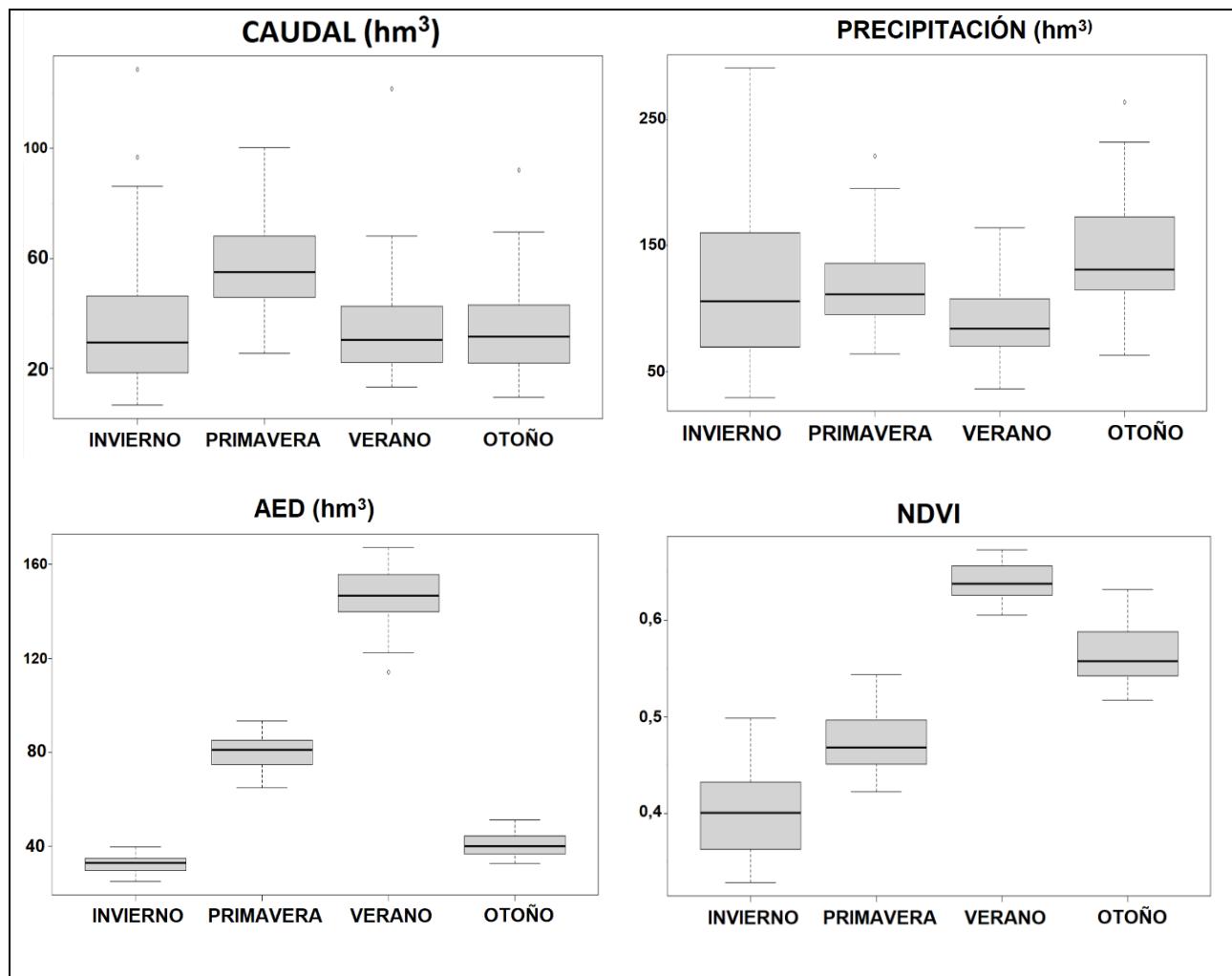


Figura 5. Diagrama de cajas por estaciones para el caudal, precipitación, AED y NDVI de estudio en el periodo 1982-2017

En la figura 5, representa un mayor caudal en primavera, siendo en el resto de estaciones menor. Caudal y precipitación muestran gran variabilidad y dispersión en los datos siendo las precipitaciones algo más homogéneas a lo largo del año, siendo más altas y constantes en primavera y en otoño, no obstante, en invierno obtenemos datos muy dispares, en función del año el invierno puede ser la estación con más y menos precipitaciones. Ambas variables sufren coincidencia entre ellas y oscilan con el mismo comportamiento.

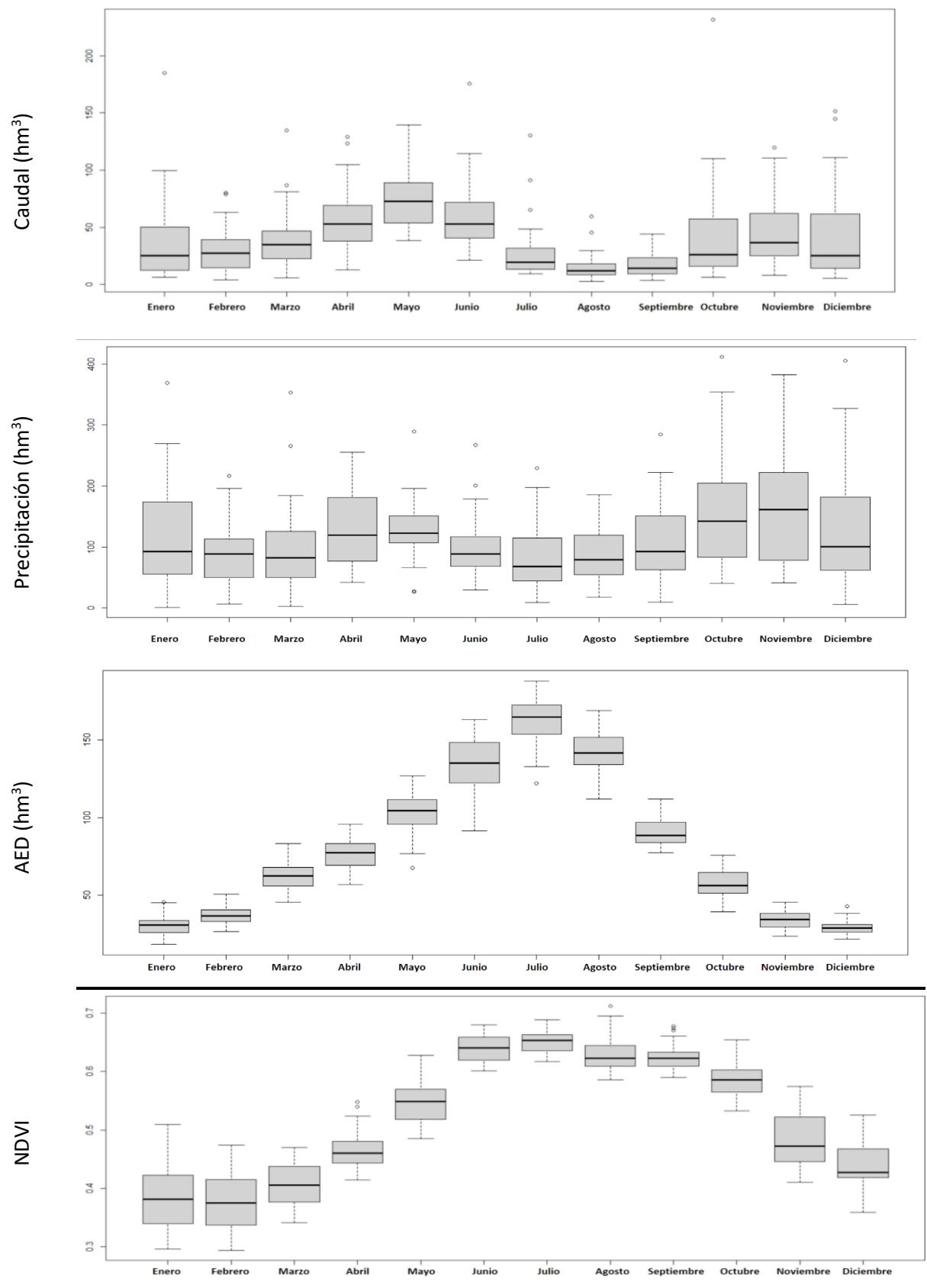


Figura 6. Diagrama de cajas por meses para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017 en el área de estudio.

El AED crece en el periodo comprendido entre el invierno y el verano, tomando sus máximos valores anuales en este último. Tanto AED y NDVI toman valores poco variables, y cercanos a la media, siendo el AED más marcado. Ambas toman un comportamiento parecido (asciende invierno a verano para caer en otoño), no obstante, el NDVI mantiene sus valores altos durante el otoño.

Ampliando la información por meses en la figura 6 podemos ver con mejor detalle las evoluciones de las variables de estudio. El caudal fluctúa, experimentando un ciclo anual con valores más elevados durante la primavera y el otoño. La varianza es notable salvo en los meses julio, agosto y septiembre, donde el caudal se reduce a su mínimo y siendo muy constante en los datos, a pesar de eso se observan numerosas crecidas en los meses de julio y agosto. Las precipitaciones muestran mayor variación en cada mes siguiendo el mismo patrón que el caudal, aunque las precipitaciones en los meses de junio, julio y agosto no se reducen tanto en comparación con el caudal en estos meses.

AED y NDVI muestran un ciclo parecido al de una campana de Gauss, siendo el punto álgido en los meses de junio, julio, agosto y septiembre. Los valores altos de NDVI se mantienen más en el tiempo y no es hasta noviembre donde empieza a decaer. El AED mantiene una variación alta en los meses centrales del año, mientras que en los extremos son más homogéneos. Con el NDVI ocurre lo contrario, valores con menor varianza en los meses centrales, y mayor disparidad de datos a medida que nos alejas al principio y final de año.

5.2. Estudio de la evolución temporal de las variables climáticas, hidrológicas y biológicas

Se analiza la tendencia general para estaciones y meses de las variables de estudio, además de comentar la puntualidad de los eventos extremos observados y ver cómo se relacionan y afectan entre ellas.

En la representación de la figura 7, para el periodo 1962 al 2017 la media del caudal y la suma de anual de precipitación tienen una tendencia decreciente, lo que significa que cada vez hay menos caudal y llueve menos. En el sur de Europa, diferentes estudios han mostrado una reducción general del caudal de los ríos en las últimas décadas (Gud- mundsson et al., 2017; Lorenzo-Lacruz et al., 2012; Stahl et al., 2010).

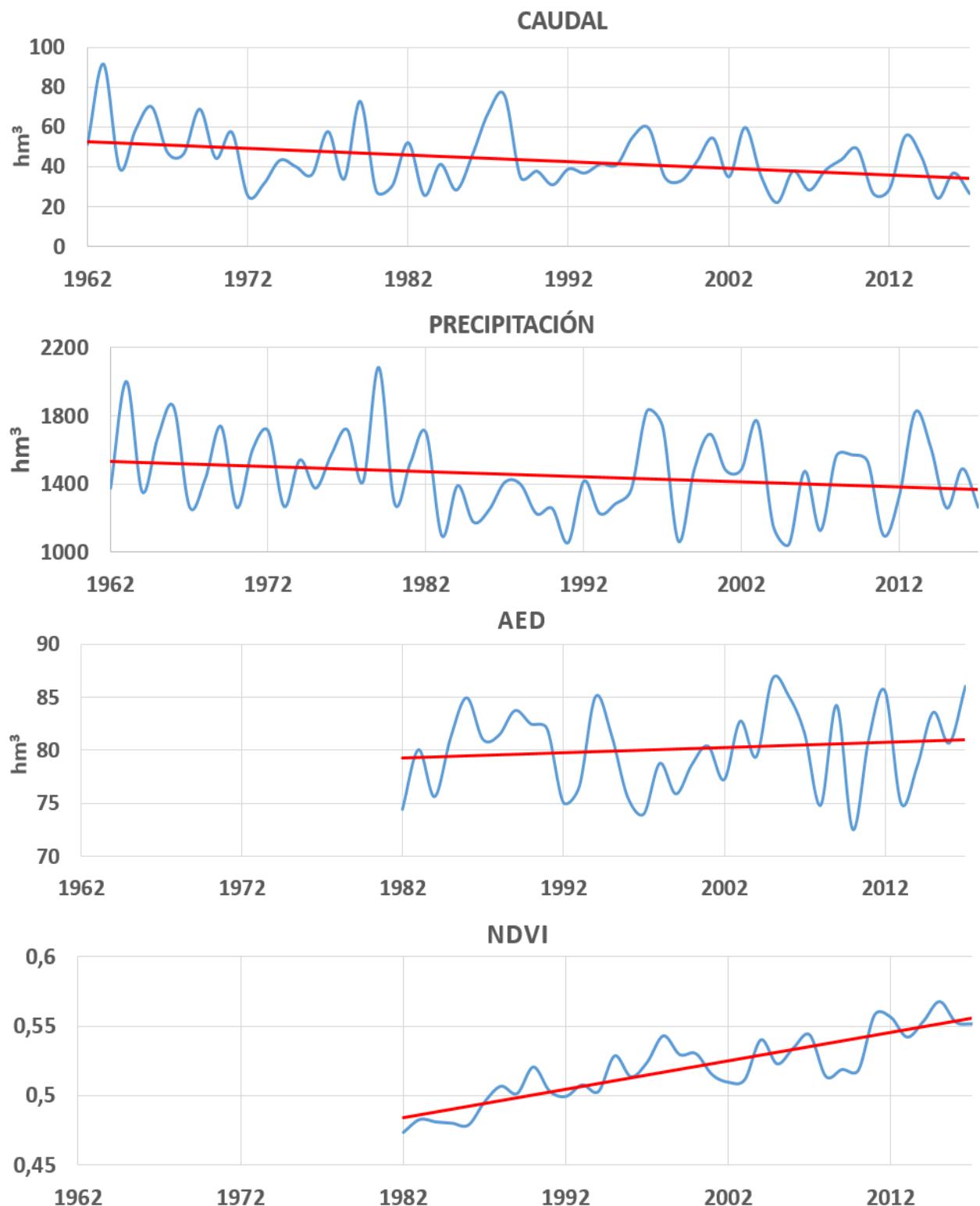


Figura 7. Evolución temporal y línea de tendencia de caudal, precipitación, AED y NDVI para toda la línea temporal disponible.

La media anual del AED y el NDVI muestran una tendencia creciente lo que significa que sus valores incrementan a lo largo del periodo de estudio. La variable de estudio con menos eventos extremos y más homogénea en el tiempo es el NDVI. Sin embargo, muestran grandes variaciones a lo largo del tiempo AED, precipitación y caudal, siendo esta última más

estable a partir del 1990. Apreciamos un descenso del caudal y precipitaciones, mientras que se produce un incremento en el AED y NDVI.

Se aprecian años con valores de precipitación altos en la media anual en la línea temporal: En 1963, 1965, 1967, 1979, 1988, 1996, 2000, 2003 y 2013, viéndose reflejadas en el caudal, llegando a duplicar el caudal medio anual. Destacar que estos valores anuales extremos se concentran en la primera mitad de la línea temporal para el periodo de 1962 al 1982, a medida que trascurre el tiempo, se producen menos y de menor intensidad. Además, a partir de 1982 empieza a ser frecuente la aparición de años más secos, dando un periodo de 5 años de pocas precipitaciones en comparación de la ausencia de estas en los primeros 20 años de datos. El NDVI obtiene valores ligeramente más altos en los años de mayor precipitación. AED y precipitación se comportan de manera opuesta, cuando se producen lluvias el AED se reduce, y a la inversa.

Tabla 3. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017. Tendencia positiva en verde, tendencia negativa en naranja. Para p-valor < 0,05 valores en negrita.

	Q	PP	AED	NDVI
Mann Kendall (Test Z)	-1,0216	1,2940	0,9126	5,7889
Pendiente Sen (Q)	-0,2387	4,9889	0,0706	0,0021

Los datos obtenidos de la *tabla 3*, muestran tendencias parecidas a las mostradas en la figura 7, con una diferencia, señalan que las precipitaciones están en aumento con una pendiente positiva, sin obtener valores significativos en el p-valor como más tarde desarrollaremos. El caudal muestra un descenso en sus valores mientras que AED y NDVI tienen una tendencia positiva. En especial el NDVI muestra una fuerte tendencia teniendo un p-valor significativo. Las precipitaciones muestran una fuerte tendencia positiva en la pendiente de Sen, pero no significativa. En el caso del NDVI la tendencia es positiva y significativa.

La figura 8 y la tabla 4 presentan la tendencia del caudal a lo largo de las estaciones. Se observa una tendencia negativa en invierno, verano y otoño, mientras que en la primavera se muestra una tendencia positiva. Esto se contrasta con las pendientes de Sen, donde se obtiene un valor significativo en verano, además otoño e invierno son las estaciones que muestran más recesión. La cantidad de precipitación experimenta un incremento en todas las estaciones, a excepción del otoño. Los datos recopilados en la tabla y representados en la figura coinciden, destacando un notorio aumento, especialmente durante la primavera. Además, para el invierno caudal y precipitación muestran gran variabilidad en los datos.

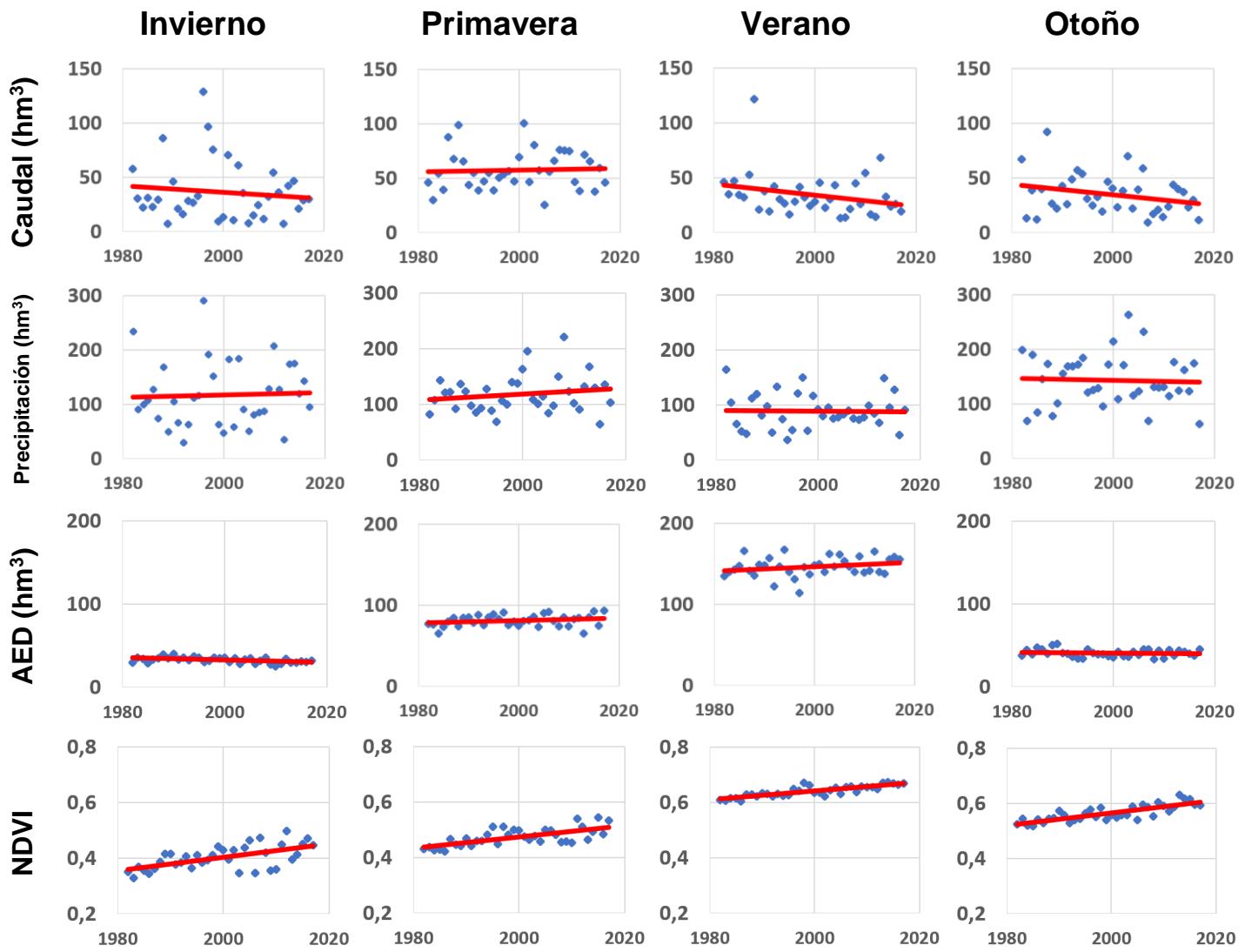


Figura 8. Evolución estacional y línea de tendencia de caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017.

Tabla 4. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI realizada por estaciones en el periodo 1982-2017. Tendencia positiva en verde, tendencia negativa en naranja. Para p -valor $< 0,05$ valores en negrita.

		Inviero	Primavera	Verano	Otoño
CAUDAL	Test Z	-0,4495	0,5585	-2,0840	-1,3757
	Q	-0,1828	0,1572	-0,4197	-0,3486
PRECIPITACIÓN	Test Z	0,5585	0,9671	0,0136	-0,1771
	Q	0,6651	0,3766	0,0342	-0,1627
AED	Test Z	-2,6016	1,5119	1,2940	-0,5040
	Q	-0,1458	0,1923	0,2639	-0,0314
NDVI	Test Z	3,8002	3,8820	5,6254	5,2985
	Q	0,0028	0,0020	0,0016	0,0023

AED muestra tendencia negativa para el otoño e invierno, con valores significativos para esta última. Experimenta una tendencia positiva en para primavera y verano. Apreciar que no obtenemos ningún valor significativo, y las pendientes de Sen apenas muestran un cambio pronunciado en el tiempo al obtenerse valores bajos. NDVI muestra una tendencia positiva, lineal y progresiva a lo largo de todas las estaciones. Se obtuvieron datos significativos en el p-valor para todas las estaciones, además obtenemos valores bajos en la pendiente de Sen, con todo ello es la variable de estudio que tiene un cambio más lento pero constante.

Analizando la tendencia mensual (*tabla 5*), obtenemos datos similares a los resultados de las tendencias estacionales, salvo la de la precipitación, para los meses de invierno (diciembre, enero y febrero) se obtienen tendencias negativas no significativas, mientras que en la estacional aparece como positiva. El caudal muestra dos tendencias negativas significativas en la pendiente de Sen para los meses agosto y septiembre. Una posible causa se atribuye a factores climáticos, específicamente a una reducción significativa de las precipitaciones.

Tabla 5. Tendencia de Mann Kendall (Test Z) y Pendiente (Sen Q) para caudal, precipitación, AED y NDVI realizada por estaciones en el periodo 1982-2017. Tendencia positiva en verde, tendencia negativa en naranja. Para p-valor <0,05 valores en negrita.

	CAUDAL		PRECIPITACIÓN		AED		NDVI	
	Test Z	Q	Test Z	Q	Test Z	Q	Test Z	Q
Enero	-0,8309	-0,2788	1,0761	1,5876	-1,5936	-0,1393	3,6640	0,0033
Febrero	0,1226	0,0862	2,0023	2,1765	-1,2123	-0,1180	2,9830	0,0025
Marzo	1,1850	0,3511	2,8195	2,4100	-0,3678	-0,0893	3,2826	0,0020
Abril	0,6129	0,2852	-0,5040	-0,6991	0,9943	0,1807	4,0726	0,0017
Mayo	-0,3678	-0,1706	-1,0761	-0,6130	1,6481	0,4055	4,3178	0,0027
Junio	-1,5392	-0,6094	0,5857	0,3529	1,6481	0,5564	4,4540	0,0018
Julio	-1,9478	-0,3169	0,7764	0,5598	0,3405	0,0648	5,1896	0,0015
Agosto	-1,8661	-0,1757	0,2043	0,3030	0,5040	0,1681	4,1816	0,0018
Septiembre	-1,1578	-0,2077	-0,3678	-0,3449	-0,7491	-0,1171	4,4813	0,0015
Octubre	0,0681	0,0463	0,2588	0,5206	0,6674	0,1252	4,5085	0,0020
Noviembre	-0,9126	-0,4069	0,1498	0,2381	-1,7571	-0,1829	4,6447	0,0033
Diciembre	-1,2123	-0,3986	-1,1305	-1,4644	-1,3212	-0,1093	2,7923	0,0018

Obtenemos una tendencia positiva y significativa en precipitación, para febrero y marzo, hay más volumen de precipitaciones al comienzo de la primavera. Es probable que no se obtuvieran datos significativos en la tendencia por estaciones ya que la distribución de los meses, se reparte entre el invierno y la primavera. En el AED ocurre igual que con la precipitación, obtenemos valores de tendencia positiva significativa en mayo y junio, que coinciden con el paso de estación. El NDVI obtiene valores significativos para las tendencias en todos los meses de año.

5.3. Análisis de los principales factores que explican el comportamiento hidrológico

5.3.1. Relación entre las variables estudios a diferentes escalas temporales

Se realiza el análisis para las tres escalas anual, estacional y mensual, cuyo estadístico es la matriz de correlación para ver la relación entre las variables de estudio.

Tabla 6. Matriz de correlación para caudal, precipitación, AED y NDVI en el periodo 1982-2017. En verde correlación directa, en rojo inversa. Rojo y verde intenso para valores de p-valor < 0,05, tonalidades claras para p-valor < 0,1

Global	AED	NDVI	P
NDVI	0,1904		
P	-0,4989	-0,016	
Q	-0,3274	-0,2947	0,6536

En la tabla 6, el resultado más interesante es que la correlación entre caudal y precipitación es positiva y significativa. En el resto de variables de estudio, el caudal muestra una correlación negativa con la AED, cuanto mayor es la demanda menor es el caudal, y también muestra una correlación negativa con el NDVI, lo que indica que a una mayor actividad vegetal desciende el caudal. Con el aumento de la precipitación el índice AED disminuye, durante la lluvia, las nubes bloquean la radiación solar directa, limitando el calentamiento de la superficie terrestre y disminuyendo la temperatura del aire, lo que a su vez reduce la evaporación potencial. La correlación negativa entre precipitación y el AED, que incluye variables como temperatura y humedad, podría explicarse por la influencia de las nubes. Estas actúan como reguladores climáticos durante la lluvia, limitando el calentamiento y la evaporación, influyendo así en las variables del AED. El papel de la nubosidad en la reducción de la

radiación solar y de la temperatura del aire puede explicar esta relación negativa entre precipitación y AED (Vicente-Serrano et al. 2021). Las correlaciones estacionales, AED y caudal tienen una correlación negativa y significativa para primavera, verano y otoño (tabla 7). Las variables están interconectadas, y tomando la anterior idea, al reducirse el AED (parte de ello es por las precipitaciones), el caudal aumenta debido al aporte de estas.

Tabla 7. Matriz de correlación para el caudal, precipitación, AED y NDVI por estaciones en el periodo 1982-2017. En verde correlación directa, en rojo inversa. Rojo y verde intenso para valores de p-valor < 0,05, tonalidades claras para p-valor < 0,1

		AED	NDVI	P
INVIERNO	NDVI	0,1801		
	P	-0,4721	-0,3415	
	Q	-0,1728	-0,2811	0,8636
PRIMAVERA	NDVI	0,5974		
	P	-0,5631	-0,2144	
	Q	-0,2966	-0,2871	0,5579
VERANO	NDVI	0,0534		
	P	-0,6666	-0,094	
	Q	-0,4068	-0,122	0,3986
OTOÑO	NDVI	0,1169		
	P	-0,5743	-0,13	
	Q	-0,3646	-0,3071	0,7721

En las correlaciones de la tabla 7, en el invierno hay correlación significativa negativa para la precipitación y el NDVI, la hipótesis es que probablemente la precipitación es en forma de nieve y junto con las temperaturas bajas la vegetación no puede hacer uso de estos recursos y desarrollarse, por lo que el NDVI es bajo. En la cuenca del río Aragón la actividad de la vegetación muestra una fuerte estacionalidad. Como consecuencias de las bajas temperaturas del aire y de la cobertura de nieve dominante en invierno, la actividad de la vegetación baja durante estos meses (Vicente-Serrano et al. 2021).

En la primavera AED y NDVI tienen correlación positiva significativa, debido a las condiciones óptimas de temperatura, horas de luz y una gran fuente de agua que proviene del deshielo, todo esto provocaría el crecimiento vegetal. El caudal y la precipitación muestran una fuerte correlación positiva, con un p-valor significativo en todas las estaciones, logrando valores en torno al 0,8 en invierno y otoño. El NDVI y el caudal tienen una baja correlación negativa significativa para las estaciones de invierno, primavera y otoño. Los estudios indican que la reducción de la cobertura arbórea aumenta la generación de escorrentía tras las perturbaciones (Bosch & Hewlett, 1982). Para el AED obtenemos fuertes correlaciones

negativas significativas con la precipitación, al igual que en las correlaciones para toda la línea temporal se ve reflejado por meses.

Tabla 8. Matriz de correlación para las variables de estudio por meses, en el periodo de estudio 1982-2017. En verde correlación directa, en rojo inversa. Rojo y verde intenso para valores de p -valor $< 0,05$, tonalidades claras para p -valor $< 0,1$

MESES		INVIERNO			MESES		PRIMAVERA		
Diciembre		AED	NDVI	P	Marzo		AED	NDVI	P
NDVI		0,2951			NDVI		0,3991		
P		-0,3784	-0,4259		P		-0,6205	-0,1180	
Q		-0,2963	-0,2591	0,8394	Q		-0,2106	-0,2269	0,6434
Enero		AED	NDVI	P	Abril		AED	NDVI	P
NDVI		0,0420			NDVI		0,5136		
P		-0,1616	-0,1430		P		-0,7114	-0,3969	
Q		-0,0838	-0,2429	0,8093	Q		-0,1949	-0,3025	0,4252
Febrero		AED	NDVI	P	Mayo		AED	NDVI	P
NDVI		0,4574			NDVI		0,6278		
P		-0,4956	-0,2074		P		-0,5764	-0,4008	
Q		-0,0349	-0,2768	0,4188	Q		-0,1796	-0,3495	0,4741
MESES		VERANO			MESES		OTOÑO		
Junio		AED	NDVI	P	Septiembre		AED	NDVI	P
NDVI		0,4109			NDVI		-0,2969		
P		-0,5496	-0,0344		P		-0,5235	-0,0385	
Q		-0,4490	-0,4066	0,5414	Q		-0,3470	-0,0797	0,6867
Julio		AED	NDVI	P	Octubre		AED	NDVI	P
NDVI		-0,0638			NDVI		0,1250		
P		-0,5216	-0,0505		P		-0,5807	-0,0621	
Q		-0,4040	-0,1007	0,3620	Q		-0,4599	-0,1439	0,8397
Agosto		AED	NDVI	P	Noviembre		AED	NDVI	P
NDVI		-0,1777			NDVI		0,0845		
P		-0,7397	0,1457		P		-0,2979	-0,1008	
Q		-0,2589	0,0579	0,3031	Q		-0,1078	-0,2765	0,7396

En la tabla 8 se observa la correlación mensual entre todas las variables de estudio. En primer lugar, se observa que la precipitación y caudal mantienen la correlación significativa en todos los meses del año. La correlación negativa significativa entre precipitación y AED sigue el mismo patrón que tenía para la correlación estacional para todos los meses del año. Sin embargo, la relación negativa entre AED y caudal se mantiene en las estaciones de verano y otoño. La relación negativa de precipitación y NDVI que hay en el invierno, solo se aplica al mes de diciembre, sin embargo, aparece en meses de otoño (abril y mayo). La relación

significativa positiva de AED y NDVI que hay, se mantiene en todos los meses de la primavera, aunque aparecen en meses de otras estaciones: en invierno (diciembre y febrero); y en verano (junio). El desarrollo vegetal aumenta con más horas la luz y el aumento de las temperaturas, extendiéndose temporalmente más allá de la primavera, al final del invierno y principio de la primavera. En el otoño la precipitación tiene una relación muy positiva con el caudal, debido a las lluvias otoñales y al retroceso de vegetación en el fin de la época estival.

5.3.2. Influencia de los factores en el caudal del área de estudio a diferentes escalas temporales

Se realiza el análisis para las tres escalas anual, estacional y mensual, cuyo estadístico es el modelo de regresión paso a paso para ver que variables están más relacionadas con el caudal y cuáles son las que incluye el modelo.

Tabla 9. Modelo de regresión paso a paso del caudal respecto a la precipitación, AED, y NDVI para el periodo 1982-2017 en el área de estudio. En color verde se representa p-valor > 0,05, en verde claro para un p-valor < 0,01, y las celdas en blanco representan las variables que no son incluidas en el modelo.

P-valor	R2 ajustado	AED	NDVI	P
0,0000	0,4782		0,0262	0,0000

El caudal es explicado por las variables NDVI y la precipitación a lo largo de todo el año con un p-valor menor a 0,05 para el modelo stepwise (tabla 9). Así, en las zonas de montaña mediterránea de España, el aumento de la superficie forestal es la explicación más plausible para las reducciones de los caudales de los ríos en las cabeceras (Beguería, S., et al., 2003; Buendía, C., et al., 2016; Martínez-Fernández, J., et al., 2013; Morán-Tejeda, E., et al., 2012). En los modelos obtenidos y estudios revisados, el NDVI influye en el comportamiento del caudal, aunque, en definitiva, la precipitación es la variable que explica la mayor parte del comportamiento de un caudal. Obtenemos también un valor significativo para p-valor de la regresión lineal y un coeficiente de determinación del 48%.

Tabla 10. Modelo de regresión paso a paso del caudal respecto a la precipitación, AED, y NDVI para las estaciones en el periodo 1982-2017 en el área de estudio. En color verde se representa p -valor $> 0,05$, en verde claro para un p -valor $< 0,01$, y las celdas en blanco representan las variables que no son incluidas en el modelo.

Meses	P-valor	R2 ajustado	AED	NDVI	P
Inviero	0,0000	0,8063	0,001		0
Primavera	0,0004	0,291			0,0004
Verano	0,0138	0,1409	0,0138		
Otoño	0,0000	0,6177		0,0544	0

Para la tabla 10, como variable dependiente el caudal, es explicado en invierno por las variables AED y precipitación, según el coeficiente de determinación el 80,63% de varianza explicada por el modelo. En primavera solo la precipitación define al caudal, con un R2 ajustado. En el verano el AED es la única variable que define al modelo, con una varianza explicada del 14,09%, la precipitación no explica al caudal debido a que se trata de la época seca, cuando el río recibe menos aporte de agua por parte de las precipitaciones. El otoño muestra dos variables, la precipitación y el NDVI con un 61,77% de coeficiente de determinación. Al terminar la época seca y recibir las lluvias otoñales, las precipitaciones vuelven a aparecer como explicación del caudal, NDVI es seleccionado, pero con una significancia p -valor $< 0,1$, resultado residual de la selección de esta variable en el mes de noviembre. Todas las regresiones lineales muestran un p -valor significativo, así como todas las variables de estudio que el modelo ha seleccionado para explicar cada estación, salvo el NDVI en otoño, pero con un valor muy próximo a 0,05. Es posible que el modelo no seleccione para primavera, verano y otoño el NDVI ya que como ahora veremos en el modelo por meses (tabla 11) la manifestación de la influencia del NDVI se observa al terminar el invierno, dividiendo su impacto en dos estaciones distintas. Además, en el mes de abril tenemos NDVI como explicación al caudal, pero con datos no significativos. Todo ello resulta en la atenuación del NDVI en la explicación del modelo estacional, este no tiene la sensibilidad requerida para seleccionarlo.

Analizando la tabla 11 para el primer cuarto de año, coincidiendo con el invierno y comicios de la primavera, el modelo destaca precipitación, NDVI y AED como explicación del caudal, adelantándose la influencia de la vegetación a finales del verano poniendo valor en la precipitación con p -valores significativos, aunque coeficientes de determinación que explican una media del 50% de los datos. En nuestro estudio no incluimos otros factores que podrían explicar o tener influencia sobre el caudal, como la geología del suelo, la composición y permeabilidad del suelo. Influyen en la cuenca en la capacidad de retención de agua y en la velocidad de infiltración. Suelos más permeables permiten una mayor absorción y recarga de

acuíferos. La topografía es otro factor que no incluimos, donde la forma del paisaje, incluyendo la elevación y pendiente del terreno, afecta cómo el agua se mueve a través de la cuenca. Áreas montañosas suelen generar escorrentía más rápida debido a las pendientes pronunciadas. El segundo cuatrimestre del año, siendo primavera e inicios del verano AED desaparece siendo explicado por la precipitación y el NDVI, es decir la vegetación estando en plena época estival toma influencia junto con las precipitaciones primaverales, con valores significativos y un coeficiente de determinación bajo, con una media del 25%. La distribución entre agua azul y verde dependería de la estación del año, siendo más importante en la estación seca de verano, cuando la vegetación es más activa (Vicente-Serrano et al. 2021).

Tabla 11. Modelo de regresión paso a paso del caudal respecto a la precipitación, AED, y NDVI para los meses en el periodo 1982-2017 en el área de estudio. En color verde se representa p-valor > 0,05, en verde claro para un p-valor < 0,01, y las celdas en blanco representan las variables que no son incluidas en el modelo.

Meses	P-valor	R2 ajustado	AED	NDVI	P
Enero	0,0000	0,6447			0
Febrero	0,0075	0,243	0,0443	0,0463	0,0031
Marzo	0,0000	0,5069	0,0082	0,0255	0
Abril	0,0249	0,1801	0,1605	0,17	0,0144
Mayo	0,0065	0,2504	0,1051	0,0675	0,0055
Junio	0,0001	0,4101		0,0052	0,0003
Julio	0,0145	0,1386	0,0145		
Agosto	0,0723	0,0652			0,0723
Septiembre	0,0000	0,4561			0
Octubre	0,0000	0,6964			0
Noviembre	0,0000	0,5633		0,0782	0
Diciembre	0,0000	0,6959			0

En verano salvo precipitación y NDVI en junio, ningún otro parámetro parece explicar esta etapa. Para otoño y principios del invierno, precipitación y NDVI (noviembre) son los parámetros de influencia significativos, además obtenemos un R^2 ajustado alto. La magnitud del cambio depende en gran medida del tipo de vegetación y las condiciones ambientales, como la precipitación media (Brown et al., 2005). En términos generales, se observa que la precipitación mantiene su importancia a lo largo de todo el año, excepto en el verano. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) adquiere relevancia hacia finales del invierno, durante la primavera y de manera puntual en el otoño. Por otro lado, la Demanda Evaporativa Atmosférica (AED) cobra importancia al inicio del invierno, durante el verano y al principio del otoño. Estas tendencias destacan la variabilidad estacional en la contribución de

cada variable, señalando períodos específicos en los cuales cada factor tiene un impacto más significativo en el sistema estudiado.

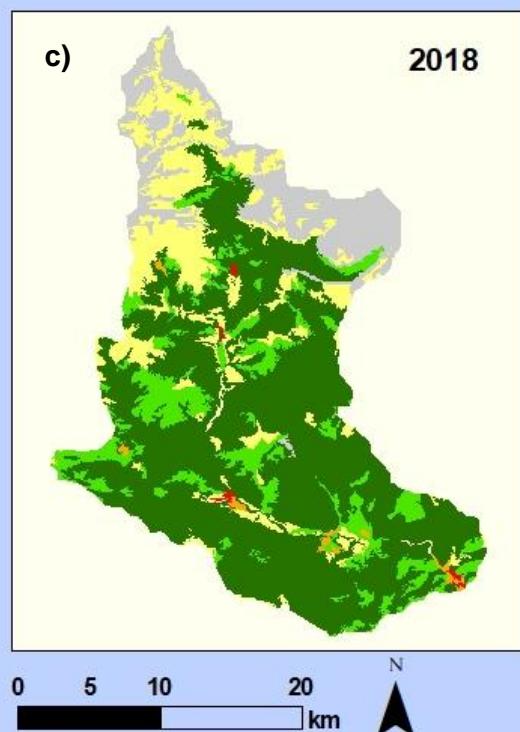
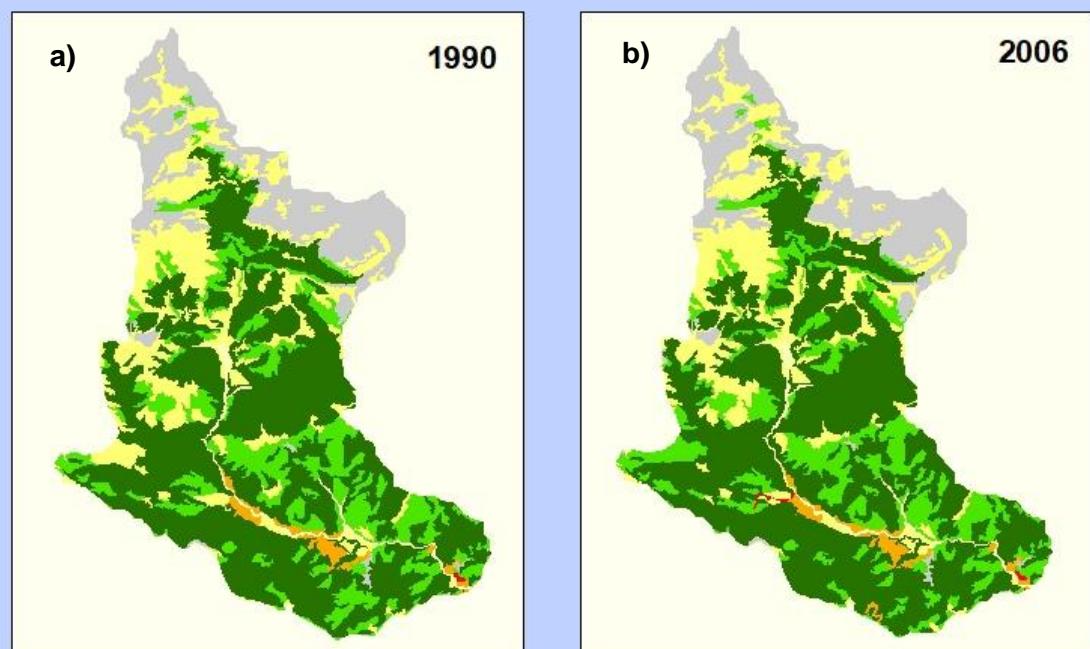
5.4 Evolución de la cobertura vegetal y efectos sobre el balance agua azul y agua verde

La cartografía de usos del suelo se ha realizado a partir de datos ofrecidos por el IGN a partir del *Corine Land Cover*, se presentan las figuras 10 a, b, c, las cuales recogen el mapa de cubiertas vegetales en los años 1990, 2006 y 2018.

En la figura 9 se muestra la distribución espacial de los usos de suelo en el área de estudio, para los años 1980, 2006 y 2018. Se puede apreciar un gradiente vertical norte-sur, empezando con suelo desnudo o pastizales, es decir zonas improductivas en las zonas rocosas donde se encuentran las cimas, dando lugar a matorral para finalmente en la zona sur, aparecer las primeras zonas de uso agrícola como zonas urbanas en los fondos de valle. De acuerdo con Vicente-Serrano y Lasanta (2007) las laderas medias y bajas son las áreas que están experimentando un proceso de revegetación más intenso. En las últimas décadas muchas laderas abancaladas se han abandonado experimentado un proceso muy rápido de sucesión secundaria, que ha llevado a un paisaje de bosque maduro. (Lasanta *et al.* 2020). La vegetación predominante para los tres escenarios es el bosque, siendo $\approx 50\%$ de la superficie. Los usos de suelo que muestran unas dinámicas de cambio son: agrícola, pasto, matorral, bosque y agrario. Hay una sucesión de agrícola a matorral; y hay un cambio notable en las zonas matorralizadas hacia bosque. Hay más sucesión a bosque en la zona sur, mientras que en el norte el cambio es más sutil y lento. El consumo de agua por parte de distintos tipos de vegetación varía según la especie, condiciones climáticas y entorno. Especialmente los bosques con árboles perennes, consumen mayores cantidades debido a la transpiración constante. Las praderas tienen un consumo moderado. En la agricultura, el consumo varía según cultivos, prácticas de riego.

En la figura 9 se presentan los valores porcentuales de la evolución de la superficie de los 4 principales tipos de cubierta vegetal en los tres escenarios temporales. Se ha registrado un incremento en la superficie de bosque del 9,5% y una disminución del matorral (3,8%). No es un cambio de gran magnitud, como los descritos para el periodo 1956-2018 en otras zonas del Pirineo (Bruno *et al.*, 2021), pero es apreciable. Efectivamente, el principal cambio en la cubierta vegetal se produjo al pasar del escenario de gestión tradicional -que se extinguío en los años 1950- al de despoblamiento con realización de repoblaciones forestales en los años 1960 a 1980. Este cambio no ha entrado en la ventana temporal de nuestro estudio (1990-2018) por lo que no ha sido registrado.

USOS DE SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO ARA



Elaborado por: Víctor Pintado Gascón
Fuente: IGN, Corine Land Cover

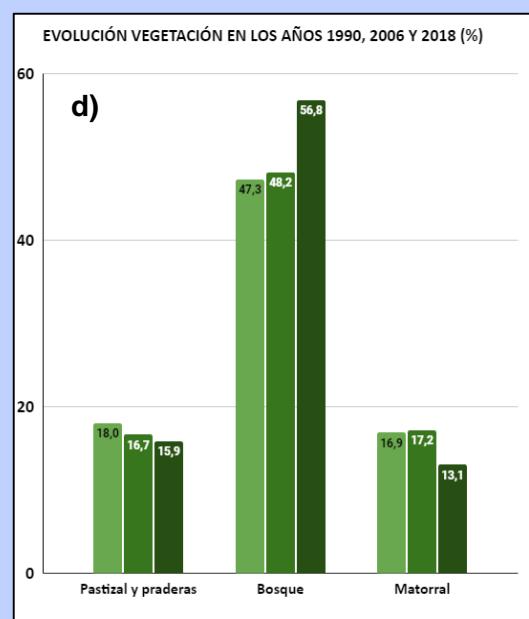


Figura 9. Usos de suelo en la cuenca del río Ara (a) 1990, (b) 2006 y (c) 2018. Fuente: IGN.
Elaboración: Víctor Pintado, y (d) la evolución de la cubierta vegetal (%) en los tres períodos de estudio: 1990, 2006 y 2018

En el siglo XXI el proceso de matorralización/forestación ha continuado, impulsado por la colonización espontánea de antiguos cultivos y pastos que no habían sido repoblados artificialmente, ni colonizados espontáneamente. Diversos estudios muestran resultados con la misma tendencia; en un estudio realizado en el valle de Borau se ha calculado que la superficie de bosque aumentó de 1059 ha a 2271 ha, suponiendo más de la mitad del valle (Lasanta *et al*, 2005; Lasanta y Vicente-Serrano, 2007).

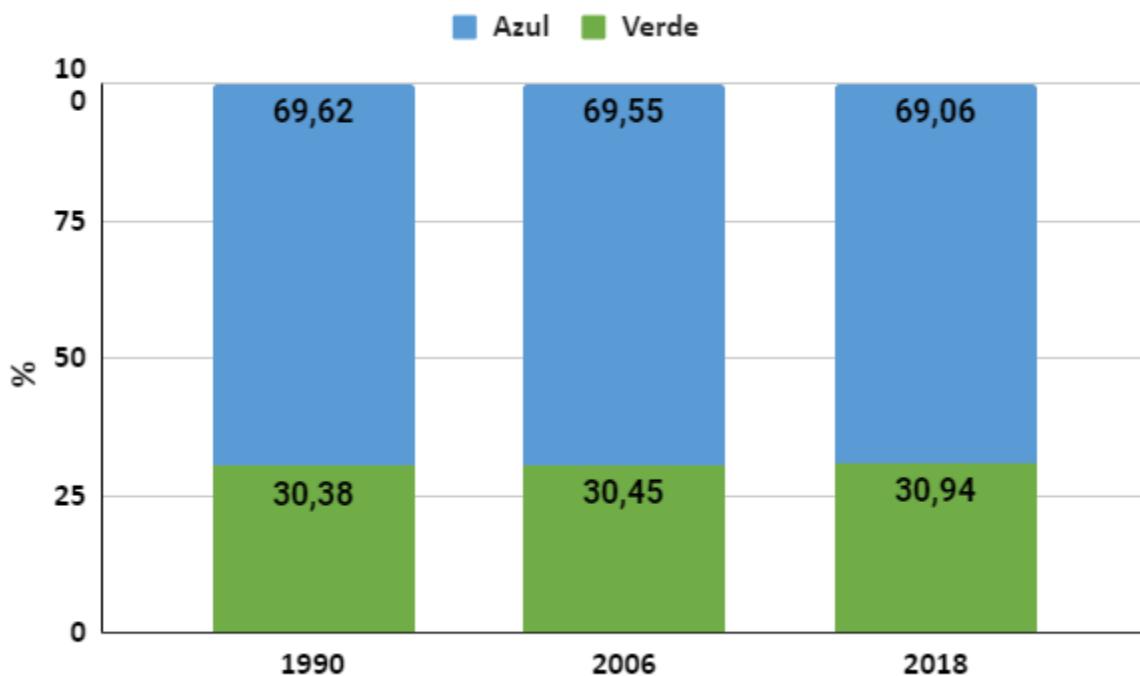


Figura 10. Evolución de la proporción del agua azul y agua verde (%) en los tres períodos de estudio: 1990, 2006 y 2018

En los tres escenarios el ecosistema produce más agua azul que agua verde. El modelo de Zhang responde al incremento del 9,5% en la superficie de bosque con una estimación de la reducción del agua azul de 7,7 Hm³ respecto a los 1.000 Hm³ que produce anualmente la cuenca del Ara (figura 11). Es decir, un 0,53% de reducción. Se trata de una cantidad modesta, equivalente al 30,28% del consumo de agua sanitaria de la ciudad de Zaragoza. Según estas estimaciones, los cambios en la cubierta vegetal en el periodo de estudio (1990-2018) han reducido modestamente la provisión de agua azul. La disminución del agua a escala local puede afectar al mantenimiento de hábitats acuáticos en tramos fluviales de cabecera, balsas y humedales que sustentan hábitats y especies de elevado interés ambiental (Cervera, 2022).

Las diferencias en el balance de agua azul y agua verde entre los tres períodos de estudio son apenas perceptibles, aunque el patrón observado muestra un ligero aumento en el agua

verde en 2018: 30,27% frente al 29,74% de 1990 (0,53%). Conviene recordar que los cálculos de agua azul se han realizado aplicando el mismo volumen de precipitación y el mismo valor de temperatura en los tres escenarios para ver estrictamente el efecto de la vegetación. Es decir, que las estimaciones de agua azul obtenidas, no son las reales, las cuales también dependen del volumen de precipitación y la temperatura media anual en 1990, 2006 y 2018.

Ello indicaría que los cambios en la cubierta vegetal han contribuido modestamente a la reducción en el agua azul entre 1990 y 2018 (0,53%, 7700966 m³) de volumen de agua.

La cubierta vegetal en la zona de estudio, desde las primeras décadas del siglo XX hasta la actualidad ha sufrido un aumento, debido al cambio de usos por el despoblamiento rural además del uso de cambio de ganado y el descenso de la trashumancia y el cambio de ganado ovino a bovino debido a la facilidad en el manejo, ya que era el factor limitante. Para que todo el ganado en el invierno tuviera acceso a los recursos pastorales en invierno este se redujo. Esto implica que no se use una gran proporción de los pastos de verano, que se degradan gradualmente (Nadal-Romero et al, 2018).

Los cambios en la cubierta vegetal ocurridos en el periodo estudiado (1990-2018) se muestran en la figura 12. En las tres décadas estudiadas, los cambios en la cubierta vegetal no son muy marcados, aunque, por un lado, destaca el incremento de la superficie de bosque que pasó del 47,3 al 56,8 por ciento (5.318 ha más de bosque; 9,5%) y la disminución del matorral (3,8% desde 1990, al pasar de 10593 ha a 8187 ha). La diversidad de ecosistemas se está simplificando para dar paso a una mayoría forestal. El abandono y/o repoblación del suelo han provocado un gran aumento de la cobertura vegetal en las cabeceras de cuenca de la región (Lasanta-Martínez et al., 2005; Lasanta et al., 2017; Sanjuán et al., 2018). El bosque y el matorral transpiran más agua que el pastizal y tal como formaliza el modelo de Zhang, por lo tanto, generan más agua verde. En general, las prácticas de repoblación forestal y la sucesión secundaria natural reducen la producción de escorrentía (Filoso, 2017).

6. Conclusiones

- El caudal tiene una tendencia decreciente, en los 5 primeros años de estudio obtenemos un promedio de 61,9 hm³, mientras que en los últimos 5 una cifra de 37,4 hm³. Esto supone una reducción del 44,9% en los últimos 35 años.
- La vegetación está inmersa en un proceso de expansión continuado; el NDVI experimenta un incremento del índice de 0,47 a 0,55, lo que supone un aumento del 6,4% en 35 años.
- El cambio climático afecta a las precipitaciones y el AED, aumentando significativamente la tendencia para febrero y marzo. La época seca propia del verano es más pronunciada, debido a que las lluvias del otoño y verano mantienen su tendencia provocando estiajes más secos y largos.
- Durante el verano, la temperatura y humedad del aire afectan al AED incrementándolo, se observa una relación directa con el aumento del índice de vegetación NDVI. Estos dos factores afectan disminuyendo el caudal, probablemente debido a la evapotranspiración de las plantas que al aumentar el AED y su porte disminuyen la provisión de agua azul.
- La precipitación es la variable que más importancia tiene para explicar el caudal, tal como refleja los modelos de regresión generados ya que aparece como factor de explicación para cualquier estación o mes con valores significativos. Aunque muestra datos muy variables a lo largo del tiempo.
- La relación entre los factores ambientales y el caudal de un río muestra una dinámica compleja. La precipitación actúa como la principal explicación al caudal. Por otro lado, la vegetación y el AED parecen ejercer una influencia más sutil, contribuyendo de manera significativa, pero no tan directa. Hay un equilibrio complejo entre los factores con una interconexión a su vez entre ellos donde configuran el comportamiento de la dinámica fluvial.
- El incremento en la superficie de bosques en un 9,5% y la reducción del matorral en un 4% entre 1990 y 2018 tienen un ligero efecto en la producción de agua azul, que el modelo de Zhang evalúa en una reducción del 0,53%, 7,7 Hm³ de agua, el equivalente a un 30,28% del consumo de la ciudad de Zaragoza en un año. La provisión anual de agua azul de la cuenca se ha estimado en 1.000 Hm³/año.

7. Bibliografía

1. Anderegg, W. R. L., Martínez-Vilalta, J., Cailleret, M., Camarero, J. J., Ewers, B. E., Galbraith, D., et al. (2016). When a tree dies in the forest: Scaling climate-driven tree mortality to ecosystem water and carbon fluxes. *Ecosystems*, 19(6), 1133–1147. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9982-1>.
2. Beguería, S., López-Moreno, J. I., Lorente, A., Seeger, M., & García-Ruiz, J. M. (2003). Assessing the effect of climate oscillations and land-use changes on streamflow in the Central Spanish Pyrenees. *Ambio*, 32(4), 283–286. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-32.4.283>.
3. Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1), 3–23. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(82\)90117-2](https://doi.org/10.1016/0022-1694(82)90117-2).
4. Brown, A. E., Zhang, L., McMahon, T. A., Western, A. W., & Vertessy, R. A. (2005). A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. *Journal of Hydrology*, 310(1), 28–61. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.12.010>.
5. Brutsaert, W. (2005): Hydrology. An introduction. Cambridge University Press. 605 p.
6. Bruno, D., Sorando, R., Álvarez-Farizo, B., Castellano, C., Céspedes, V., Gallardo, B., Jiménez, J. J., López, M. V., López-Flores, R., Moret-Fernández, D., Navarro, E., Picazo, F., Sevilla-Callejo, M., Tormo, J., Vidal-Macua, J. J., Nicolau, J. M., & Comín, F. A. (2021). Depopulation impacts on ecosystem services in Mediterranean rural areas. *Ecosystem Services*, 52, 101369. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101369>
7. Buendia, C., Bussi, G., Tuset, J., Vericat, D., Sabater, S., Palau, A., & Batalla, R. J. (2016). Effects of afforestation on runoff and sediment load in an upland Mediterranean catchment. *Science of the Total Environment*, 540, 144–157. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.005>.
8. CEDEX. (s.f.). Anuario de Aforos. Disponible en: <https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>.
9. Cervera, T., Baiges, T., Rabascall, X. et al (2022). Metodología de cálculo de la gestión forestal en los servicios ecosistémicos: carbono, agua y biodiversidad. Centro de la Propiedad Forestal, Santa Perpètua de Mogoda. 61pp.
10. Confederación Hidrográfica del Ebro. (2022). Estudio de la calidad ecológica integral de los tramos fluviales más importantes del río Cinca. Zaragoza: CHE.
11. De Información Geográfica, O. A. C. N. (s. f.). Centro de Descargas del CNIG (IGN). Centro de Descargas del CNIG. Recuperado 5 de octubre de 2023, de <https://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=SIOSE>.

12. Datos climáticos mundiales. (s. f.). <https://es.climate-data.org/>
13. De Aragon, G. (s. f.). Atlas de ICEARAGON Infraestructura de conocimiento espacial de Aragon. <https://idearagon.aragon.es/atlas/Clima>
14. Enguita, G. (2016). Análisis histórico del balance de agua azul y agua verde en los montes del T. M. de La Zoma (Te) afectados por el incendio del año 2009. Trabajo de fin de grado. Universidad de Zaragoza.
15. Falkenmark, M. (2003). Freshwater as shared between society and ecosystems: from divided approaches to integrated challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 2037-2049. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1693285/>
16. Filoso, S., Bezerra, M. O., Weiss, K. C. B., & Palmer, M. A. (2017). Impacts of forest restoration on water yield: A systematic review. *PLoS One*, 12, e0183210. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183210>.
17. Forcieri, G., et all. Increased control of vegetation on global terrestrial energy fluxes. *Nature climate change* 10(4). <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0717-0>
18. García-Estríngana, P., Gallart, F. y Llorens, P. (2014). Estimación del papel de los cambios en la cubierta vegetal en la repartición de la precipitación entre agua verde y agua azul. Instituto de Diagnóstico Ambiental y Estudios del Agua (IDAEA-CSIC). Disponible en: <https://ecodes.org/documentos/plantando-agua/Informe-IDAEA.pdf>.
19. Gudmundsson, L., Seneviratne, S. I., & Zhang, X. (2017). Anthropogenic climate change detected in European renewable freshwater resources. *Nature Climate Change*, 7(11), 813–816. <https://doi.org/10.1038/nclimate3416>.
20. Hernández Santón, C., & Rubio Fernández, V. (1990). La evolución reciente del cauce del río ara. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, (16), 99-108.
21. Komatsu H., Cho J., Matsumoto K., Otsuki K. (2012). Simple modeling of the global variation in annual forest evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 420–421 380–390. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0022169411009176>.
22. Lasanta, T., Arnáez, J., Pascual, N., Ruiz-Flaño, P., Errea, M. P., & Lana-Renault, N. (2017). Space–time process and drivers of land abandonment in Europe. *Catena*, 149, 810–823. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.02.024>.
23. Lasanta, T., Rubio-Balducci, P., Nadal-Romero, E., Errea, M.P., & Cammeraat, E. (2020). Naturalización de un paisaje cultural pirenaico: los bancales de Bestué (Huesca). *Investigaciones Geográficas*, (74), 51-69. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.LRNEC>
24. Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S. M., & Cuadrat-Prats, J. M. (2005). Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary

- activities: A study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25(1), 47–65. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2004.11.001>.
25. Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012). Recent trends in Iberian stream-flows (1945-2005). *Journal of Hydrology*, 414–415. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.11.023>.
26. Martínez-Fernández, J., Sánchez, N., & Herrero-Jiménez, C. M. (2013). Recent trends in rivers with near-natural flow regime: The case of the river headwaters in Spain. *Progress in Physical Geography*, 37(5), 685–700. <https://doi.org/10.1177/0309133313496834>.
27. Morán-Tejeda, E., Ceballos-Barbancho, A., Llorente-Pinto, J. M., & López-Moreno, J. I. (2012). Land-cover changes and recent hydrological evolution in the Duero Basin (Spain). *Regional Environmental Change*, 12(1), 17–33. <https://doi.org/10.1007/s10113-011-0236-7>.
28. Nadal-Romero, E., Lasanta, T y Cerdà, A. (2018). Integrating extensive livestock and soil conservation policies in Mediterranean mountain areas for recovery of abandoned lands in the Central Spanish Pyrenees. A long-term research assessment. *Land Degradation and Development*, 29(2), 262-273.
29. Orth, R., Destouni, G. La sequía reduce los flujos de aguas azules con más fuerza que los flujos de aguas verdes en Europa. *Nat Comuna* 9 , 3602 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06013-7>.
30. Pereira, L. S., Allen, R. G., Smith, M., & Raes, D. (2015). Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. *Agricultural Water Management*, 147, 4–20. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.031>.
31. Peña-Angulo, D., Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Lorenzo-Lacruz, J., Murphy, C., Hannaford, J., Allan, R. P., Tramblay, Y., Reig, F., & Kenawy, A. E. (2022). The complex and spatially diverse patterns of hydrological droughts across Europe. *Water Resources Research*, 58(4). <https://doi.org/10.1029/2022wr031976>.
32. Portal CHEbro. (s. f.). Portal CHEbro. <https://www.chebro.es/>.
33. Sánchez, O. (2018) La cuenca del río Ara. Algunas propuestas de gestión (TFM, Universidad de Zaragoza). <https://zaguan.unizar.es/record/76166/files/TAZ-TFM-2018-1074.pdf>.
34. Sanjuán, Y., Arnáez, J., Beguería, S., Lana-Renault, N., Lasanta, T., Gómez-Villar, A., et al. (2018). Woody plant encroachment following grazing abandonment in the subalpine belt: A case study in northern Spain. *Regional Environmental Change*, 18(4), 1103–1115. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1245-y>.
35. Stahl, K., Hisdal, H., Hannaford, J., Tallaksen, L. M., Van Lanen, H. A. J., Sauquet, E., et al. (2010). Streamflow trends in Europe: Evidence from a dataset of near-natural

- catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14(12), 2367–2382. <https://doi.org/10.5194/hess-14-2367-2010>
36. Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., Murphy, C., Peña-Angulo, D., Tomas-Burguera, M., Noguera, I., et al. (2021). Increased vegetation in mountainous headwaters amplifies water stress during dry periods. *Geophysical Research Letters*, 48, e2021GL094672. <https://doi.org/10.1029/2021GL094672>.
37. Vicente-Serrano, S. M., Martín-Hernández, N., Reig, F., Azorin-Molina, C., Zabalza, J., Beguería, S., et al. (2020). Vegetation greening in Spain detected from long term data (1981–2015). *International Journal of Remote Sensing*, 41(5), 1709–1740. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1674460>.
38. Vicente-Serrano, S. M., McVicar, T. R., Miralles, D. G., Yang, Y., & Tomas-Burguera, M. (2020). Unraveling the influence of atmospheric evaporative demand on drought and its response to climate change. *WIREs Climate Change*, <https://doi.org/10.1002/wcc.632>.
39. Vicente-Serrano, S.M.; Tomas-Burguera, M.; Beguería, S.; Reig, F.; Latorre, B.; Peña-Gallardo, M.; Luna, M.Y.; Morata, A.; González-Hidalgo, J.C. A High Resolution Dataset of Drought Indices for Spain. *Data* 2017, 2, 22. <https://doi.org/10.3390/data2030022>.
40. Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701-708. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/200472262_Response_of_Mean_Annual_Evapotranspiration_to_Vegetation_Changes_at_Catchment_Scale
41. Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (1999). Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance, Technical Report. 99/12. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Canberra. Disponible en: <https://www.ewater.org.au/archive/crcch/archive/pubs/pdfs/technical199912.pdf>.
42. Zeng, Z., Piao, S., Li, L. Z. X., Wang, T., Ciais, P., Lian, X., et al. (2018). Impact of Earth greening on the terrestrial water cycle. *Journal of Climate*, 31(7), 2633–2650. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0236.1>.

8. Anexos



Figura 11 Atlas climático, para obtener la temperatura media (AEMET).

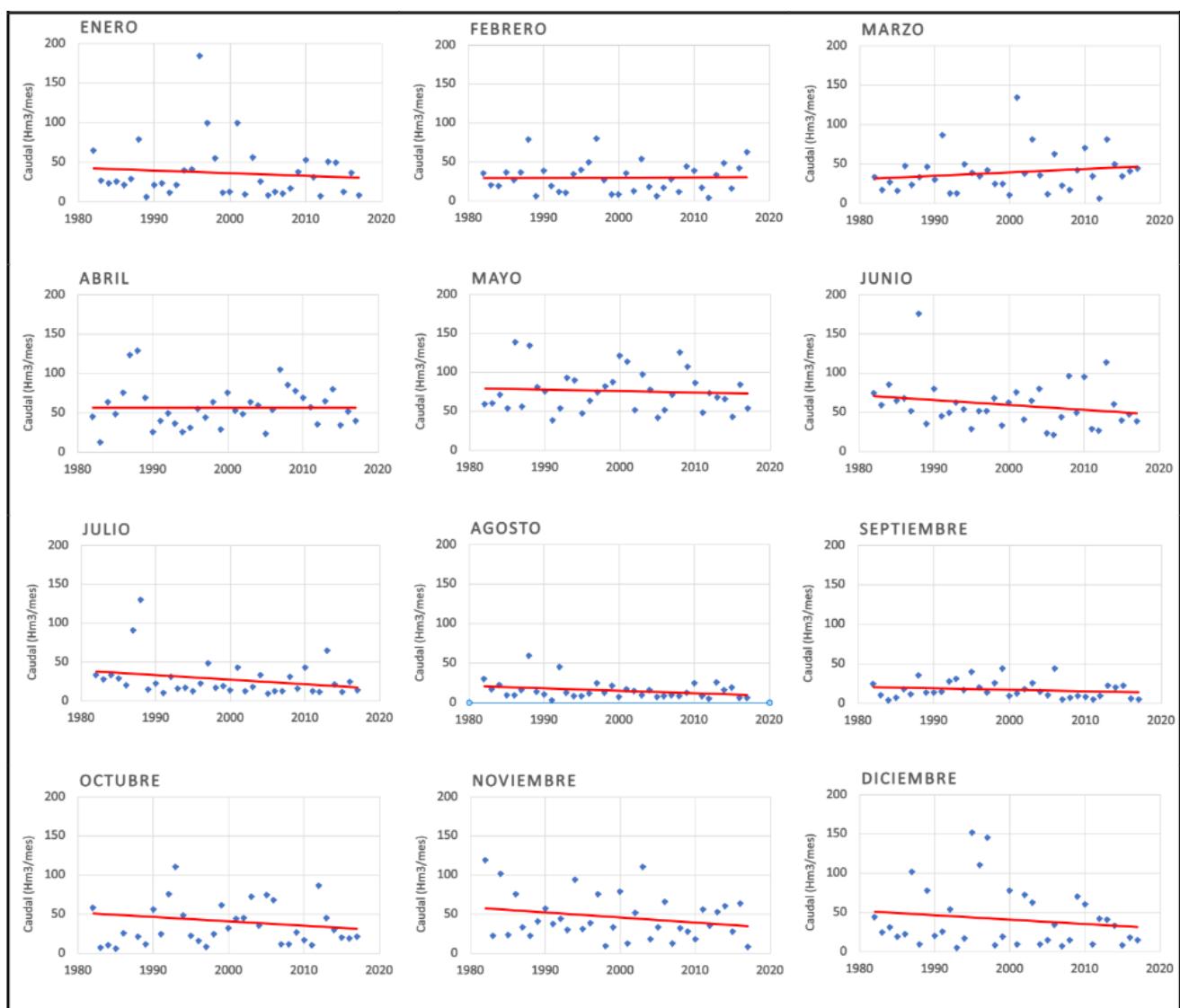


Figura 12. Evolución mensual y línea de tendencia para el caudal en el periodo 1982-2017

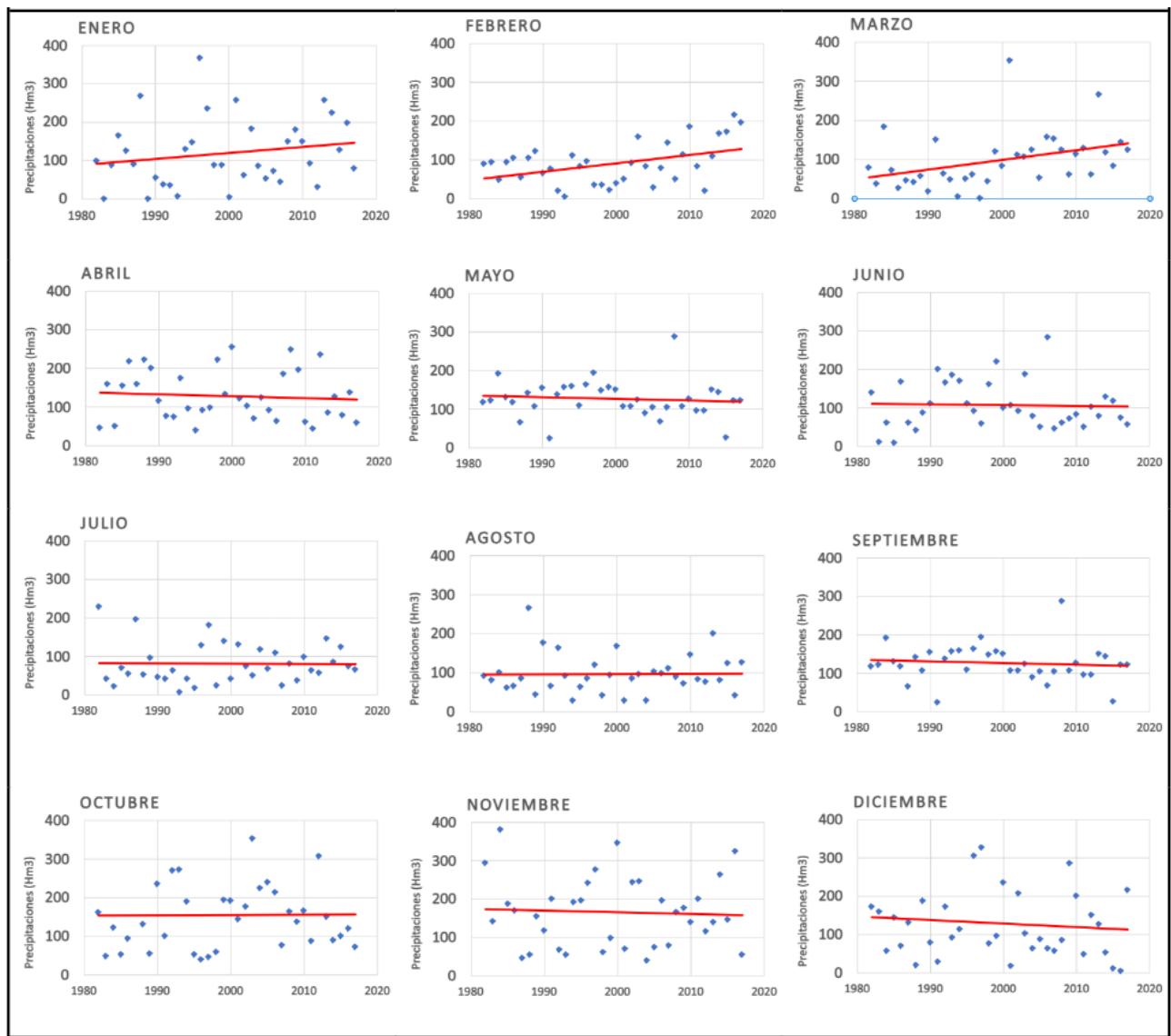


Figura 13. Evolución mensual y línea de tendencia para la precipitación en el periodo 1982-2017

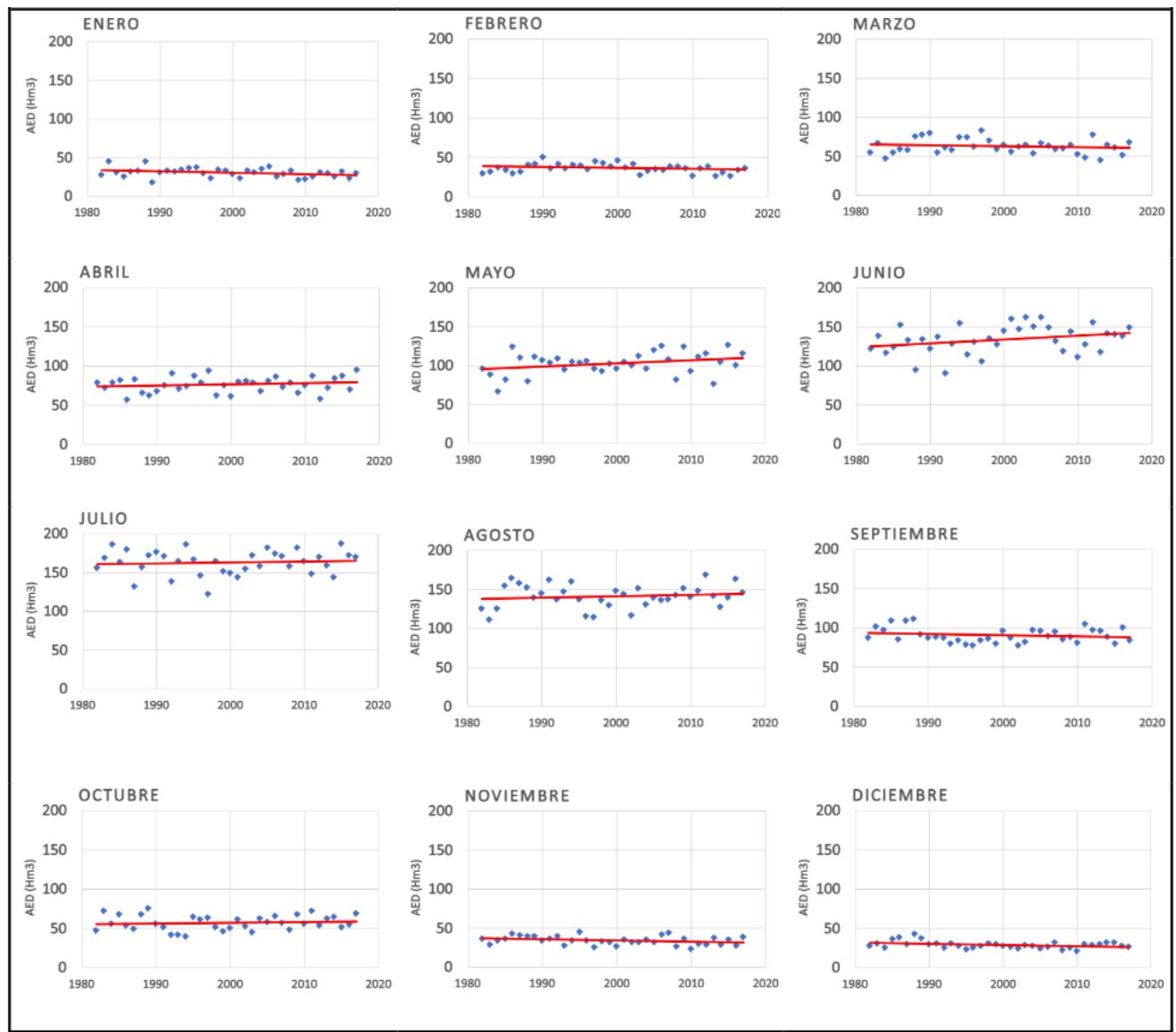


Figura 14. Evolución mensual y línea de tendencia para el AED en el periodo 1982-2017

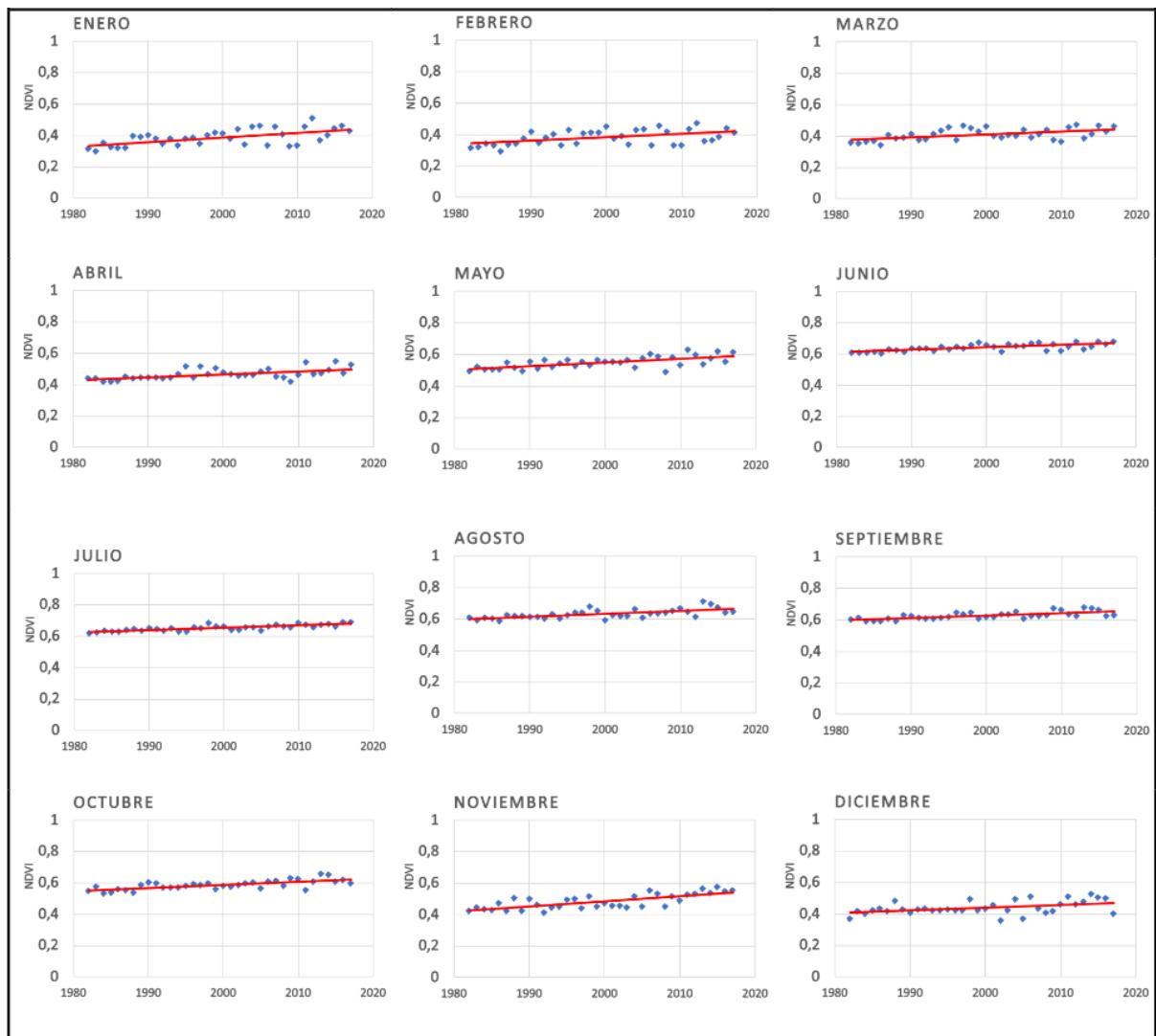


Figura 16. Evolución mensual y línea de tendencia para el NDVI en el periodo 1982-2017