

# Trabajo Fin de Grado

## **Análisis y caracterización de la sequía hidrológica en el Pirineo**

Autor

**David Mareca Espeleta**

Directores

José María Cuadrat Prats

Jorge Lorenzo Lacruz

Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio

Facultad de Filosofía y Letras

2013/2014



## ÍNDICE

RESUMEN .....	5
1. INTRODUCCIÓN .....	7
1.1 Justificación .....	7
1.2 Estructura .....	8
1.3 Objetivos.....	10
1.4 Metodología .....	11
2. ESTADO DE LA CUESTIÓN.....	15
2.1 Conceptualización de la sequía .....	15
2.2 Procesos asociados al funcionamiento de la escorrentía en una cuenca	19
2.3 Los índices de sequía: SPI y SSI.....	22
2.4 Estudios previos sobre el cambio climático e impacto sobre los recursos hídricos .....	25
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	27
3.1 Descripción y justificación de la selección .....	27
3.2 Caracterización de la zona .....	36
3.2.1 Factores y comportamiento estacional.....	36
3.2.2 Morfología de la cuenca .....	39
3.2.3 Usos del suelo y vegetación.....	45
4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS .....	47
4.1 Tendencias de las aportaciones de caudal.....	49
4.2 Tendencias de las temperaturas.....	55
4.3 Tendencias de las precipitaciones .....	61
5. ANÁLISIS DE IMPACTOS.....	64
5.1 Análisis del impacto de la sequía meteorológica (SPI) en la sequía hidrológica (SSI) .....	65
6. DISCUSIÓN Y VALORACIÓN.....	68
7. CONCLUSIONES.....	72
8. BIBLIGRAFÍA Y FUENTES .....	73
9. ANEXOS .....	78



## **RESUMEN**

Este trabajo pretende examinar el comportamiento de la sequía hidrológica en diversas cuencas localizadas en el Pirineo Central. En concreto las cuencas estudiadas son las cuencas del Nive, Irati, Gave, Aragón, Ara, Neste, Salat, Aude y Segre.

Dada su localización debido a su distribución regular a lo largo de los Pirineos, se establece una caracterización de la zona de estudio previa en la que se valoran los diferentes factores que pueden incidir en los procesos hidrológicos de cada una de las cuencas analizadas. Dichos factores pueden ser de origen natural tales como la topografía (altitud, pendientes, forma de la cuenca...etc.) o el clima (temperaturas y precipitaciones) como antrópicos (cubierta de usos de suelo).

El período establecido de análisis comprende 1950-2010 dado la disponibilidad de los datos –caudal, precipitación y temperatura-.

Mediante el tratamiento estadístico de la información se logra la reconstrucción de las series candidatas de caudal a partir de estaciones de aforo no modificadas por gestión hidrológica. De igual modo, con los datos de precipitación y temperatura se logra obtener las series climáticas regionales para cada una de las cuencas.

Como resultado final, se lleva a cabo un análisis de tendencias de las variables nombradas a fin de observar cuál es la evolución espacio-temporal entre 1950 y 2010. De la misma forma pero aplicando los índices de sequía climática (SPI) e hidrológica (SSI) se desarrolla un análisis de impactos con el que se considera la relación entre el caudal estandarizado y la anomalía de precipitación acumulada a diferentes escalas, a fin de determinar los principales patrones de comportamiento en la respuesta hidrológica.



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Justificación

Este trabajo se enmarca en la necesidad de seguir investigando sobre el fenómeno del proceso de cambio climático que viene sobre todo incidido en el ámbito de la Península Ibérica por la recurrencia de la sequía, así que desde este punto de vista, el estudio de este fenómeno es interesante pues se ha convertido en uno de los peligros naturales más difundidos en el mundo y que en combinación con la vulnerabilidad social de las regiones se ha consolidado como el desastre natural más importante en términos de hambre, pérdida de vidas humanas y económicas en todo el mundo (Núñez, Rivera, Oyarzún, & Arumí, 2014).

La particularidad del área de estudio analizada -Los Pirineos- reside en que se trata de cuencas que por sus características morfológicas (altitud, pendiente...) producen una gran proporción de escorrentía y a su vez esa agua es fundamental para garantizar el suministro a zonas bajas por lo que se necesita de una buena optimización y gestión de los recursos hídricos con la construcción de numerosas presas para sincronizar la producción de escorrentía y demandas de agua. Así mismo, los Pirineos son un buen ejemplo de este proceso, la presencia de numerosos embalses tratan de garantizar el suministro de agua para la agricultura, la producción de energía hidroeléctrica, la industrial, el turismo y los usos domésticos (López-Moreno et al., 2014a). A este respecto las cuencas escogidas son seleccionadas en función de la disponibilidad y fiabilidad de los datos.

Debido al régimen natural de diversas masas de agua junto al elevado número de precipitaciones anuales registradas en nuestra área de estudio (Pirineos) el análisis del comportamiento hidrológico a través de indicadores como el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) en relación con el régimen natural de precipitaciones se torna de especial relevancia en la monitorización de los períodos secos tanto en el tiempo como en el espacio así como puede resultar de gran ayuda para sistemas de detección temprana de sequías.

## 1.2 Estructura

La estructura del trabajo presenta una organización sencilla que se traduce en primer lugar en un primer **apartado introductorio** en el que se manifiesta la *justificación del trabajo* – que ha motivado este trabajo de investigación -, el planteamiento de una serie de *objetivos* con los que se ha pretendido marcar un hilo de seguimiento en las diferentes fases del trabajo, la *metodología* – herramientas, datos, variables y fases de desarrollo del trabajo llevado a cabo- y el desarrollo de la forma y estructura del documento síntesis que recoge el contenido.

El segundo apartado denominado **estado de la cuestión** se busca aclarar los diferentes conceptos y nociones fundamentales que se utilizan durante el trabajo en relación con la identificación de los periodos de sequía y los procesos asociados al funcionamiento hidrológico en las cuencas. También se pone de manifiesto todo el conjunto de trabajos de investigación de especial interés –monografías, artículos científicos...etc- que se han ido publicando a lo largo de los últimos años como punto de partida para este trabajo.

En el tercer apartado del documento se encuentra la **caracterización de la zona de estudio** en este capítulo se presenta la zona de estudio de forma introductoria que nos abarcará gran parte de nuestros análisis de los diferentes comportamientos de los caudales y otras variables como la precipitación y la temperatura. Se explica la causa de haber seleccionado las cuencas finalmente descritas, la localización de las estaciones de aforo en cada una de las cuencas de estudio y la periodicidad temporal de la selección. Finalmente se procede a la caracterización de las cuencas de estudio a partir de las diferentes variables morfométricas, hidrogeológicas y fisiográficas que nos ayudaran a interpretar los resultados obtenidos en la fase final del trabajo.

En el cuarto apartado del documento denominado **análisis de tendencias** se presenta la fase asociada al análisis de tendencias que nos permite contextualizar y mostrar de forma sencilla la evolución temporal (las últimas décadas) así como la variabilidad estacional de los caudales analizados en



relación con las temperaturas y las precipitaciones. En relación con el análisis de tendencias, se presenta en el **análisis de impactos** en el siguiente capítulo, en este apartado se identifican los diferentes episodios de sequía mediante los indicadores *SPI (Índice de Precipitación Estandarizada)* y *SSI (Índice de Caudal Estandarizado)* registrados durante el período temporal analizado.

Finalmente en los apartados de **discusión y conclusiones** se recoge la discusión y valoración general de los resultados obtenidos y los aspectos más relevantes que se han decidido destacar de la elaboración del presente trabajo, así como se intenta que respondan a los objetivos propuestos desde el principio. Posteriormente se pueden encontrar las fuentes y bibliografía empleada para llevar a cabo el documento así como la composición de los anexos.

### 1.3 Objetivos

Como cualquier otro trabajo de naturaleza científico-técnica los objetivos que se han propuesto a partir de la idea inicial y posterior desarrollo de este trabajo son de carácter investigador, de esta manera podría resumirse el siguiente **objetivo general**:

*Estudio del comportamiento de la sequía hidrológica entorno a las cuencas analizadas que se localizan a lo largo de los Pirineos así como su posible interpretación en función de los diferentes factores analizados.*

Otros objetivos de menor calado pero también de vital importancia son los siguientes:

- Descubrir y explorar las fuentes de información así como los diferentes procesos metodológicos necesarios para la obtención y valoración de las diferentes variables, datos, información geográfica y herramientas SIG necesarios en el proceso de elaboración del trabajo.
- Caracterizar el área de estudio seleccionada en función de los diferentes factores que pueden incidir en el comportamiento de las sequías hidrológicas.
- Analizar la evolución temporal de la información hidrológica y climática en las áreas de estudio desde la década de 1950 hasta la actualidad en distintos períodos: anuales, mensuales y estacionales.
- Identificar los principales patrones espaciales que dan respuesta a los procesos hidrológicos y climáticos en el área de estudio así como los posibles impactos.
- Convertir este Proyecto Fin de Grado en un punto de referencia para el estudio del fenómeno para futuros investigadores y estudiantes en general.

## 1.4 Metodología

El proceso metodológico empleado en el desarrollo del trabajo se enmarca en diferentes fases en función del tratamiento de la información, de este modo podemos hablar de las siguientes fases:

- 1) selección de la zona de estudio
- 2) selección de las estaciones de aforo no modificadas por gestión hidrológica
- 3) obtención y reconstrucción de las series de caudal (aportaciones mensuales en  $\text{hm}^3$ ) – creación de las cuencas vertientes
- 4) obtención y reconstrucción de los datos de temperatura y precipitación
- 5) cálculo de las series climáticas regionales mediante el método de los polígonos de Thiessen
- 6) análisis de tendencias hidrológicas y climáticas
- 7) análisis de impactos: cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y del Índice de Caudal Estandarizado (SSI)

### 1) selección de la zona de estudio

En primer lugar, se procedió en una primera introducción a valorar la zona de estudio a seleccionar, siempre y cuando se tratase de un área de la Península Ibérica. En este sentido se necesitaba localizar un espacio con una elevada altitud donde estuvieran presentes estaciones de aforo en ríos con escasa gestión hidrológica y a la vez con un amplio historial de datos para poder tener una buena disponibilidad de información. Ya que desde el departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza se ha trabajado y se sigue trabajando con series de temperatura y precipitación del área pirenaica tanto de la vertiente española como francesa se pensó en aprovechar esa experiencia tomando el análisis de cuencas del Pirineo español y francés.

### 2) selección de las estaciones de aforo no modificadas por gestión hidrológica

A continuación se procedió a seleccionar las diversas estaciones de aforo ubicadas en determinadas cuencas hidrográficas no reguladas mediante gestión hidrográfica –especialmente la modificación por embalses-. En este

sentido se trataba de que las cuencas candidatas en la selección se localizaran en cabeceras de los cauces y que la disponibilidad anual de los datos (variable de aportaciones mensuales en hm<sup>3</sup>) fuese superior al 80% de todo el período comprendido entre 1950-2010.

### 3) obtención y reconstrucción de las series de caudal (aportaciones mensuales en hm<sup>3</sup>) – creación de las cuencas vertientes

Con los datos de caudal procedentes del Anuario de Aforos correspondiente a la base de datos del CEDEX para las cuencas pirenaicas españolas y el banco de datos Hydro para las cuencas pirenaicas francesas, se procedió a la reconstrucción de las cuencas candidatas (con mayor número de años completos) en cada una de las cuencas hidrográficas mediante un modelo de regresión lineal:

$$y = a \cdot x + b$$

Donde 'a' es la pendiente de la recta y la 'b' la ordenada en el origen. Mediante la aplicación de este modelo sobre las series de caudal vecinas se pudieron reconstruir las diez cuencas candidatas. Finalmente las series hidrológicas de caudal resultantes fueron armonizadas en hm<sup>3</sup> y clasificadas por meses para el posterior análisis de tendencias.

A partir de las cuencas candidatas seleccionadas se procedió también mediante herramientas SIG a la elaboración de las cuencas vertientes mediante diversa información geográfica (MDE –modelo digital de elevaciones-, red hidrográfica...etc.)

### 4) obtención y reconstrucción de los datos de temperatura y precipitación

Con los datos de los observatorios de temperaturas (variable de temperatura media mensual a partir de las máximas y las mínimas) y precipitaciones (mm) obtenidos gracias al departamento de Geografía y Ordenación del Territorio de la Universidad de Zaragoza se procedió a delimitar las áreas de influencia a partir de dichos conjuntos de puntos mediante el conjunto de herramientas SIG, concretamente el método seleccionado fue el de los Polígonos de Thiessen.

#### 5) cálculo de las series climáticas regionales mediante el método de los polígonos de Thiessen

Con los datos de los observatorios climáticos y en función de los polígonos de Thiessen generados, se hallaron los pesos porcentuales de cada uno de ellos para cada una de las cuencas vertientes del área analizada. De esta manera se obtuvieron las series climáticas regionales para cada una de las cuencas.

#### 6) análisis de tendencias hidrológicas y climáticas

Para el cálculo de las tendencias de caudal, precipitación y temperatura se procedió a realizar un test de correlación no paramétrica *Tau-b de Kendall* mediante el que se enfrentó la serie temporal (1950-2010) con cada una de las variables (aportaciones de caudal, temperatura y precipitaciones). Para llevar a cabo el análisis estadístico, previamente antes fue necesario organizar las series de cada una de las variables mensualmente mediante un filtrado en un editor de hojas de cálculo.

Posteriormente con los resultados se elaboró la cartografía que se puede consultar en el capítulo de este documento acerca del análisis de tendencias.

#### 7) análisis de impactos: cálculo del Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) y del Índice de Caudal Estandarizado (SSI)

Para obtener el impacto de los déficits de precipitación sobre los caudales de los ríos en nuestras cuencas de estudio, se procedió a correlacionar el Índice de Caudal Estandarizado (SSI) con el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) mediante el coeficiente de correlación de Pearson (test paramétrico para variables normalizadas de naturaleza cuantitativa).

En este trabajo para el cálculo de los valores SPI se ha utilizado el algoritmo descrito por Vicente-Serrano y Cuadrat (2002) a escalas desde 1 a 48 meses.

El análisis de impactos se tradujo en la elaboración de 10 curvas de correlación continuas (R de Pearson) entre ambos índices para explicar el comportamiento hidrológico de cada una de las cuencas.

Los resultados obtenidos en forma de gráficos y tablas fueron posibles gracias a la utilización de herramientas varias como un editor de hojas de cálculo, mientras que los resultados cartográficos fueron llevados a cabo mediante el conjunto de herramientas SIG (ArcGIS).

Por último, para el tratamiento estadístico aplicado de la información en fases tales como el análisis de tendencias y el de impactos fue necesario utilizar herramientas como IBM SPSS Statistics.

## **2. ESTADO DE LA CUESTIÓN**

### **2.1 Conceptualización de la sequía**

La sequía se constituye como uno de los mayores riesgos que se esperan como consecuencia del proceso de cambio climático (Vrochidou, Tsanis, Grillakis, & Koutroulis, 2013). Si bien las consecuencias que se esperan de este proceso tendrán un impacto a largo plazo, especialmente en el caso de las sequías, otros podrían tener un impacto mucho más directo en el tiempo, tales como lluvias intensas e inundaciones. En este sentido, no podemos olvidarnos que nuestra zona de estudio en este trabajo es el Pirineo que forma parte de la región del Mediterráneo, en este caso el estudio de la sequía cuenta con mayor interés por ser uno de los “puntos calientes” en las futuras proyecciones del cambio climático al tratarse a una de las regiones potencialmente vulnerable a los cambios (Giorgi & Lionello, 2008).

Específicamente, la sequía se trata de un riesgo natural entendido como la amenaza potencial de ocurrencia de un evento natural que puede ocasionar efectos negativos para la población y los ecosistemas (Lorenzo Lacruz, 2012). Este aumento del riesgo en el contexto del cambio climático se explica por el aumento de la temperatura, que en consecuencia contribuirá también a un incremento de la evaporación del aire y por tanto del incremento del número de episodios de precipitación irregular en el tiempo y en el espacio.

Se podría catalogar como aquél fenómeno capaz de originar una anomalía transitoria, más o menos prolongada en el tiempo, durante la cual las precipitaciones registradas son inferiores a los valores normales de precipitación que suelen producirse en el área de estudio, lo que implica una disminución significativa de los recursos hídricos disponibles (Limonés Rodríguez & Pita López, 2013). Es importante por tanto diferenciar los conceptos de sequía y aridez, el primero alude a un déficit hídrico coyuntural y anómalo, mientras que el segundo término hace referencia a un rasgo caracterizador de ciertos climas en las que hay condiciones permanentes de y habituales de escasez de agua (Pita López, 1989). Diferentes factores además de la variabilidad atmosférica nos permiten determinar la ocurrencia de este fenómeno, a los que hay que sumar los diferentes y complejos procesos

hidrológicos (Lorenzo Lacruz, 2012) que se pueden desarrollar en una determinada área, en nuestro ámbito la cuenca hidrográfica.

Por esta compleja interrelación entre variables y factores junto a la singularidad de cada espacio, no existe una definición clara y concisa de la sequía, existen muchos términos para referirse a este fenómeno en función del enfoque de quien lo hace. En este sentido, podríamos clasificar las definiciones de sequía en dos grandes grupos: a) conceptuales; aquellas que pretenden describir el evento y sus características, b) operacionales; aquellas que tratan de identificar el principio, final y grado de severidad de una sequía, por lo que normalmente los resultados suelen ser de naturaleza cualitativa (Prats, 2006).

Una de las clasificaciones más comunes de la sequía es la propuesta por (Wilhite y Glantz, 1985) en su trabajo *“Understanding and Definition Drought”* en la que se definen cuatro tipos de sequía según el origen y sus efectos:

- **Sequía Meteorológica:** es aquella que se define por una falta de precipitación en una región durante un período de tiempo determinado. Suele señalarse como la primera indicadora del fenómeno.
- **Sequía Agrícola:** hace referencia al período caracterizado por una disminución de la humedad del suelo que afecta directamente al desarrollo de las plantas. En consecuencia, se produce una pérdida de la productividad de las cosechas. Las sequías agrícolas suelen producirse con retraso frente a las sequías meteorológicas, al depender la demanda de agua de las plantas de las condiciones meteorológicas imperantes.
- **Sequía Hidrológica:** se refiere a un período de insuficiencia de recursos hídricos superficiales y subsuperficiales en relación con la necesidad de satisfacer la demanda hídrica de un determinado sistema o cuenca hidrológica. La sequía hidrológica por tanto hace referencia a toda el agua que circula por el sistema hidrológico, por lo que suele presentar un desfase con la presencia de sequías meteorológicas. Puede persistir aunque la sequía meteorológica haya finalizado.
- **Sequía Socioeconómica:** se trata de la consecuencia de las anteriores, y se podría decir que ocurre cuando no se puede atender a la demanda



de un bien económico como consecuencia de un déficit en el abastecimiento de agua.

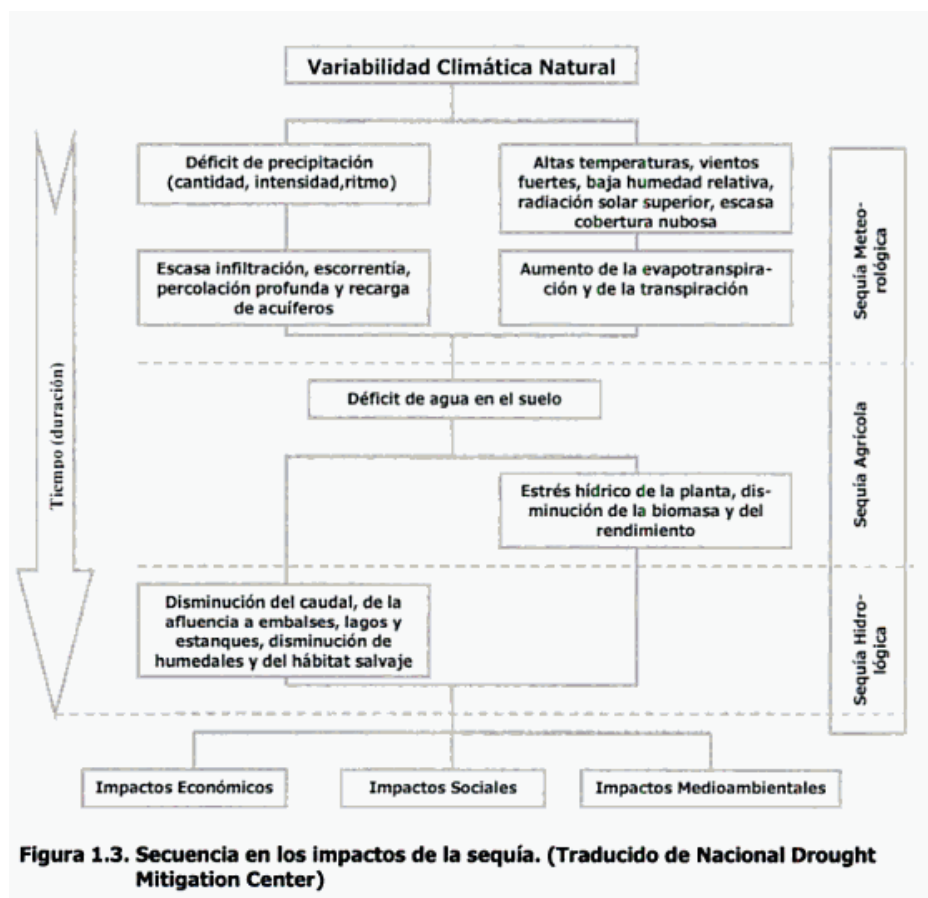


Figura 2.1 – Esquema de secuencia de impactos de la sequía tomado de (Prats, 2006).

Las consecuencias de las sequías son diversas y sobre todo afectan con mayor intensidad y con efecto más negativo sobre aquellos espacios en los que la precipitación anual es muy escasa, por ejemplo, en el caso de la Península Ibérica afecta de manera preocupante a aquellas regiones cuya precipitación anual no supera los 600 mm/año, especialmente en la mitad sur de España y en la costa mediterránea donde el grueso de precipitaciones se produce en un corto período de tiempo que suele abarcar entre tres y cinco meses del año (Aparicio Florido, 2007). Las consecuencias son fundamentalmente de carácter económico (pérdida de cosechas, reducción de la producción agrícola, incremento de las importaciones de alimentos y piensos, reducción de la producción de energía hidroeléctrica, etc.), sanitarias (aparición o reaparición de plagas, empleo de aguas residuales no depuradas para el regadío agrícola, disminución en la frecuencia e intensidad de la limpieza del viario público, etc.),

sociales (emigración de la mano de obra del campo, malnutrición y hambruna de las sociedades más deprimidas, recortes en el abastecimiento de agua potable a la población, etc.), medioambientales (incremento del riesgo de incendio de los espacios forestales, sobreexplotación de acuíferos, extracción abusiva de las aguas subterráneas y dificultad de recarga aparejada, pérdida de biodiversidad, mortandad de peces y otras especies acuícolas por la disminución de caudales, etc.).

## 2.2 Procesos asociados al funcionamiento de la escorrentía en una cuenca

Para entender cuáles son los procesos hidrológicos que rigen el funcionamiento de una cuenca es necesario hacer un breve repaso en las siguientes líneas sobre los factores que determinan el comportamiento de dicho sistema.

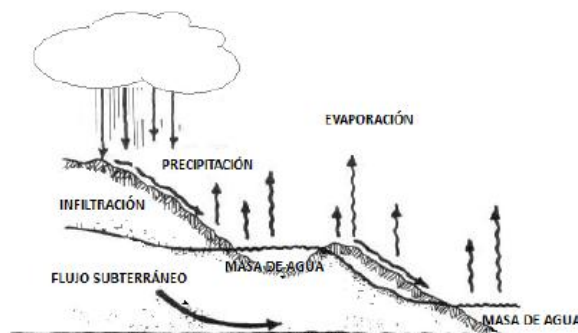
En primer lugar hay que recordar la diferencia que existe al hablar de cuenca, por un lado nos encontramos con el concepto de **cuenca hidrográfica** y por otro el de cuenca hidrológica. En el primero de los casos nos referimos a la definición geográfica de la misma, es decir a los límites de su contorno establecidos por la divisoria geográfica principal de las aguas de las precipitaciones, y en la que el agua termina drenando hacia un punto en común. De este modo una cuenca hidrográfica puede dividirse en 3 secciones:

- Cuenca alta: correspondiente a las áreas montañosas.
- Cuenca media: comprende las áreas formadas por piedemontes y valles de baja altura donde los ríos suelen poseer un cauce definido.
- Cuenca baja o zonas de transición: donde el cauce del curso del agua divaga o directamente acaba desapareciendo.

En el segundo de los casos, una **cuenca hidrológica** no solo incluye al conjunto de aguas superficiales sino que también hay que sumarle la estructura hidrogeológica subterránea formada por acuíferos. Por tanto se trata de un sistema formado por el conjunto de aguas que drenan hacia un mismo canal o cauce y que constituye una unidad hidrológica y geográfica bien definida en la que el agua entra a través de las precipitaciones y sale a través del flujo subterráneo en forma de escorrentía superficial (Limonés Rodríguez & Pita López, 2013).

Los procesos fundamentales que inciden en el funcionamiento de la esorrentía pueden verse en la siguiente figura:

FIGURA 2.1: Procesos fundamentales que intervienen en el ciclo hidrológico dentro de una cuenca.



FUENTE: Elaboración propia.

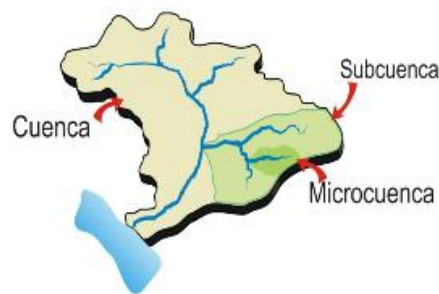
Figura 2.2 – Esquema de funcionamiento del ciclo hidrológico en una cuenca tomado de (Limonés Rodríguez & Pita López, 2013).

El principal proceso que rige el ciclo hidrológico es la entrada de precipitación (variable e impredecible) a la cuenca, su cuantificación es importante a la hora de evaluar los caudales de forma que se pondrá en relación con los valores de aportación. Otro proceso a destacar es la evapotranspiración (evaporación del agua del suelo y transpiración de las plantas) afectada por la radiación solar, el viento, la disponibilidad de agua en el suelo y la cobertura vegetal. Por otro lado, a través de la infiltración el agua penetra desde la superficie hacia el interior del suelo, por lo que las diferentes características del suelo y sustrato vegetal (usos, contenido de humedad...) afectaran a la intensidad con la que el agua se mueve (Limonés Rodríguez & Pita López, 2013).

Finalmente hay que destacar que todo el funcionamiento del ciclo hidrológico vendrá definido por las características de la cuenca, a su vez definidas por la topografía de la cuenca. De esta manera hay que tener en cuenta que:

- La pendiente de la cuenca originara que el agua discurra por las zonas de máxima pendiente, originando y formando una red ramificada de cursos fluviales y finalmente puntos de salida.
- La topografía determinará la forma y tamaño de la cuenca.

- A mayores pendientes habrá una reducción de los procesos de infiltración del agua en el suelo al acelerarse la escorrentía superficial, mientras que en zonas de menor pendiente los procesos de infiltración y retención serán los dominantes.
- La altitud será un condicionante de la homogeneidad de la pendiente de una cuenca, por lo que a priori, a mayores altitudes menor regularidad en los procesos de escorrentía y a la inversa.



**Figura 4.1.** Cuenca, subcuenca y microcuenca  
Fuente: Adaptado por Casaverde, 2011.

Figura 2.2 – Gráfico sobre cuenca, subcuenca y micro cuenca tomado de [http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf)

En este trabajo la escala de análisis es a nivel de subcuenca –conjunto de micro cuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente- por lo que hay que tener en cuenta los procesos y factores descritos anteriormente para relacionar posteriormente los resultados obtenidos con las características hidrológicas y morfológicas de las cuencas vertiente de estudio.

## 2.3 Los índices de sequía: SPI y SSI

Existen diferentes indicadores para valorar la sequía, en función de los cuales las características del fenómeno (intensidad, duración y frecuencia) puedan ser expresadas en términos cuantitativos. Según el uso dispuesto suele utilizarse uno u otro, y los datos que recogen hacen referencia a los datos de precipitación, nieve, caudales y otros indicadores asociados con el suministro de agua. Además, normalmente no se utiliza un solo indicador para caracterizar la sequía en una determinada zona.

Algunos de los **indicadores más utilizados para interpretar los períodos de sequía** y los períodos húmedos son:

- *Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI)*: utilizado para medir la pérdida de humedad del suelo y es adecuado su empleo en zonas con topografía uniforme.
- *Índice de Suministro de Agua Superficial (ISAS)*: complementa al anterior ya que el de Palmer no está diseñado para grandes variaciones topográficas y no considera el almacenamiento de nieve y su escorrentía.
- *Porcentaje de Precipitación Normal (PPN)*: calcula la relación que existe entre la precipitación acumulada en un año y la precipitación media anual, para una región y periodo dado, expresado en forma de porcentaje. La precipitación media anual se le conoce como precipitación normal.
- *Índice de Riesgo de Sequía (IRS)*: formado por las variables de temperatura media anual, estacionalidad pluviométrica, variabilidad y persistencia de sequía. Es utilizado para determinar la severidad y duración de la sequía.
- *Indicador de la Humedad del Cultivo (CMI)*: permite hacer un seguimiento semanal de las condiciones de los cultivos.
- *Potencial Agro-Hidrológico (AHP)*: permite conocer la demanda de agua de un determinado cultivo, a través de la relación entre evapotranspiración real y evapotranspiración óptima.

***Índice de Precipitación Estandarizada (SPI, Standardized Precipitation Index)***: se trata de un indicador basado en la probabilidad de lluvias en cualquier período de tiempo. El índice fue desarrollado en 1993 por McKee et al., para cuantificar el déficit de precipitaciones durante múltiples períodos de tiempo.

Las razones que motivan al uso de este índice son las críticas y problemas surgidos con la obtención de datos y procedimiento de cálculo de otros indicadores como el Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) dónde por ejemplo los parámetros necesarios para su cálculo son muchos, costosos de obtener y han sido calibrados tan sólo en los Estados Unidos, por lo que los resultados que arrojan normalmente no son comparables entre diferentes regiones geográficas (Lorenzo Lacruz, 2012). A esta disyuntiva también hay que añadir la limitación asociada a la monitorización de los períodos secos, restringida en el caso del PDSI a una escala temporal de 9 meses (Vicente-Serrano & López-Moreno, 2005), por lo que no se puede identificar sequías en escalas de tiempo más cortas.

En este sentido, el SPI ofrece ventajas tanto en su procedimiento de cálculo al requerir un menor número de variables como también en la evaluación de las condiciones acumuladas de déficit hídrico a distintas escalas temporales, convirtiéndolo en uno de los índices de sequía más utilizados en los últimos años a nivel global (Lorenzo Lacruz, 2012).

El Índice de Precipitación Estandarizada expresa un valor numérico que representa el número de desviaciones estándar de la precipitación caída a lo largo del período de acumulación que se trate, respecto de la media, una vez que la distribución original de la precipitación ha sido transformada a una distribución normal, de este modo se puede definir una escala de valores que se agrupa en tramos relacionados con el carácter de la precipitación ([http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia\\_clima/vigilancia\\_sequia/ayuda](http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/vigilancia_clima/vigilancia_sequia/ayuda)).

Los valores calculados que varían desde 2 (extremadamente húmedo) o más y -2 (extremadamente seco) se derivan de la relación entre la precipitación acumulada total para una determinada estación o región durante un intervalo

de tiempo específico (puede ser un mes, los últimos tres, seis, doce meses...) con el promedio de precipitación acumulada para dicha intervalo a lo largo de todo el periodo del registro climático.

Valores SPI:	Categoría de la sequía:
2.00 o más	Extremadamente húmedo
1.50 a 1.99	Muy húmedo
1.00 a 1.49	Moderadamente húmedo
-0.99 a 0.99	Casi normal
-1.00 a -1.49	Moderadamente seco
-1.50 a -1.99	Severamente seco
-2.00 o menos	Extremadamente seco

Figura 2.4 – Clasificación de los valores SPI tomados de ([http://www.cricyt.edu.ar/paleo/es/drought/drght\\_spi.html](http://www.cricyt.edu.ar/paleo/es/drought/drght_spi.html))

Cuando los valores varían entre un rango de 0.99 y -0.99 estamos hablando de condiciones normales, mientras que podemos hablar de períodos secos cuando el valor es inferior a -1, de modo que la sequía se prolongara en el tiempo hasta que el valor sea positivo. De esta forma, el sumatorio de todos los valores del SPI durante los meses de sequía constituye el indicador de la magnitud del fenómeno.

**Índice de Caudal Estandarizado (SSI, Standardized Streamflow Index):** se trata de un indicador de sequía hidrológico que permite monitorizar y cuantificar las sequías fluviales (las series de variables hidrológicas no suelen seguir una distribución normal...debiendo las series ajustarse a otras distribuciones de probabilidad para obtener valores estandarizados). De modo que, se encuentra basado en el ajuste de cada serie mensual de caudal a 6 distribuciones de probabilidad distintas (General de Valores Extremos, Pearson III, log-logística, lognormal, General de Pareto y Weibull), (Lorenzo Lacruz, 2012).



## **2.4 Estudios previos sobre el cambio climático e impacto sobre los recursos hídricos**

Diversos trabajos sobre la temática abordada en este Proyecto Fin de Grado se han ido desarrollando a lo largo de los últimos años, especialmente debido al aumento de la demanda de recursos hídricos por parte de la población. Por otro lado la recurrencia de la sequía en España en particular dentro del contexto de cambio climático global también ha contribuido a una mayor sensibilización social por este fenómeno. En consecuencia con el aumento del número de trabajos, especialmente desde finales de la década de los 90 en el siglo XX tras los impactos de dos períodos secos entre los años 80 y 90, por la escasez de lluvias que produjeron reducciones muy significativas en las escorrentías en las cuencas del Tajo, Guadiana, Guadalquivir...etc., tal como se recoge en el Libro Blanco del Agua, el desarrollo de bibliografía especializada así como la aplicación metodológica de diferentes indicadores se ha visto beneficiada.

Existen numerosos artículos desde un punto de vista cualitativo que tratan la temática conceptual y tipológica acerca de la sequía y los métodos de cuantificación como el de (Marcos Valiente, 2001) o bibliografía especializada acerca de las sequías; teoría y prácticas (Prats, 2006).

Artículos de investigación como el de (Vicente-Serrano & López-Moreno, 2005) con el análisis de la respuesta hidrológica a diferentes escalas de tiempo de sequía climatológica mediante el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) sobre la cuenca del río Aragón localizada en la parte central de los Pirineos españoles dónde se encuentra el embalse de Yesa (una zona que contempla una alta complejidad de procesos hidrológicos con una marcada variabilidad interanual y estacional) son un claro ejemplo del empleo de este tipo de indicadores para la cuantificación de la sequía en diferentes períodos. En dicho trabajo el objetivo es determinar cuál es la escala temporal para SPI más adecuada para monitorizar las sequías en fuentes utilizables de agua: descargas de los ríos y almacenes de depósito. Más reciente todavía es el artículo de (Vrochidou et al., 2013) donde se analiza el impacto del cambio

climático sobre las sequías hidrometeorológicas a una escala de cuenca hidrográfica.

En general hay que destacar el aumento del número de artículos relacionados con esta temática en revistas científicas tales como *Hydrology and Earth System Sciences*, *Journal of Hydrology* y *Global and Planetary Change*.

Otros trabajos de investigación en su carácter aplicado a tener en cuenta son el de (Lorenzo Lacruz, 2012) sobre las sequías hidrológicas en la Península Ibérica, una tesis académica que analiza de manera extensa el estado de la cuestión a escala peninsular, y donde se estudia la variabilidad espacial y temporal de las sequías hidrológicas. En este trabajo se concluye que existe un descenso en los caudales de los ríos y que cada vez más las sequías hidrológicas que sufre la Península Ibérica amenazan al sostenimiento de los usos y aprovechamiento de los recursos hídricos. Pasando a una escala más regional también se encuentra la tesis de (Limonés Rodríguez & Pita López, 2013) que hace un estudio sobre la sequía hidrológica en el mediterráneo español a través de una metodología caracterizada por la aplicación del Índice Estandarizado de Sequía Pluviométrica (IESP) a las aportaciones hídricas.

De manera general, a escala nacional el documento más importante relacionado con la temática hidrológica atañe al documento nombrado anteriormente “El Libro Blanco del Agua” publicado por el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se procede a describir y justificar de forma general el área de estudio seleccionada, que en este caso se trata de varias cuencas hidrológicas pertenecientes a los Pirineos. De cada una de las cuencas estudiadas se analizan diversos factores que pueden incidir de forma notable en el contexto de las sequías y los procesos hidrológicos.

#### 3.1 Descripción y justificación de la selección

La zona de estudio seleccionada comprende un conjunto de diez cuencas de estudio repartidas a lo largo de los Pirineos. De forma general los Pirineos constituyen una cadena montañosa con una anchura máxima de 150 kms en su tramo central que se extiende de este a oeste. En esta cadena montañosa se perciben dos amplias zonas: las denominadas llanuras de Aquitania y Languedoc-Rosellón abiertas al Atlántico y al Mediterráneo -vertiente norte- y por otro lado la vertiente sur asociada a la depresión del Ebro. En este último caso, la vertiente no conecta directamente con ningún mar sino que se encuentra separada de las costas por dos cadenas montañosas prelitorales: los Montes Vascos y Cordillera Cantábrica en el extremo occidental y la Cordillera Costero-Catalana en el extremo oriental (Ibarra Benlloch, 2002a).

Código Estación	Cuenca
9018	ARAGÓN EN JACA
9021	SEGRE EN PUIGCERDÁ
9040	ARA EN BOLTAÑA
9066	IRATI EN ARIVE
O0105110	LA NESTE DE CAP DE LONG L ARAGNOUET
O0126210	LA NESTE DE RIOUMAJOU L TRAMEZAIGUES
O0362510	LE SALAT L SOUEIX-ROGALLE [KERCABANAC]
Q6332510	LE GAVE D'ASPE Ó BEDOUS
Q9164610	LA NIVE DES ALDUDES Ó SAINT-ÉTIENNE-DE-BAIGORRY
Y1012010	L'AUDE L PUYVALADOR

Las cuencas hidrológicas seleccionadas son por la parte española las siguientes: el río Segre en Puigcerdá, el río Irati en Arive, el río Ara en Boltaña y el río Aragón en Jaca. Por otro lado, en la parte francesa se han seleccionado: La Nive des Aldudes à Saint-Étienne-de-Baigorry, Le Gave d'aspe à Bedous, La Neste de Rioumajou à Tramezaïgues, La Neste de Cap de

Long à Aragnouet, L'aude à Puyvalador, Le Salat à Soueix-Rogalle [kercabanac].

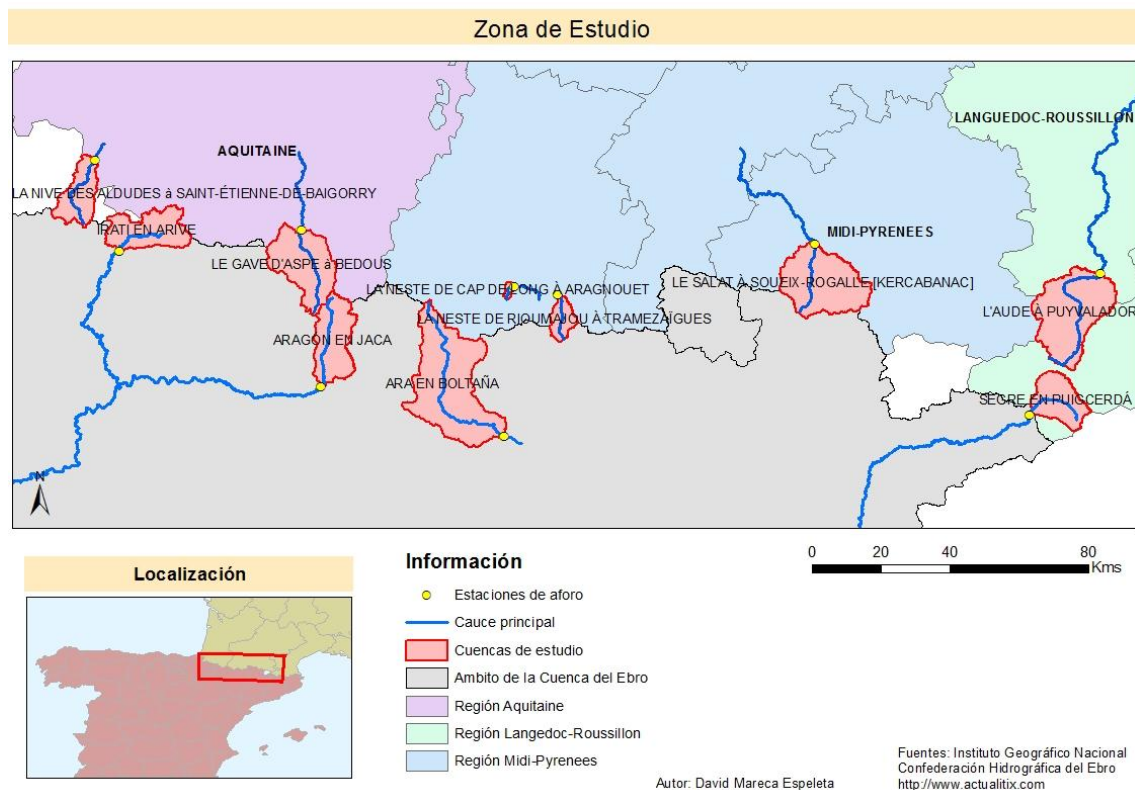


Figura 3.1 – Cuencas de estudio y su distribución por la cordillera de los Pirineos.

Como podemos observar a la vista de la figura anterior, las cuencas seleccionadas siguen un criterio de distribución regular a lo largo de los Pirineos. De forma aproximada podríamos considerar la presencia de 4 cuencas en la parte occidental pirenaica, otras 4 en la parte central y las 2 últimas en la parte más oriental hacia la región del Languedoc-Rousillon. Esta localización de las cuencas de estudio es importante a la hora de facilitar el análisis espaciotemporal de los factores y procesos que inciden en el comportamiento hidrológico así como también a la posible extracción de patrones espaciales determinados.

Las estaciones de aforo seleccionadas como hemos comentado se encuentran asociadas a las cuencas de los ríos Segre, Irati, Ara, Aragón dentro de las fronteras del estado español, mientras que al otro lado de la frontera se encuentran las de las cuencas pertenecientes a los ríos La Nive, Le Gave D'Aspe, el Neste de Rioumajou, La Neste de Cap de Long, el Aude y el Salat.

Las estaciones de aforo seleccionadas se eligieron teniendo en cuenta *dos criterios*:

- 1) Que no estuvieran reguladas por gestión hidrológica (presencia de embalses, presas o pantanos) aguas arriba del cauce principal, a fin de mantener el régimen natural de los cauces.
- 2) Que el porcentaje de años completos en cuanto aportaciones mensuales fuera lo suficientemente completo (> 80%), por lo que todas las estaciones de aforo señaladas se localizan en las cabeceras de los cauces nombrados, a fin de cumplir el primero de los criterios.

### **La cuenca del Nive des Aldudes à Saint-Étienne-de-Baigorry**

La subcuenca del río Nive en el valle de los Aldudes a la altura del término municipal de Saint-Étienne-de-Baigorry y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 160 km<sup>2</sup>, una altitud media de 670 metros y una pendiente media del 14,5%. La zona de cuenca analizada se encuentra en pleno dominio de los Pirineos Atlánticos, en su parte más occidental de forma que se asienta sobre la llanura de Aquitania al suroeste de Francia, el total de la superficie entera de la cuenca alcanza los 200 km<sup>2</sup>.

El curso pirenaico del Nive, afluente del río Nive, en el valle de Aldudes posee una longitud de 33,6 km, y lo convierte en un afluente del río Nive que nace en territorio navarro. Concretamente el río Nive des Aldudes nace a los pies del monte Mendi Haundia (1.232 metros) en Navarra, a partir de ahí el cauce se fortalece de las aguas procedentes a los pies de la cima del Harriondokoa kaskoa (841 metros), a partir de allí el cauce fluye en dirección norte hacia el valle de Baigorry para converger en el río Nive a la altura de Saint-Martin-d'Arrossa (110 metros).

La estación de aforo seleccionada es la de la corriente del Nive des Aldudes, que se localiza a una altitud de 144 metros en la zona baja del cauce fluvial.

### **La cuenca del Irati en Arive**

La subcuenca del río Irati a la altura de la población de Arive (provincia de Navarra) y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 236 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.099 metros y una pendiente media del 13%. La zona de cuenca analizada se localiza en el límite septentrional de la cuenca del Ebro limitando al norte con territorio francés, al este y sur con las subcuencas del río Aragón y al oeste con la subcuenca del río Arga, en este sentido la superficie entera de la cuenca del Irati se extiende hasta los 1.561 km<sup>2</sup>.

El río Irati es el principal afluente del río Aragón, posee una longitud de 88 km. Su nacimiento se localiza en el Pirineo Navarro Oriental a una altitud aproximada de 1.344 metros, en la confluencia de los ríos Urtxuria y Urbeltza en la Selva del Irati, y es allí donde el cauce recorre valles pirenaicos hasta llevar sus caudales al río Aragón aguas abajo de la localidad de Liéneda. En los primeros kilómetros de su recorrido su trazado tiene una marcada dirección este-oeste para posteriormente tras superar el embalse de Irabia (855 msnm) a un trazado con orientación norte-sur. En cuanto a sus usos, se trata de un río que ha sido usado para el aprovechamiento hidroeléctrico así se distingue por la presencia a lo largo de su recorrido de tubos, saltos, tuberías, canales y centrales. En general, la progresiva antropización de la cuenca se refleja en la creciente actividad agrícola conforme se desciende hacia zonas bajas de la cuenca. Las zonas de cabecera presentan extensas zonas boscosas y zonas ganaderas de pastos de montaña.

La estación de aforo seleccionada es la de la corriente del Irati en Arive, se localiza a una altitud de 700 metros en la cabecera del cauce aunque aguas abajo del embalse de Irabia por lo que el régimen de caudales se encuentra alterado, sin embargo se ha considerado que los cambios inducidos por la presencia del embalse no suponen un cambio abrupto en las series de caudal al tratarse de un embalse construido en la década de 1920 y comenzar nuestro periodo temporal en 1950, a lo que hay que sumar también que se trata de un embalse de pequeña capacidad 14 hm<sup>3</sup>.

### **La cuenca del Gave d'aspe à Bedous**

La subcuenca del río Le Gave d'aspe a la altura de la población de Bedous y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 425 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.443 metros y una pendiente media del 21%. La zona de cuenca analizada se localiza en la vertiente opuesta al pirineo Aragonés situada en los Pirineos Atlánticos a lo largo del Valle de Aspe, uno de los tres valles principales que forman el denominado Bearn.

El río Gave d'Aspe tiene una longitud de 57 km y es de importante carácter torrencial. Su nacimiento se produce dentro de las fronteras españolas a una altitud de 2.643 metros en el glaciar de Aspe (Pico de la Garganta de Aísa) (Huesca). Después se une a las aguas del río Ossau y forma el río Olorón. El río posee diversos afluentes a lo largo de su recorrido, y especialmente se trata de un río muy apreciado para la práctica deportiva de la pesca.

La estación de aforo seleccionada se encuentra formando parte del tramo bajo del cauce, a una altitud aproximada de 311 metros.

### **La cuenca del Aragón en Jaca**

La subcuenca del río Aragón a la altura de la población de Jaca (provincia de Huesca) y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 238 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.575 metros y una pendiente media del 18%. La zona de cuenca analizada se localiza en la parte septentrional del Pirineo Aragonés. La superficie total de la cuenca de este río alcanza los 8.521 km<sup>2</sup>.

El río Aragón, uno de los principales afluentes del río Ebro (aporta una media de 1.300 hm<sup>3</sup>/año), posee una longitud aproximada de 190 km. Su nacimiento se produce en el circo glaciar del valle de Astún a unos 2.050 metros de altitud. Allí en su cabecera se nutre de los ibones de Escalar y Truchas. Con una orientación inicial hacia el sur desde su nacimiento hasta Jaca, el cauce toma una dirección este-oeste a través del Canal de Berdún hasta el embalse de Yesa, cuyas aguas son trasvasadas a la Comarca de Cinco Villas con fines

agrícolas relacionados con el cultivo de regadío. Tras cruzar el embalse, su dirección es marcadamente suroeste donde recibe aguas del río Iratí que a su vez recibe aportaciones del Erro, Urrobi, Salazar y Areta. Posteriormente y hasta su final en la desembocadura, recibe influencias del Cidacos y el Onsella, aunque la principal aportación es la recibida por las aguas del Arga.

Geográficamente en la cuenca del Aragón podemos distinguir 3 zonas según la geografía y otras características:

- a) zona norte de la cuenca que presenta las mayores altitudes (especialmente hacia el este), donde los cauces de los ríos presentan las mayores pendientes y dónde más precipitación se registra.
- b) zona media de la cuenca donde los cursos de los ríos se encuentran por encima de los 400 metros, las pendientes son menores que en el caso anterior.
- c) zona sur de la cuenca en la que los cursos de los ríos se encuentran a valores de altitud inferiores a los 400 metros, el relieve es más llano y la circulación del agua presenta un movimiento más lento.

La estación de aforo seleccionada se encuentra formando parte de la zona norte y media de la cuenca, a una altitud aproximada de 793 metros.

### **La cuenca del Ara en Boltaña**

La subcuenca del río Ara a la altura de la población de Boltaña (provincia de Huesca) y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 626 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.498 metros y una pendiente media del 18,8%. La cuenca del Ara se localiza en la parte central del Pirineo Aragonés, en la zona más septentrional del territorio. El total de la cuenca del Ara alcanza una superficie aproximada de 718 km<sup>2</sup>.

El río Ara con una longitud aproximada de 69,5 km, nace en la vertiente sur de los Pirineos en falda sur del macizo del Viñamala a una altitud de 3.298 metros. 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). En su recorrido, el principal afluente es el río Arazas, y especialmente hay que destacar que se trata de un río no regulado.

La estación de aforo seleccionada forma parte de la zona baja de la cuenca de estudio a una altitud aproximada de 680 metros.

### **La cuenca del Neste de Cap de Long à Aragnouet**

La subcuenca del río Neste a la altura de la población de Aragnouet y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 5 km<sup>2</sup>, una altitud media de 2.561 metros y una pendiente media del 21%. La zona de cuenca analizada se localiza en la denominada área de los Altos Pirineos, en la vertiente francesa del Pirineo al sur de Francia, en su totalidad la cuenca alcanza cerca de los 900 km<sup>2</sup>.

El río Neste posee una longitud de 73 km, es afluente por la izquierda del río Garona. Nace al suroeste de Francia cerca del Parque Nacional de los Pirineos a una altitud cercana a los 2.570 metros.

La estación de aforo seleccionada forma parte de la zona baja de la cuenca de estudio a una altitud aproximada de 2.182 metros.

### **La cuenca del Neste de Rioumajou à Tramezaïgues**

Al igual que en el caso anterior, se trata del cauce del río Neste al suroeste de Francia, éste se sitúa en el valle de Rioumajou afluente de la margen derecha del río Neste d'Aure. Nuestra estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 63,7 km<sup>2</sup>, una altitud media de 2.300 metros y una pendiente media del 18%. La zona de cuenca analizada se localiza igual que en el caso anterior sobre la región de los Altos Pirineos al sur de Francia, algo más hacia la parte oriental de los Pirineos.

El curso del río Neste de Rioumajou alcanza una longitud de 15,3 km, con nacimiento cerca del municipio de Saint-Lary-Soulan a una altitud aproximada de 2.600 metros. A lo largo de su curso se reconocen hasta nueve afluentes.

La estación de aforo seleccionada se localiza a una altitud de 1.055 metros.

### **La cuenca del Salat à Soueix-Rogalle**

La subcuenca del río Salat a la altura de la población de Soueix-Rogalle y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 379 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.326 metros y una pendiente media del 20%. La zona de cuenca analizada se localiza hacia el extremo oriental de los Pirineos, al sur de Francia, en total la cuenca drena una superficie aproximada de 1.570 km<sup>2</sup>.

El río Salat afluente del río Garona con una longitud de 74 km, nace de las aguas procedentes de nueve fuentes diferentes del macizo del monte Valier y discurre por los departamentos franceses de Ariège y Garona. Sus principales afluentes son los ríos Alet, Garbet, Arac, Lez, Baup y Arbas.

La estación de aforo seleccionada se localiza a una altitud de 464 metros.

### **La cuenca del río Aude en Puyvalador**

La subcuenca del río Aude a la altura de la población de Puyvalador y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 134 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.535 metros y una pendiente media del 13%. La zona de cuenca analizada se localiza en el extremo oriental del sur de Francia sobre la región del Languedoc-Rosellón, en total la superficie de la cuenca se extiende hasta los 5.300 km<sup>2</sup>.

El río Aude con una longitud de 224 km, nace a 2.185 metros en los Pirineos franceses en la comarca del Capcir. Su recorrido es diverso y partiendo del departamento de los Pirineos Orientales fluye hacia otros departamentos como el de Aude y el Hérault. Hasta Limoux su cauce discurre entre montañas, finalmente desemboca en el mar mediterráneo muy próximo al Golfo de León. Algunos de sus principales afluentes son los ríos Bruyante, Rebenti, Corneilla, Sou, Lauquet, Fresquel...etc.

La estación de aforo seleccionada se localiza a una altitud de 1.391 metros.

### **La cuenca del Segre en Puigcerdà**

La subcuenca del río Segre a la altura de la población de Puigcerdà (provincia de Girona) y hasta la estación de aforo seleccionada posee una extensión aproximada de 297 km<sup>2</sup>, una altitud media de 1.735 metros y una pendiente media de 11,5%. La zona de cuenca analizada se localiza en el extremo nororiental de la cuenca del Ebro, teniendo en cuenta el total de la superficie de la cuenca del río Segre, ésta llega a alcanzar los 22.579 km<sup>2</sup>.

El río Segre con 265 km de longitud, nace en Francia entorno a los 2.400 y 2.500 metros aproximadamente, concretamente en la margen izquierda del valle de la Cerdaña francesa (ladera norte del Puigmale). Su entrada en territorio español la realiza por el municipio de Llívia (Girona) y retorna finalmente a Francia para regresar a España con una marcada orientación noroeste en Puigcerdà a una cota de 1.130 metros. Posteriormente, su cauce sigue una orientación descendente hasta la Seu d'Urgell y en el Urgellet vira hacia el sur hasta el embalse de Rialp; una vez allí el curso del río llega a la desembocadura del río Noguera Pallaresa y el embalse de San Lorenzo donde se orienta hacia el oeste para continuar descendiendo hasta su desembocadura en el Ebro, concretamente en el embalse de Ribarroja.

Por su largo recorrido y los diferentes espacios que atraviesa desde un punto de vista geográfico e hidrológico, la cuenca del Segre en su conjunto puede dividirse en tres tramos: el Alto Segre (desde su nacimiento hasta el embalse de Oliana), el Segre Medio (hasta la confluencia del Noguera Pallaresa aguas arriba del embalse de San Lorenzo) y el Bajo Segre (desde el embalse de San Lorenzo hasta su desembocadura). En sentido, el cauce del Segre recibe numerosos afluentes, entre los que destacan el Valira, Valltoba, la Llosa, Quer, Noguera Pallaresa, Noguera Ribagorçana y el Cinca.

En nuestro caso, la estación de aforo seleccionada es la de la corriente del Segre en Puigcerdà, que se localiza a una altitud de 1.120 metros en la cabecera del cauce (Alto Segre; una zona de alta montaña localizada entre los Pirineos y la Sierra del Cadí).

## 3.2 Caracterización de la zona

En este subcapítulo se procede a analizar de forma específica cada una de las cuencas descritas anteriormente. Se describe el comportamiento de diversos factores naturales tales como las precipitaciones y las temperaturas, así como las variables más importantes relacionadas con la morfología de cada una de las cuencas: altitud, área, forma de la cuenca, pendiente del relieve. Además, también se analiza la cubierta vegetal y de usos dominante en cada cuenca.

### 3.2.1 Factores y comportamiento estacional

Desde el punto de vista climático los Pirineos no son un espacio homogéneo, la diferente combinación de factores como el relieve, la altitud o latitud entre otros, van a condicionar la influencia de las masas de aire y por tanto el régimen de precipitaciones y de temperaturas existente.

En primer lugar la **posición latitudinal** (entre 42° y 43° de latitud norte) implica, desde el punto de vista térmico, la existencia de estaciones térmicas así como un contraste térmico importante entre las laderas orientadas al norte (umbrías), más frías al recibir menos horas de sol, y las laderas orientadas al sur (solanas), más cálidas y con menos riesgo de heladas (Ibarra Benlloch, 2002b).

En cuanto a las **precipitaciones**, el Pirineo queda bajo el influjo del Frente Polar y los vientos del oeste que aportan la mayor parte de las precipitaciones que reciben los sectores occidental y central. Los frentes mediterráneos afectan al Pirineo oriental esporádicamente. El influjo desecante del Anticiclón de las Azores que afecta a la Península Ibérica y marca el clima Mediterráneo, especialmente en los meses de verano, es patente en el Prepirineo meridional y responsable en parte de la menor pluviometría de esta zona, de la existencia de un periodo seco en algunas zonas más bajas y del carácter árido de la Depresión del Ebro (Ibarra Benlloch, 2002b).

La presencia de la cadena montañosa entre el Océano Atlántico y el mar Mediterráneo a lo largo del territorio tiene consecuencias sobre el comportamiento térmico y pluviométrico de los diferentes sectores que componen el Pirineo.

Por un lado la influencia oceánica es patente en la vertiente norte, mientras que en el sector oriental hace lo propio la influencia del Mediterráneo. En este sentido se produce una mayor abundancia de precipitaciones entorno a la vertiente septentrional y los sectores occidental y central respectivamente. En el caso contrario, la vertiente sur se caracteriza por una menor influencia marítima debido a la presencia de barreras de relieve tanto por el oeste (Cordillera Cantábrica) como por el este (Cadena Pre-litoral Catalana). Esto se traduce en una mayor continentalización que se incrementa desde el sector central hasta los extremos originando de esta forma **temperaturas** más acusadas entre los meses de invierno y verano. A su vez, las barreras de relieve nombradas impiden el paso de las masas de aire y en consecuencia que se produzca un menor volumen de precipitaciones (Ibarra Benlloch, 2002b).

Junto a lo comentado anteriormente hay que sumar el efecto de la altitud como modificador del restante de las variables climáticas, al hacer ascender las masas de aire, en general la precipitación suele ser más abundante en las partes altas que en las bajas.

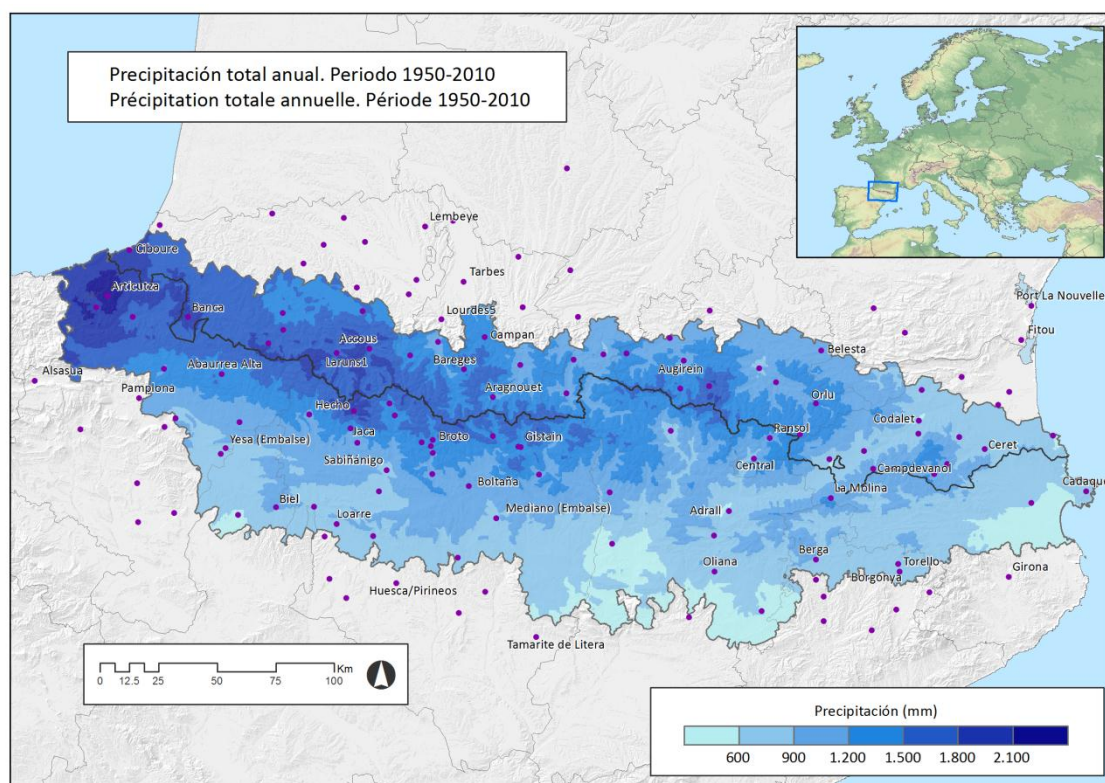


Figura 3.1 – Mapa de precipitaciones en Pirineos tomado de Cuadrat et al 2014. Clima del Pirineo. Observatorio Pirenaico del Cambio Climático. CTP.

Como se observa en la figura anterior, el sector occidental atlántico por proximidad a los vientos húmedos que penetran por el oeste es el sector más lluvioso. Dicha pluviosidad se prolonga por la vertiente norte y por el Alto Pirineo central dónde se alcanza precipitaciones anuales superiores a los 1.500 mm. El extremo oriental es también una zona excepcionalmente húmeda (más de 1.000 mm) por la influencia de las masas procedentes del mar Mediterráneo. En el resto, formado por el Prepirineo meridional próxima a la Depresión del Ebro y sectores orientales las precipitaciones se encuentran por debajo de los 800 mm y en ciertas áreas la pluviosidad es inferior a los 600 mm anuales (Ibarra Benlloch, 2002b).

## 3.2.2 Morfología de la cuenca

### La superficie (área)

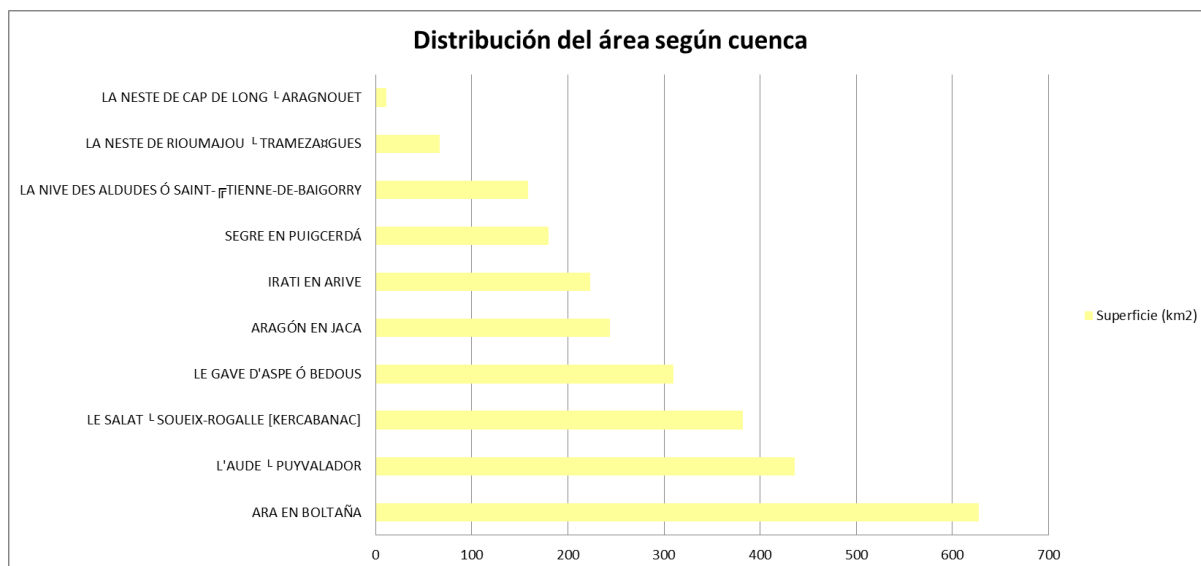


Figura 3.2 – Gráfico de columnas que muestra la distribución del área de cada cuenca

En cuanto a la distribución de la superficie de las cuencas, se presenta las mayores áreas en kilómetros cuadrados para las cuencas de los ríos Ara, Aude Salat y Gave, todas las cuencas nombradas poseen una superficie superior a los 300 km<sup>2</sup>. Por el contrario las cuencas con menor extensión (inferior a 100 km<sup>2</sup>) son las del río Neste. Con valores intermedios (entre 100 y 300 km<sup>2</sup>) se encuentran las cuencas de los ríos La Nive, Segre, Irati y Aragón.

## La altitud

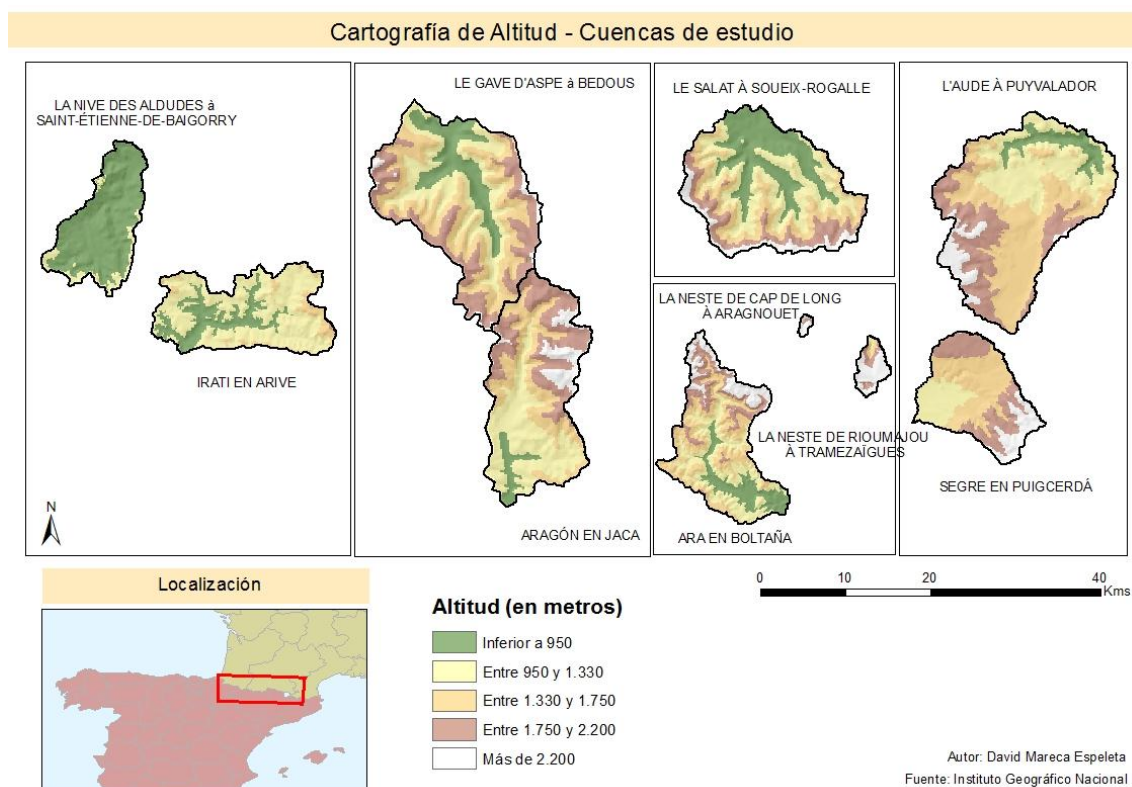


Figura 3.3 – Cartografía de Altitud de la zona de estudio

La cartografía de la variable altitud respecto a las cuencas analizadas nos da buena muestra de la morfología de la cuenca, en concreto observamos un predominio de la alta montaña superior a 1.330 metros en las cuencas asociadas a la parte central de la cordillera, que aglutina la región occidental francesa de Aquitania, la mayor parte de la región Mediodía-Pirineos (Midi-Pyrénées) y la parte más oriental del Languedoc-Roussillon, éste último constituye el sector oriental mediterráneo que comprende los relieves al este del eje del Aude al Norte y del Segre al sur. Por el contrario se distingue un predominio de la menor altitud, inferior a 1.330 metros, en cuencas como la del Irati y la Nive des Aldudes asociadas al sector occidental atlántico, zona de transición entre el Alto Pirineo y la alta montaña Cantábrica. En esta zona hay un predominio de los relieves de montaña media, en la que sus cumbres apenas superan los 1.500 metros (Ibarra Benlloch, 2002a).



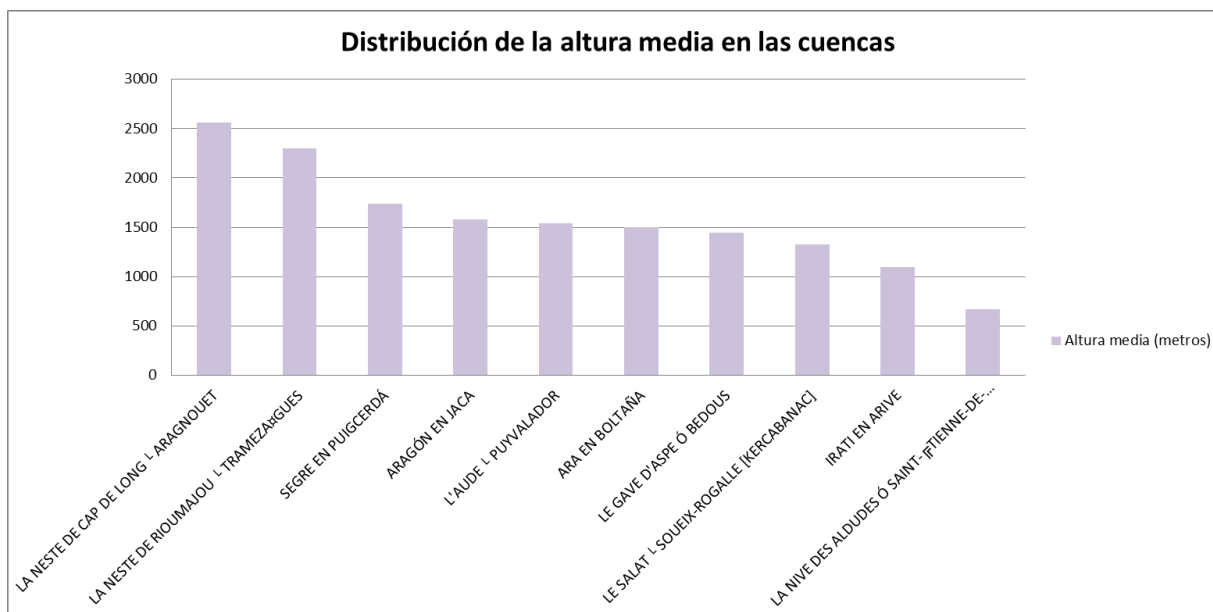


Figura 3.4 – Gráfico de columnas que muestra la distribución de la pendiente media en cada una de las cuencas.

Los mayores valores de altitud media (superior a 1.500 metros) se registran en las cinco cuencas siguientes: La Neste de Cap de Long à Aragnouet, La Neste de Rioumajou à Tramezaïgues, Segre en Puigcerdà, Aragón en Jaca y L'aude à Puyvalador. Por el contrario, los menores valores de altitud media los encontramos en las cuencas más occidentales de la zona de estudio, fundamentalmente en la cuenca del Irati, y sobre todo en la del la Nive des Aldudes con una altitud media bastante baja, apenas supera los 700 metros.

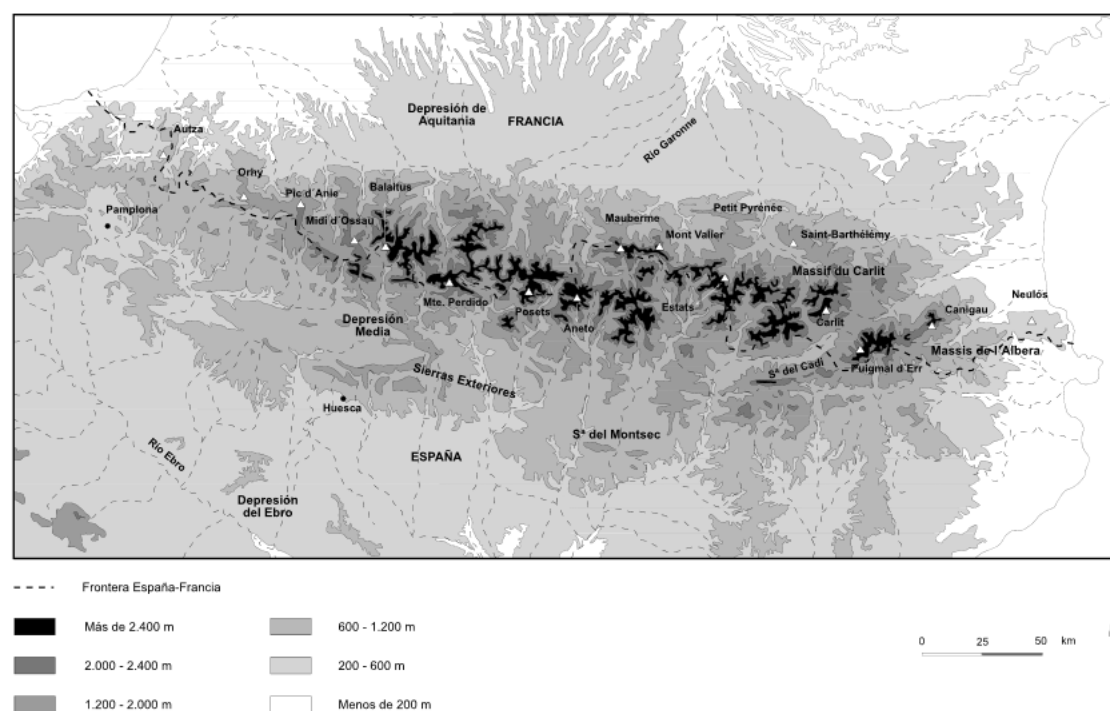


Figura 3.5 – Mapa de altimetría de los Pirineos tomado de (Ibarra Benlloch, 2002a).

En la figura anterior se muestra de forma clara la altimetría de los Pirineos, podemos observar como gran parte de las cuencas de estudio analizadas se encuentran localizadas en espacios con una altitud superior a los 2.000 metros (Alto Pirineo), aquellas cuencas que presentan altitudes medias muy inferiores a estos valores, vinculadas a zonas pre pirenaicas, forman parte de depresiones donde el relieve es mucho más suave. En este sentido, hay que destacar la cuenca del río Nive de Aldudes en la vertiente atlántica.

## La pendiente

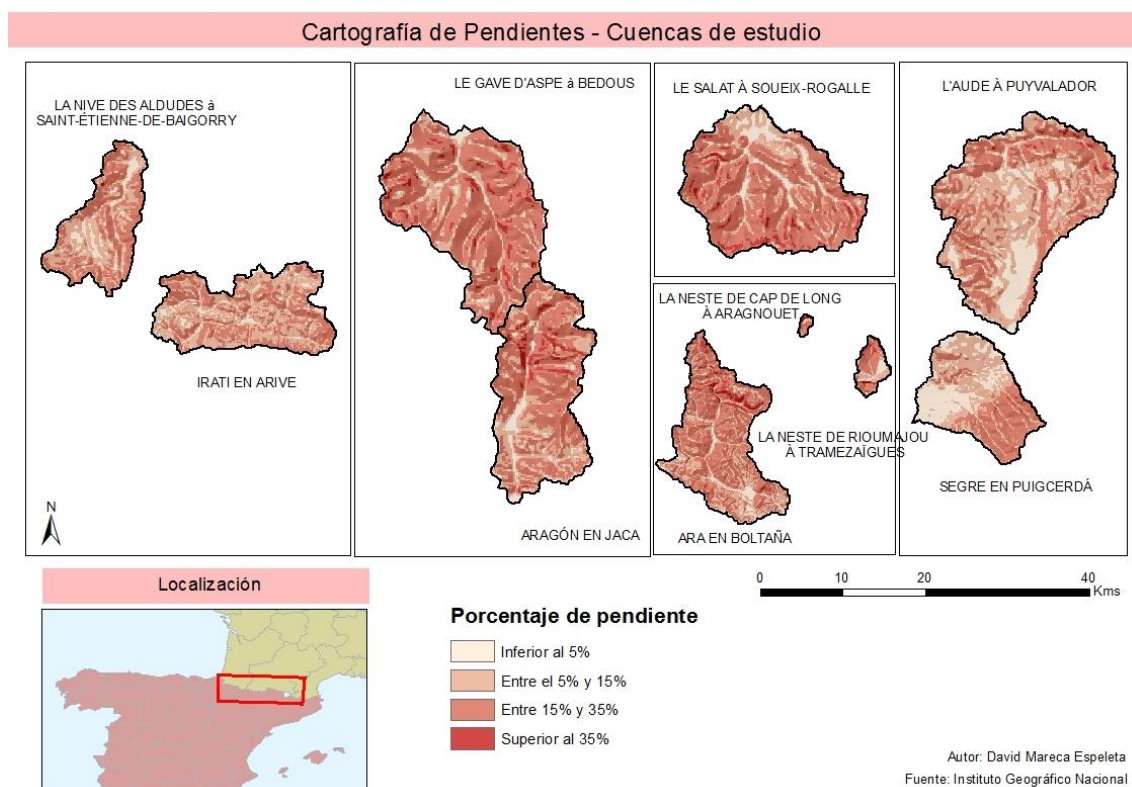


Figura 3.6 – Cartografía de Pendientes de la zona de estudio

La cartografía asociada a la variable de porcentaje de pendiente -figura 3.6- nos permite distinguir entre pendiente baja (inferior al 5%), medio-baja (entre el 5% y el 15%), medio-alta (entre el 15% y el 35%) y alta (superior al 35%). Como se puede observar, las zonas con pendiente baja y medio bajo son las atribuidas a los cursos fluviales, mientras que las zonas de pendiente medio alta están directamente relacionadas con las formas abruptas y de mayor altitud.

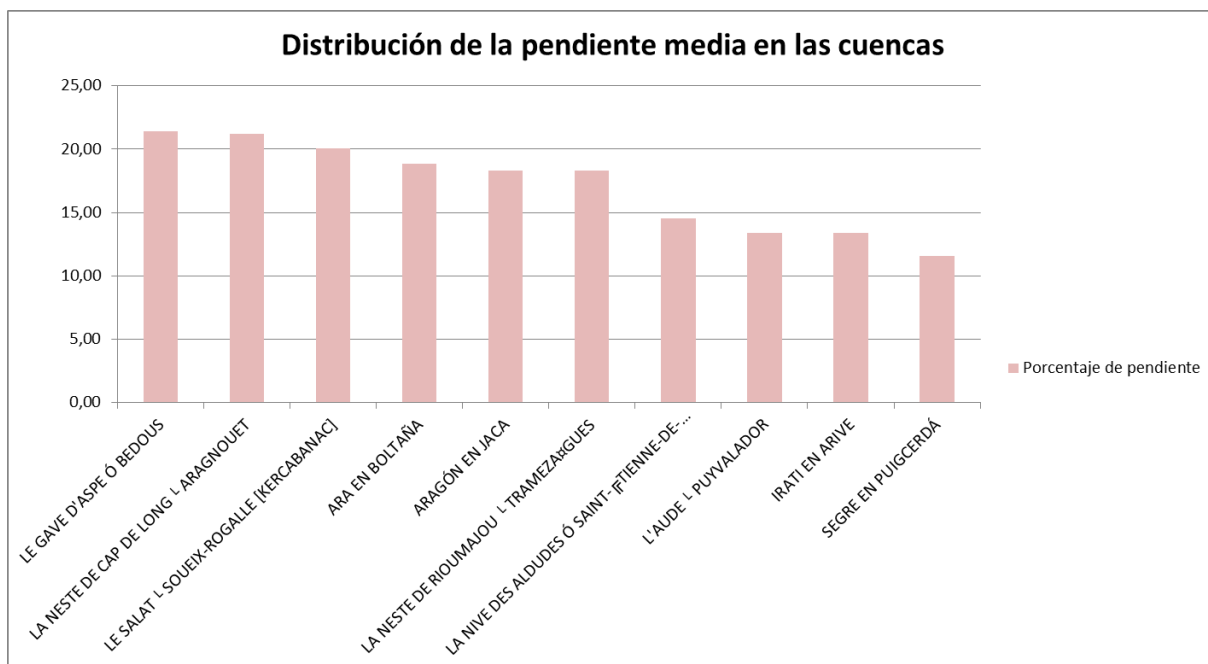


Figura 3.7 – Gráfico de columnas que muestra la distribución de la pendiente media en cada una de las cuencas.

Los mayores valores de pendiente media (superior al 18%) se registran en las cuencas de Le Gave d'aspe à Bedous, La Neste de Cap de Long à Aragnouet, La Neste de Rioumajou à Tramezaïgues, Le Salat à Soueix-Rogalle [kercabanac], el Ara en Boltaña y Aragón en Jaca.

Las seis cuencas se encuentran situadas en torno a la zona central del Pirineo donde se registran las mayores altitudes de la cordillera al coincidir con la alta montaña desde el Pic d'Anie (2.507 metros) al Canigó (2.784 metros) a lo largo de unos 280 km. Se trata de una zona en la que dominan los relieves abruptos que constituyen paisajes espectaculares de alta montaña, en los que aparecen circos glaciares, crestas, paredones rocosos, laderas de fuertes pendientes con pedrizas y roquedo desnudo, cañones encajados (Ibarra Benlloch, 2002a), etc.

### 3.2.3 Usos del suelo y vegetación

Los usos predominantes de suelo y la cobertura vegetal presente en nuestras cuencas de estudio van a condicionar los diferentes procesos hidrológicos (intercepción, evapotranspiración, infiltración y generación de escorrentía) y por tanto pueden traducirse en cambios en la evolución de los caudales analizados al inducirse métodos de gestión y control en su comportamiento que incluyen en ocasiones tareas de regulación, especialmente delicadas si son producidas en las cabeceras de los cauces.

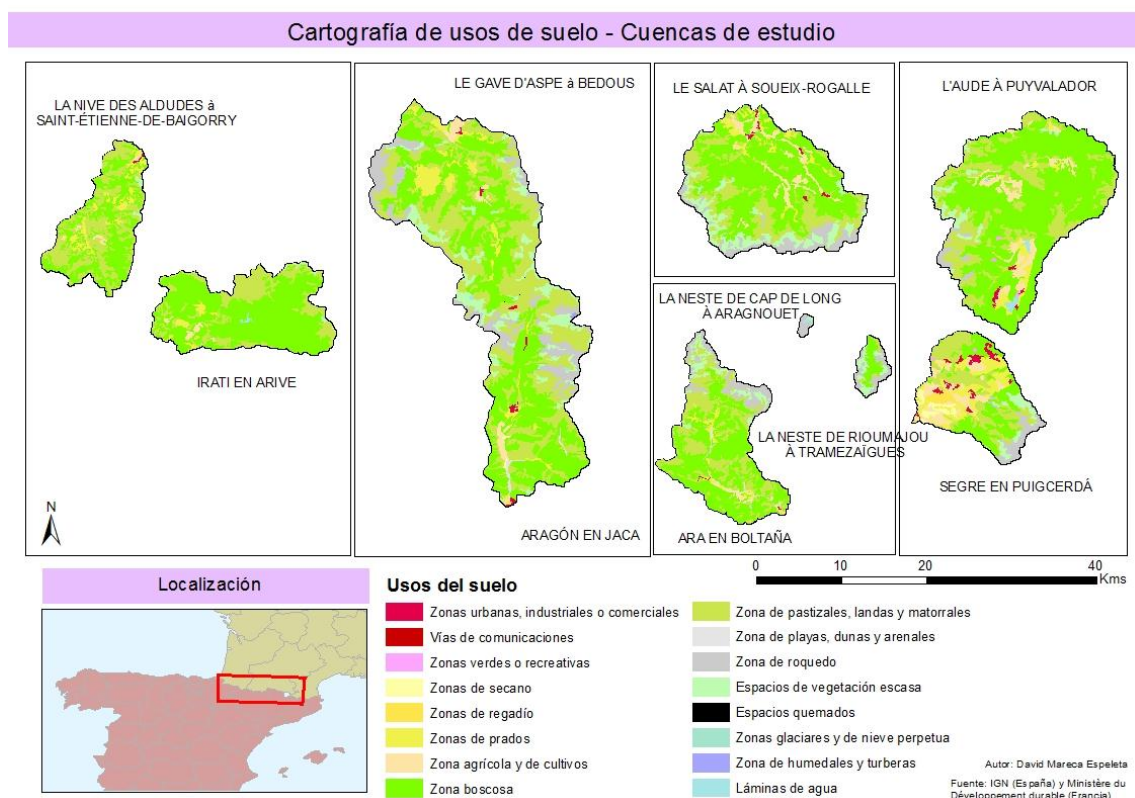


Figura 3.8 – Cartografía de usos de suelo de la zona de estudio

En la figura anterior se observa un predominio de los usos de suelo vinculados a zonas boscosas que incluyen bosques de frondosas, coníferas así como bosques mixtos, a lo que también hay que añadir la presencia de extensos espacios de prados y pastizales. Este conglomerado de usos y cubiertas vegetales es propio de las zonas de alta montaña como es nuestro caso.

Particularizando en cada una de las cuencas, en la parte más occidental, en cuencas como el Irati y la Nive des Aldudes encontramos predominantemente esa área de espacios boscosos con presencia también de pastizales. A medida que

nos trasladamos hacia la parte central pirenaica (zona axial) y la altitud media de las unidades de relieve aumentan, encontramos la presencia de grandes espacios de roquedo, así se puede distinguir en las cuencas asociadas a los ríos Le Gave D'Aspe, el Aragón, Lé Salat, La neste de Cap de Long, el Ara y la Neste de Riomajou. Juntos a estas zonas rocosas, aparecen como no puede ser de otra forma espacios de vegetación escasa.

Especialmente notables son los usos del suelo en la cuenca del Segre en los que se presenta una fuerte presión sobre el recurso hídrico para satisfacer las demandas agrícolas, si bien presenta la mayor altitud media de las cuencas españolas analizadas, se presenta en dicha cuenca un predominio de usos asociados a la producción agrícola con gran extensión de zonas agrícolas y cultivos, especialmente en toda la parte occidental de la cuenca. Por otro lado, en la parte más oriental y donde mayores altitudes se presentan (superiores a los 2.200 metros) el roquedo junto a las zonas boscosas y de pastizales hacen acto de presencia.

## 4. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

En este capítulo se detallan los análisis de tendencias calculados sobre las variables de caudal, temperatura y precipitación, a fin de poder observar la distribución espacial y temporal sobre las 10 cuencas localizadas en nuestra área de estudio.

La identificación de las tendencias según su significación estadística trata de acompañarse de su correspondiente interpretación así como de los factores que pueden explicarla.

Como ya se explicó en el capítulo de metodología de este documento, el análisis de tendencias fue posible mediante la aplicación del **test de correlación no paramétrica *Tau-b de Kendall*** mediante el que se enfrentó la serie temporal (1950-2010) con cada una de las variables (aportaciones de caudal, temperatura y precipitaciones) organizadas mensualmente.

Una de las razones por la que se decidió seleccionar este test de correlación no paramétrica frente a otros también muy utilizados como el de Mann-Kendall -demostrado ser efectivo para la detección de tendencias en series de datos hidrológicos- (Hirsch et al., 1982; Burn, 1994; Westmacott y Burn, 1997), fue la disponibilidad de un herramienta de tratamiento estadístico que permitiera un procedimiento sencillo para la detección de tendencias, por lo que finalmente se procedió al cálculo mediante la prueba de correlación no-paramétrica tau-b de Kendall.

Este test que es ampliamente utilizado por otros investigadores para la detección de tendencias en variables hidrológicas y climáticas en estudios recientes (Lorenzo-Lacruz, Vicente-Serrano, López-Moreno, Morán-Tejeda, & Zabalza, 2012) proporciona el valor de correlación entre las variables y el valor de probabilidad asociado. Esta probabilidad está basada en la hipótesis nula que establece que no existe correlación. El valor de tau, acotado entre  $-1$  y  $1$ , determina si la relación es semejante o inversa, un valor de 0 indica ausencia de correlación.





## 4.1 Tendencias de las aportaciones de caudal

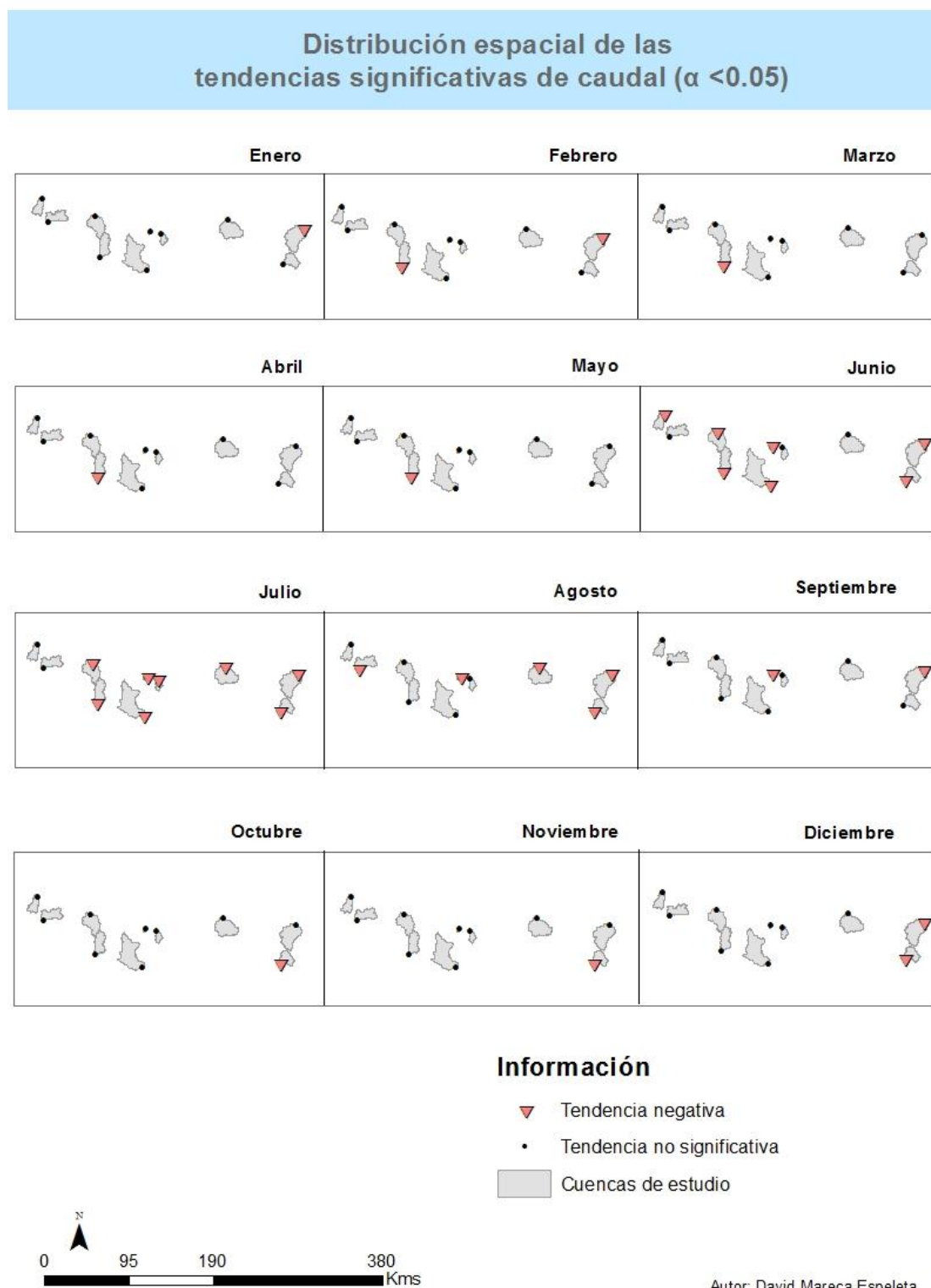


Figura 4.2 – Distribución espacial de las tendencias significativas positivas y negativas obtenidas de las series de caudal para el período comprendido entre 1950 y 2010.

Respecto a la figura 4.2, los resultados para la distribución de las tendencias de caudal revelan una moderada variabilidad espacial en los patrones de distribución con dominancia de la tendencia negativa. La **tendencia negativa** (coeficientes tau negativos y significativos) en los niveles de caudal, se refleja especialmente durante la **época estival** que comprende los meses de Junio, Julio y Agosto en la que la mayor parte de las cuencas de estudio, con porcentaje igual o superior al 50% del total, se ven afectadas por dicho descenso. Una de las posibles causas de este descenso en las aportaciones de caudal puede explicarse por el factor climático que se rige por un descenso más o menos acentuado de las precipitaciones junto a un mayor grado de regulación sobre los recursos hídricos en determinadas cuencas desde el punto de vista de la mayor demanda de agua durante los meses de verano.

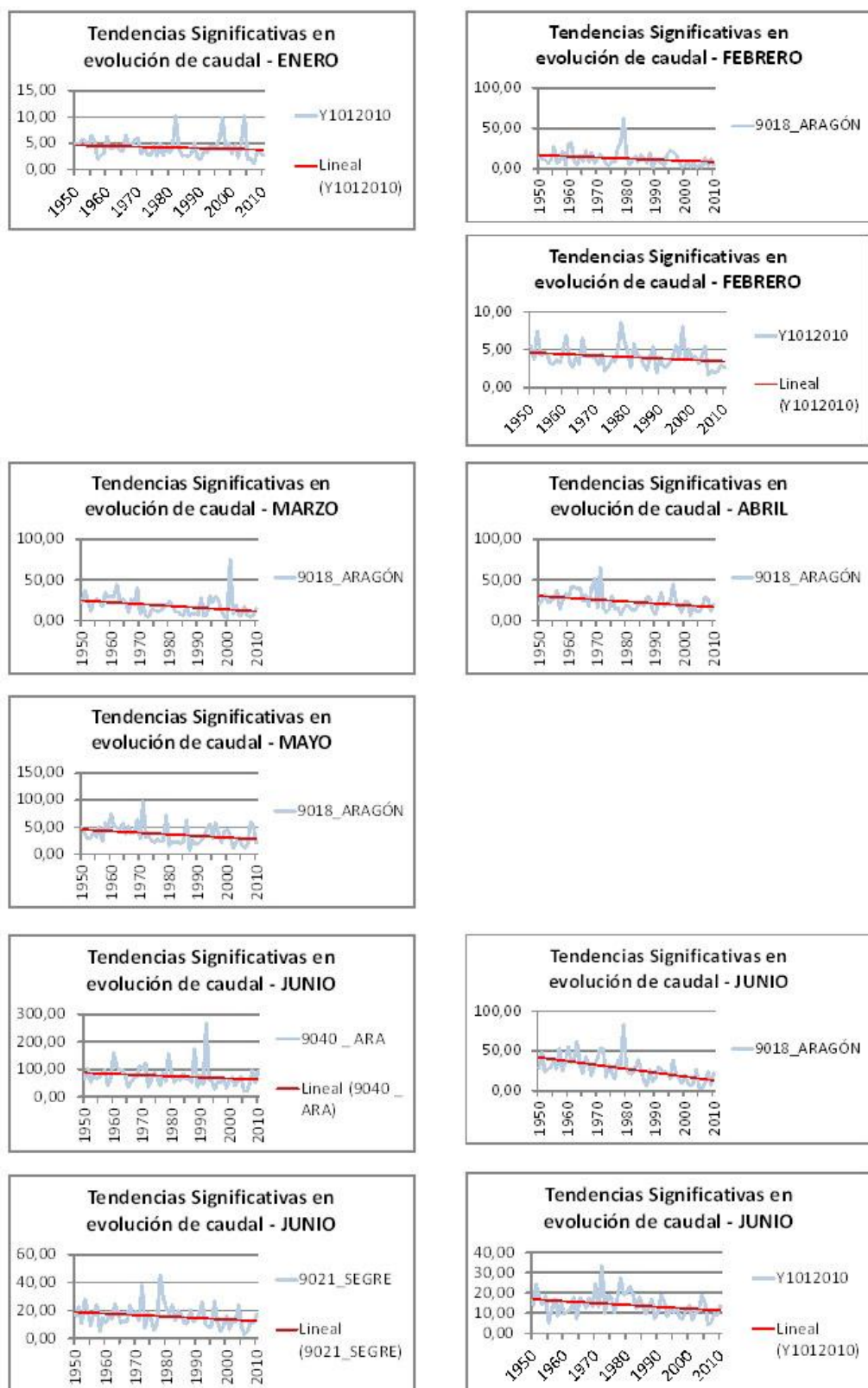
La distribución espacial no manifiesta un patrón definido en la localización de las tendencias negativas, aunque se observa un menor impacto en la reducción de las aportaciones de caudal durante los meses de verano en aquellas cuencas restringidas a la vertiente atlántica: cuencas del Iratí y del Nive. En estas cuencas la tendencia a pesar de ser negativa encontramos tendencias no significativas en el mes de Julio, a diferencia para el mismo mes con el resto de cuencas. La justificación de esta situación viene respaldada en gran parte por el mayor volumen y regularidad de las precipitaciones que se registran en la parte occidental de nuestra zona de estudio a causa de la influencia oceánica y en consecuencia la llegada de masas de aire cargadas de agua.

Por otro lado, se detecta un predominio espacial de las **tendencias negativas en los meses de invierno** (Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero) en la zona oriental de la zona de estudio que afecta a las cuencas del Segre y del Aude. Esta situación se explica por su situación en el extremo oriental que corresponde a la fachada mediterránea que coincide por un registro menor en el volumen de precipitaciones (< 800 mm anuales) a causa del factor climático y orográfico (Cadena Pre-litoral Catalana). En este sentido, hay que destacar que en el caso de ambas cuencas y especialmente en la del Segre, la caracterización de los usos del suelo arrojó una mayor proporción de usos dedicados al cultivo, zonas urbanas, industriales y comerciales con la consecuente demanda de agua para el riego y abastecimiento urbano.

En el caso de la cuenca del Aude hay que destacar que en estudios previos ya se constató una reducción de los recursos hídricos para el período 1965-2004 y además se apunta a que uno de los principales rasgos que caracterizan la reducción general en las aportaciones de caudal sobre esta zona se relaciona con el factor de altitud –tendencias a la baja detectadas en las subcuencas más elevadas de los Pirineos- (Lepinas, Ludwig, & Heussner, 2014).

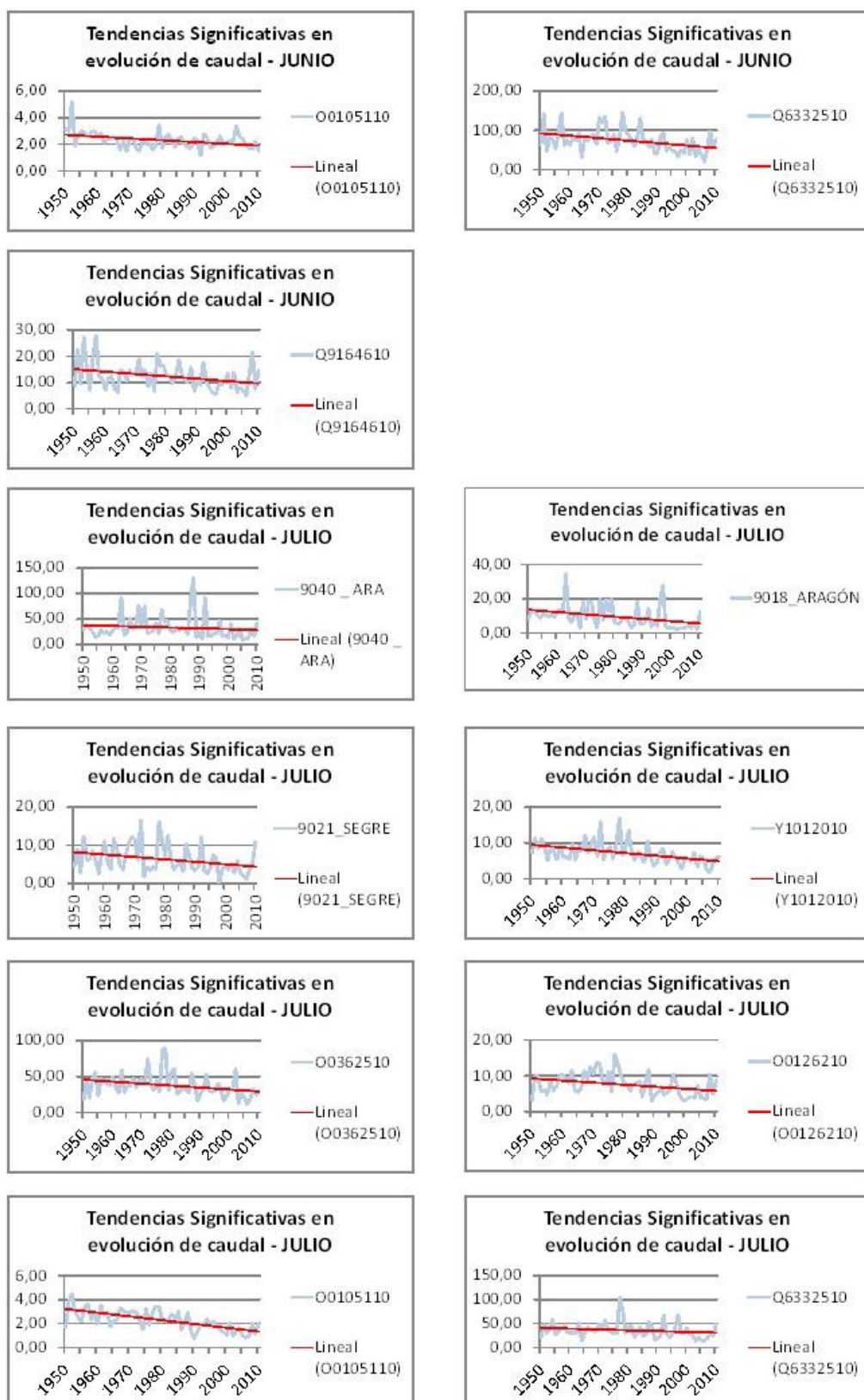
A la **tendencia negativa** en los meses de invierno vistos en las cuencas del Segre y del Aude hay que sumar la tendencia negativa que comienza a registrarse desde el mes de Febrero hasta Mayo –meses de **primavera**- sobre la cuenca del Aragón localizada en la parte más meridional de nuestra zona de estudio junto a la del Ara, y cuyas aguas son trasvasadas a la Comarca de Cinco Villas con fines agrícolas.

En el estudio llevado a cabo por (López-Moreno, Beniston, & García-Ruiz, 2008) se considera que los cambios en precipitación, temperatura y acumulación de nieve junto a el incremento en la densidad de vegetación llevaron a una marcada reducción de los recursos hídricos en el sur de los Pirineos.



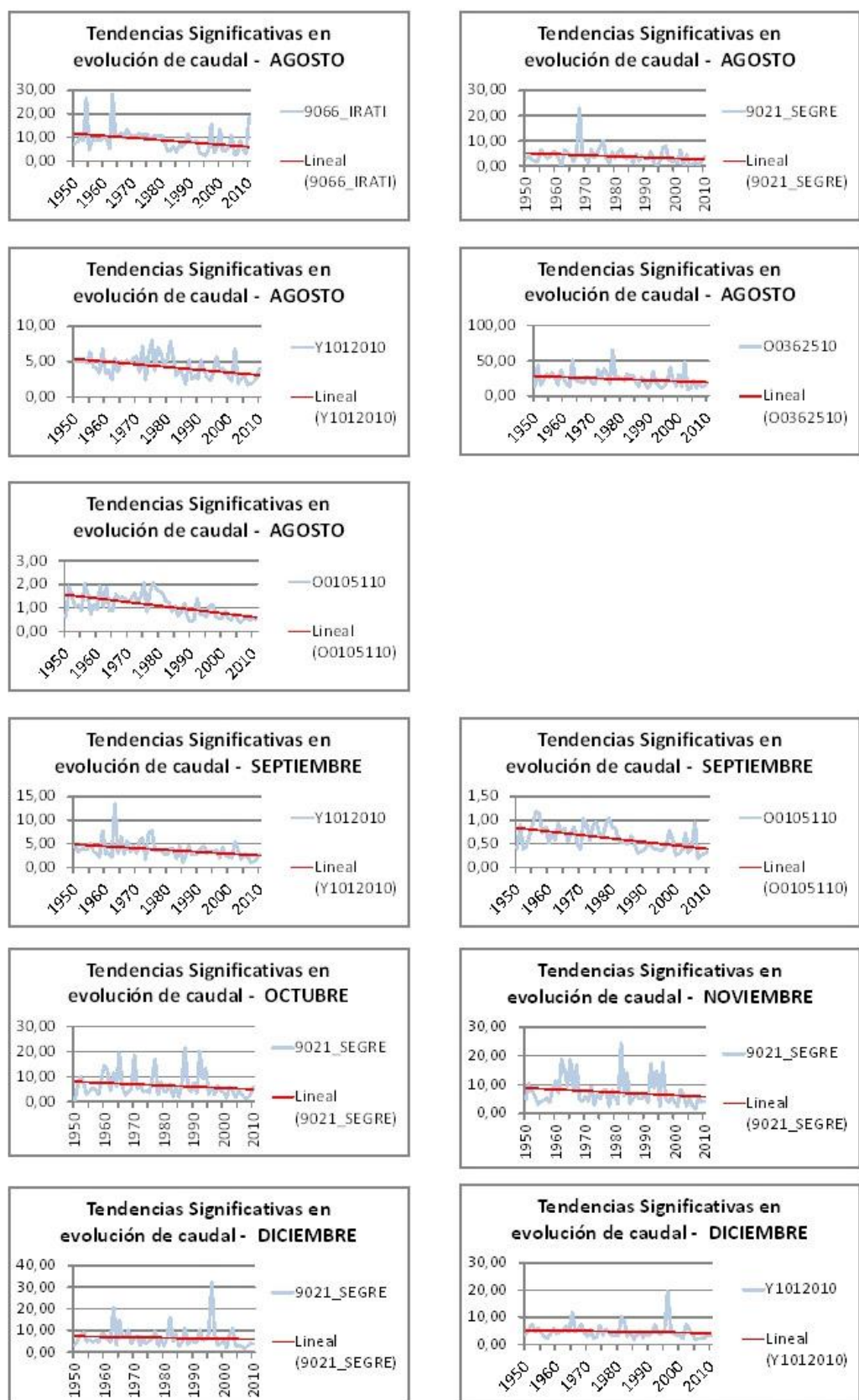
Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.2.1 – Evolución del caudal (Enero - Junio) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.2.2 – Evolución del caudal (Junio - Julio) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.2.3 – Evolución del caudal (Agosto - Diciembre) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



# 4.2 Tendencias de las temperaturas

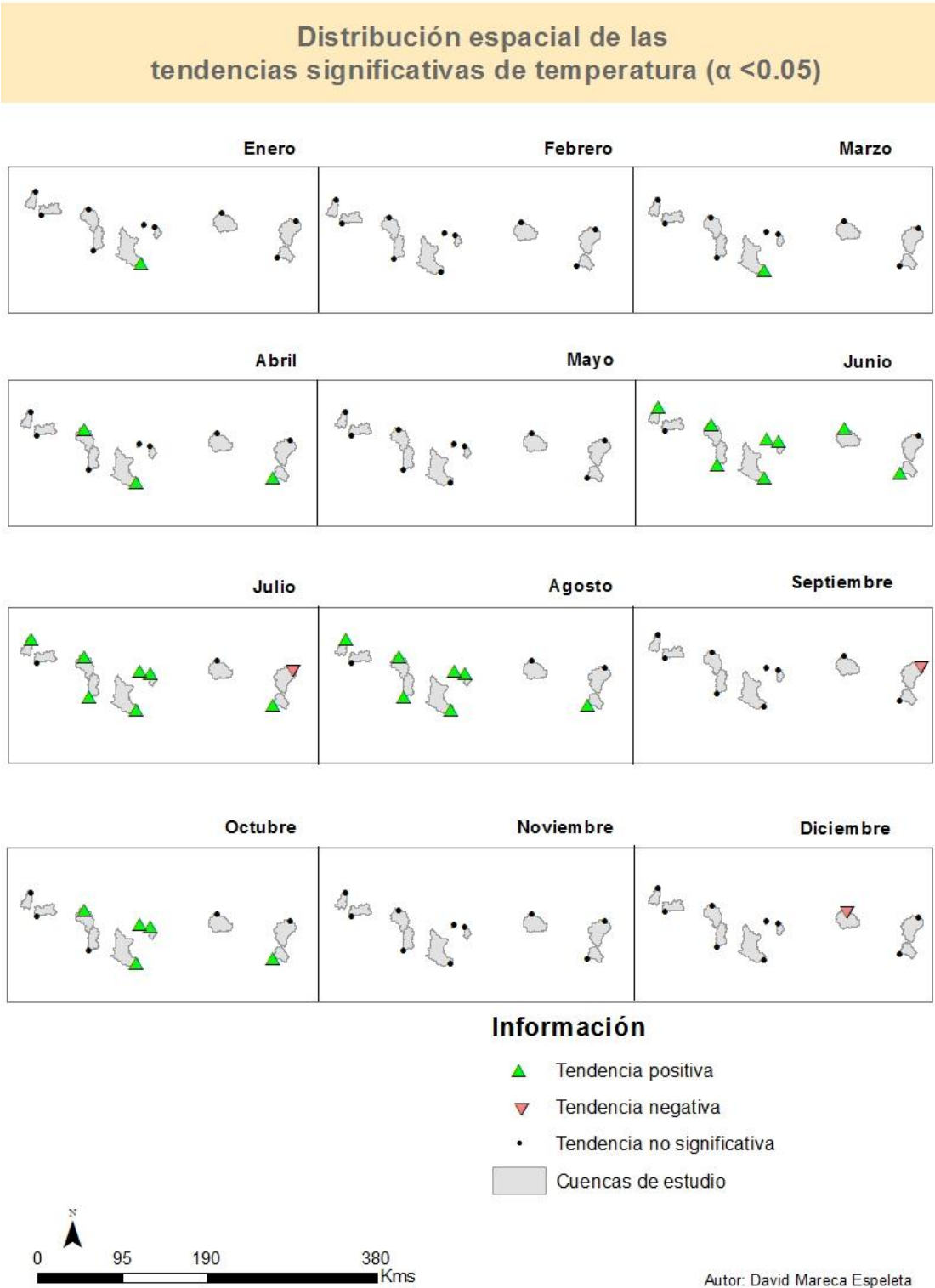


Figura 4.3 – Distribución espacial de las tendencias significativas positivas y negativas obtenidas de las series de temperatura para el período comprendido entre 1950 y 2010.

La figura 4.3 acerca de las tendencias de temperatura, muestra a diferencia de las tendencias registradas para los caudales mayor variabilidad de signo y estacional así como en los patrones que marcan su distribución en el espacio. En general, se registran **tendencias positivas** en las cuencas durante de primavera (Marzo, Abril), verano (Junio, Julio, Agosto) y en otoño (Octubre).

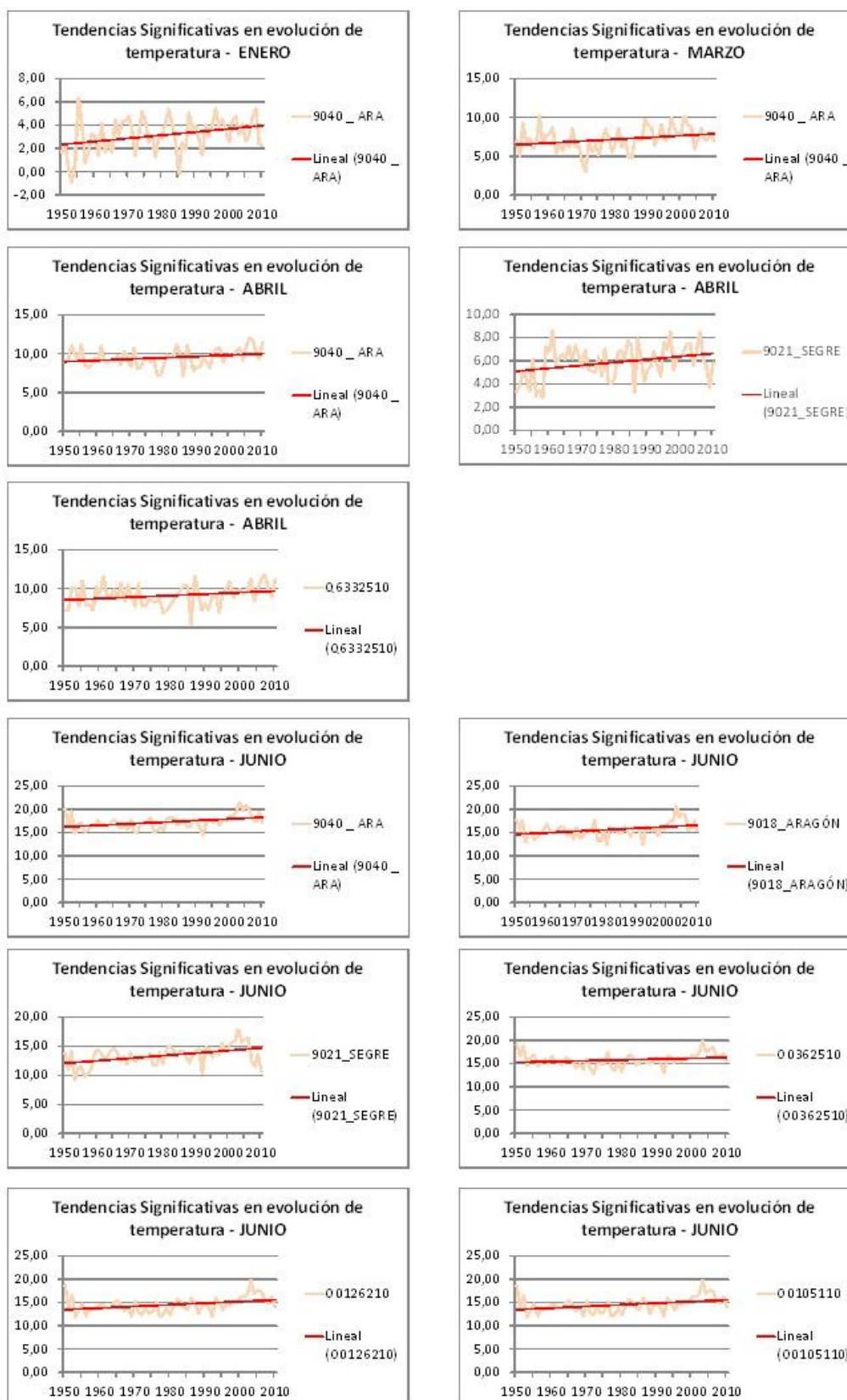
Las cuencas más afectadas por este incremento de la temperatura media mensual fueron las localizadas en la parte occidental en la fachada septentrional que incluye la cuenca del Nive y las que se ubican en la parte central y meridional que incluye las cuencas del Gave, Aragón, Neste, Ara y en menor medida la del río Salat.

En estudios previos sobre las tendencias de temperatura observadas por ejemplo en la región superior de la cuenca del río Aragón indican el aumento de la temperatura, entre 1 y 2 °C desde el comienzo del siglo XX junto con un aumento en la demanda evaporativa de la atmósfera lo que puede haber causado una disminución de la escorrentía. Además los modelos predicen un calentamiento que oscilará entre 1,5° C en primavera y de 2,4 °C en verano con un calentamiento promedio anual de 1,8 °C entre 2021 y 2050 (López-Moreno et al., 2014b).

En este sentido los resultados de la distribución espacial de las tendencias de temperatura expuestos coinciden con la tendencia analizada en el noreste de España. En estudios previos (El Kenawy, López-Moreno, & Vicente-Serrano, 2012) se manifiesta una fuerte evidencia al alza en la temperatura a escala de tiempo anual y estacional relacionados con cambios el sistema climático y dónde para el período de 1960-2006 se constata que el calentamiento es más rápido a mitad del año (primavera y verano).

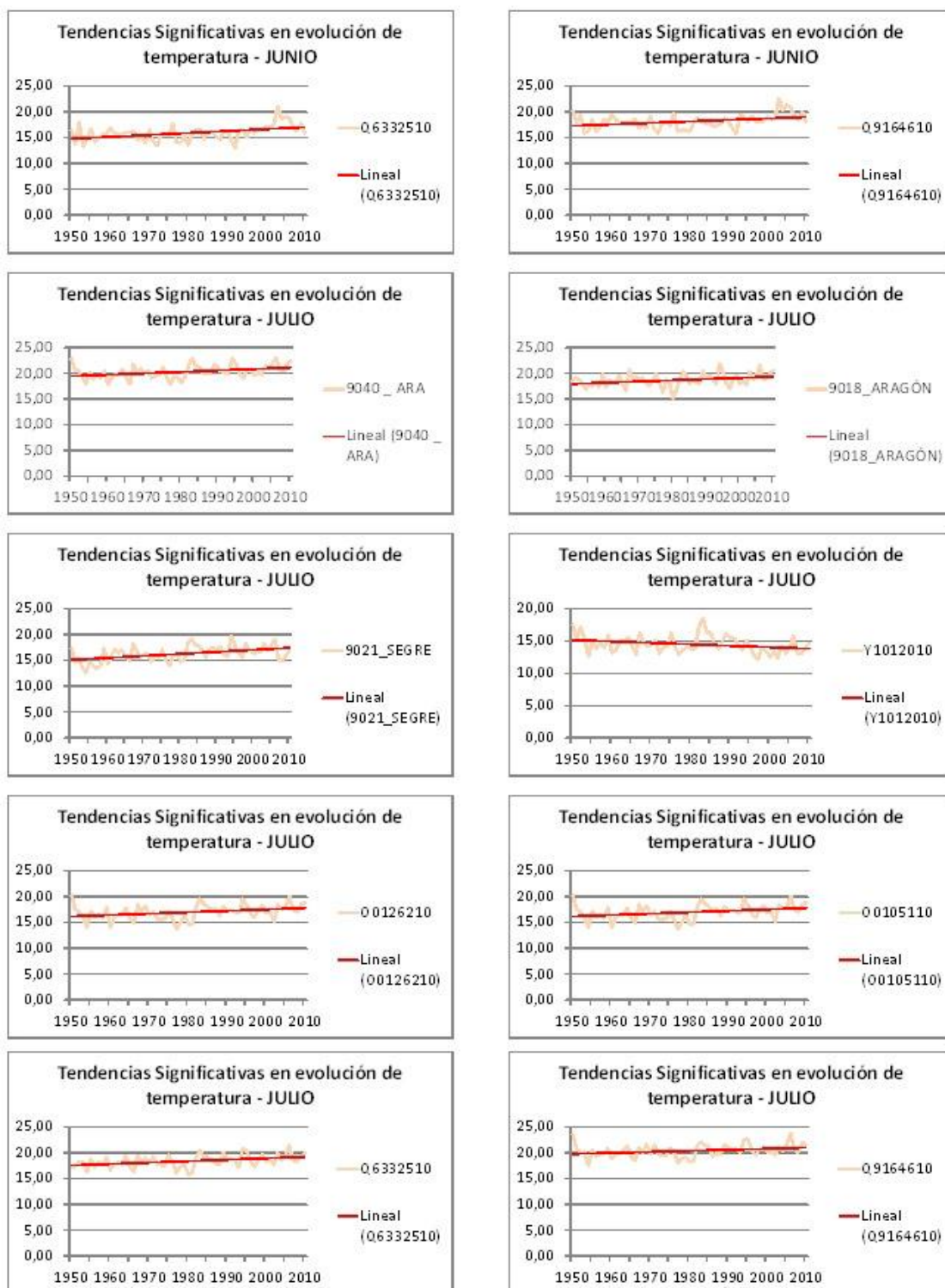
Por otro lado, el estadístico arroja **tendencias negativas** para los meses de Julio y Septiembre en la cuenca del Aude, mientras que para la cuenca del Salat en el mes de Diciembre.





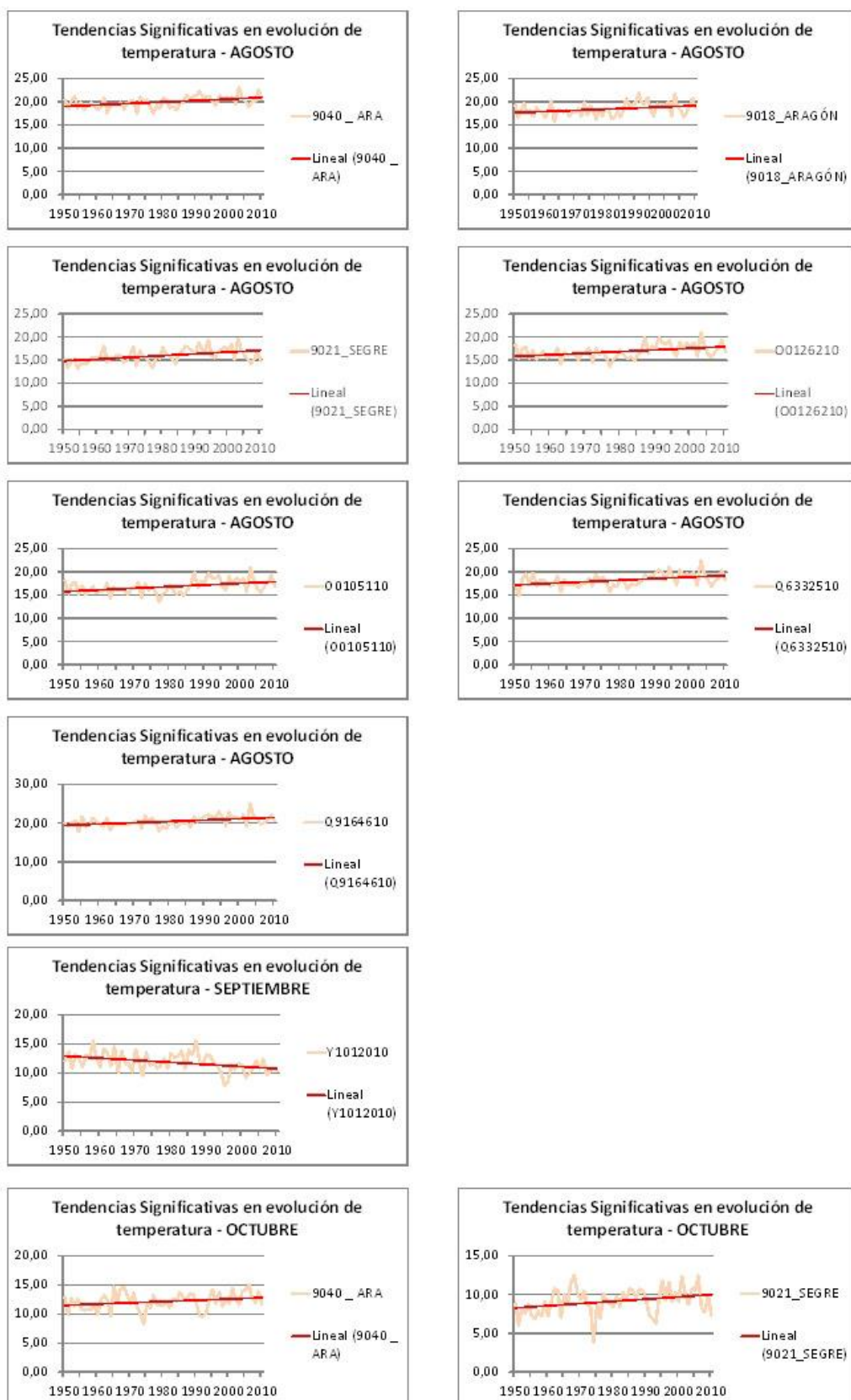
Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.3.1 – Evolución de la temperatura (Enero - Junio) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



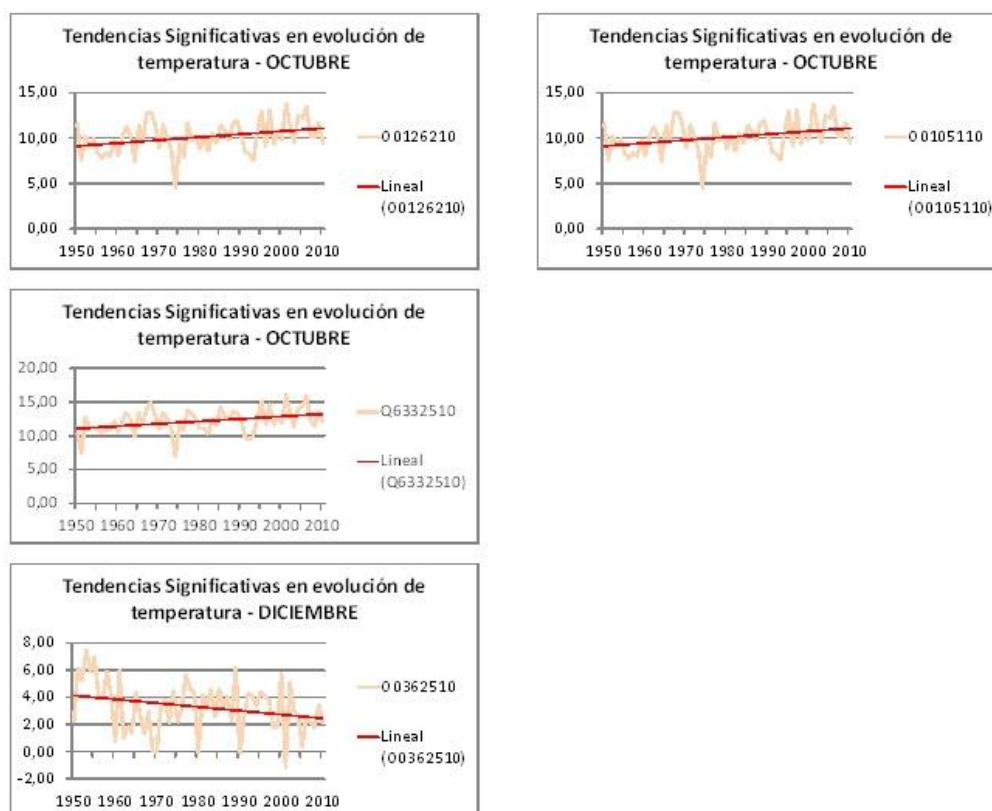
Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.3.2 – Evolución de la temperatura (Junio - Julio) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.3.3 – Evolución de la temperatura (Agosto - Octubre) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.



Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.3.4 – Evolución de la temperatura (Octubre - Diciembre) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.

### 4.3 Tendencias de las precipitaciones

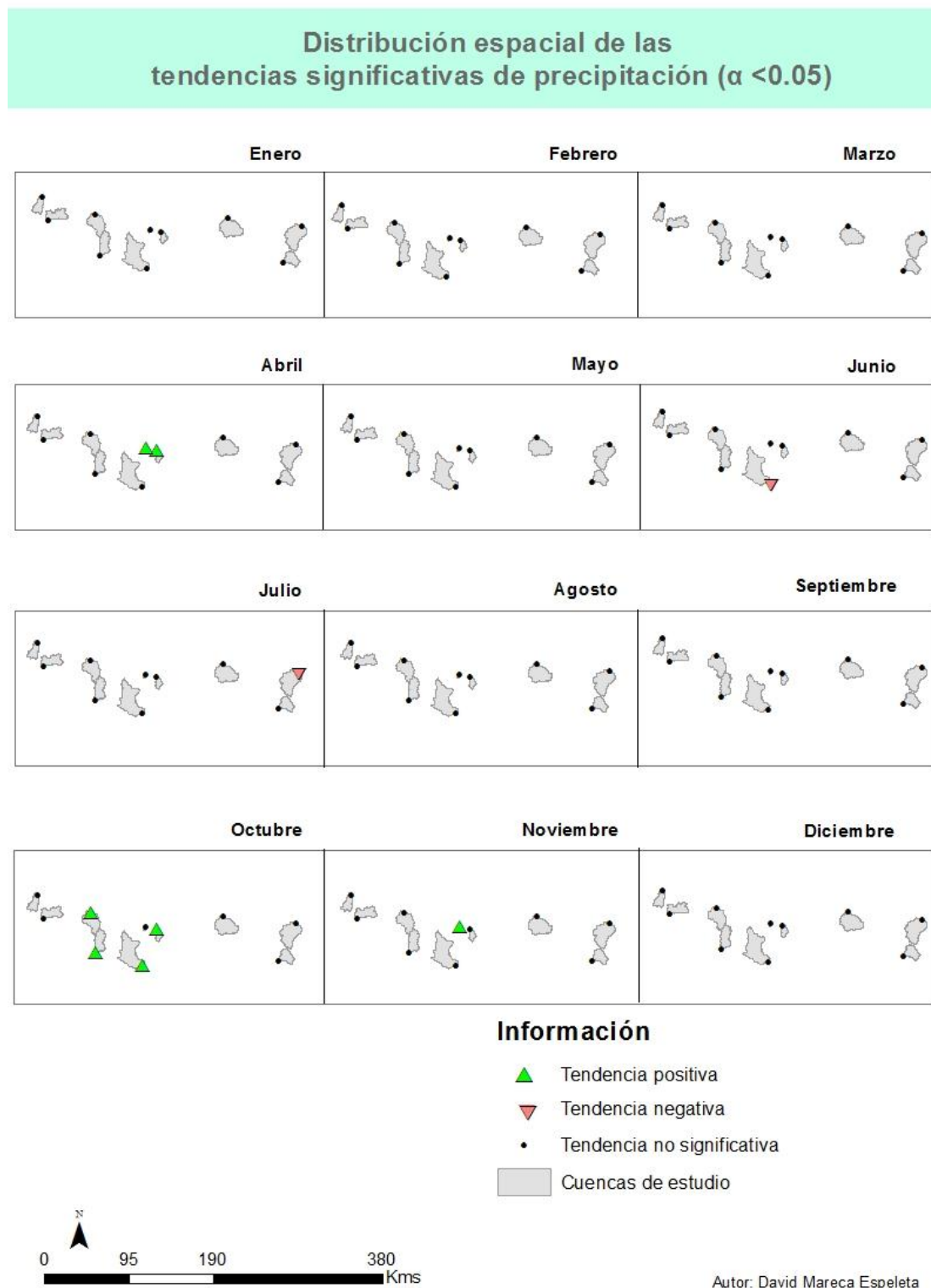


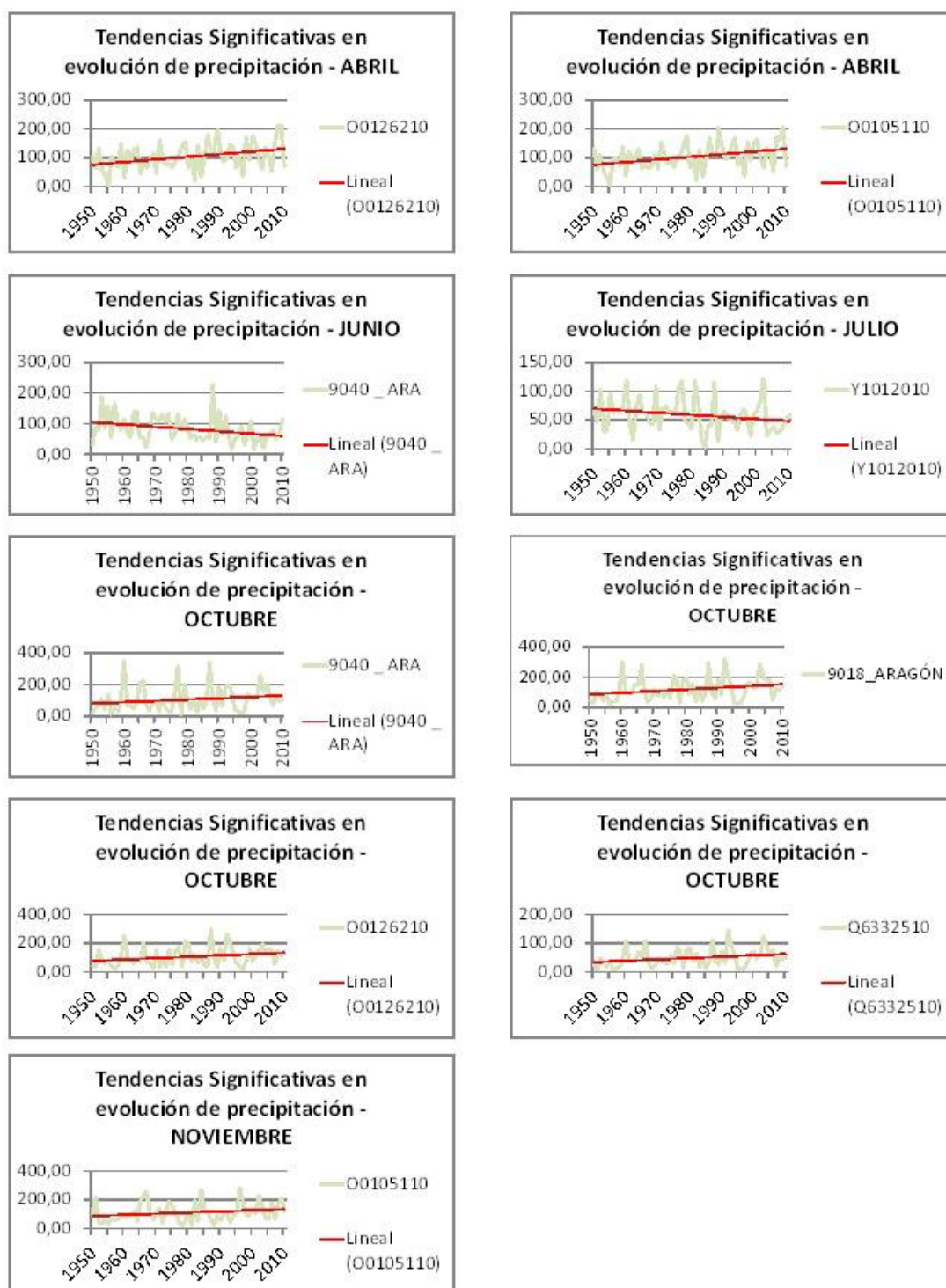
Figura 4.4 – Distribución espacial de las tendencias significativas positivas y negativas obtenidas de las series de precipitación para el período comprendido entre 1950 y 2010.

Sobre la figura 4.4 acerca de la distribución de las tendencias de precipitación, nos encontramos ante la variable climática que menos variabilidad espacial presenta de las tres analizadas. Como revelan los resultados, encontramos **tendencias significativas de aumento o descenso** de precipitación para una serie de cuencas (Gave, Aragón, Ara, Neste) que se localizan en la parte septentrional y meridional del centro de los Pirineos.

Es notoria la aparición de tendencias positivas en la precipitación para las cuencas citadas durante la primavera (Abril) y otoño (Octubre y Noviembre). De hecho en estudios previos sobre la totalidad de la cuenca del Ebro ya se postula que durante el otoño y la primavera se produce la mayor parte de la precipitación, siendo el verano e invierno relativamente secos (con tormentas ocasionales en verano y dominio de condiciones anticiclónicas por largos períodos en el invierno), sin embargo en el área más occidental los inviernos son más húmedos por la continua exposición de frentes atlánticos (López-Moreno et al., 2013).

Tan solo rompe esta tendencia positiva la cuenca del Aragón y del Aude para los meses de verano, en el caso del Aragón nos encontramos con una cuenca situada en la parte más meridional de la zona de estudio y en el caso del Aude con la cuenca situada más al extremo oriental del estudio, su localización así como la heterogeneidad de la topografía puede ser uno de los condicionantes que explique este descenso en el número de precipitaciones para el período observado.





Autor: David Mareca Espeleta

Figura 4.4.1 – Evolución de la precipitación (Abril - Noviembre) de aquellas cuencas con tendencias significativas para el período comprendido entre 1950 y 2010.

## 5. ANÁLISIS DE IMPACTOS

En este capítulo se presentan los resultados del impacto de los déficits de precipitación sobre los caudales de los ríos analizados. Para ello, se calculó la correlación entre los índices de sequía climáticos (SPI) e hidrológicos (SSI) en cada una de las cuencas de estudio.

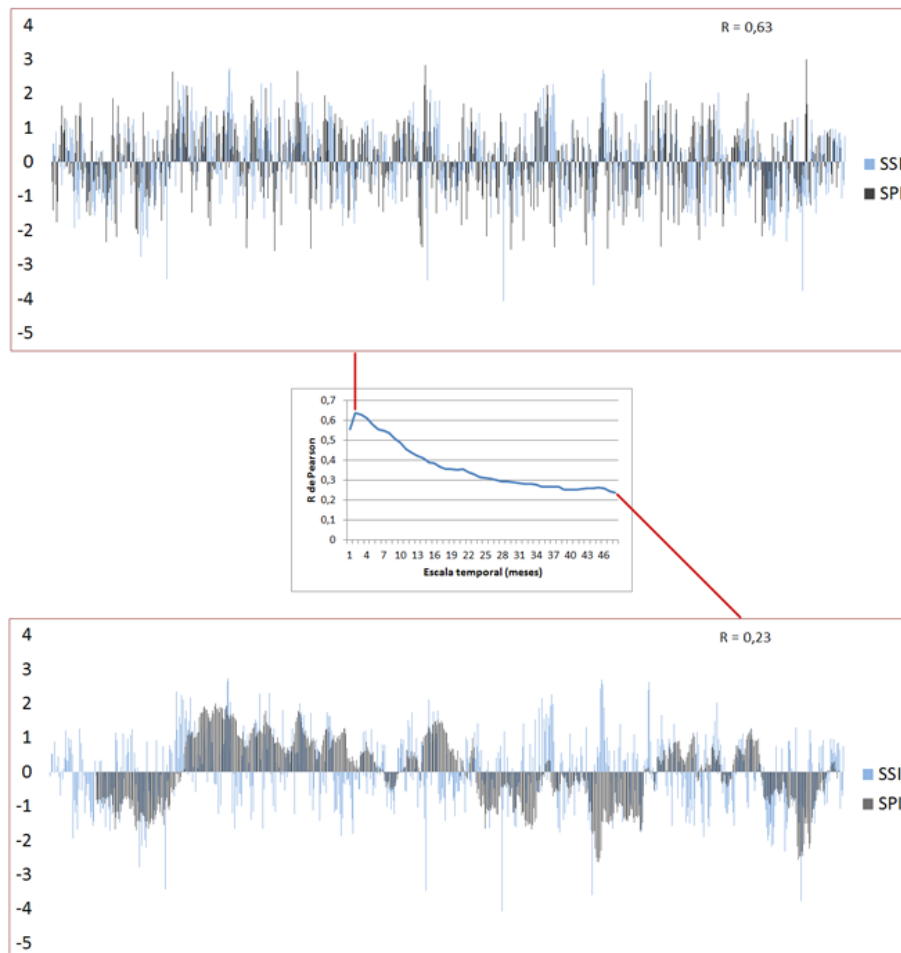


Figura 5.1 – Arriba: Evolución temporal del SSI y del SPI calculado a la escala de 3 meses de la cuenca del río Ara. Centro: curva de correlaciones continuas entre el SSI y el SPI a las escalas de 1 a 48 meses. Abajo: evolución temporal del SSI y del SPI calculado a la escala de 48 meses de la cuenca del río Ara.

A través de la correlación entre ambos índices se consiguió elaborar 10 curvas de correlación continuas (escalas de 1 a 48 meses). Cada una de las curvas que se presentan a continuación revela la correlación (mediante Pearson) entre el caudal estandarizado y la anomalía de precipitación acumulada.



## 5.1 Análisis del impacto de la sequía meteorológica (SPI) en la sequía hidrológica (SSI)

En la siguiente imagen encontramos las 10 curvas de correlación entre el SPI y el SSI para cada una de las cuencas analizadas:

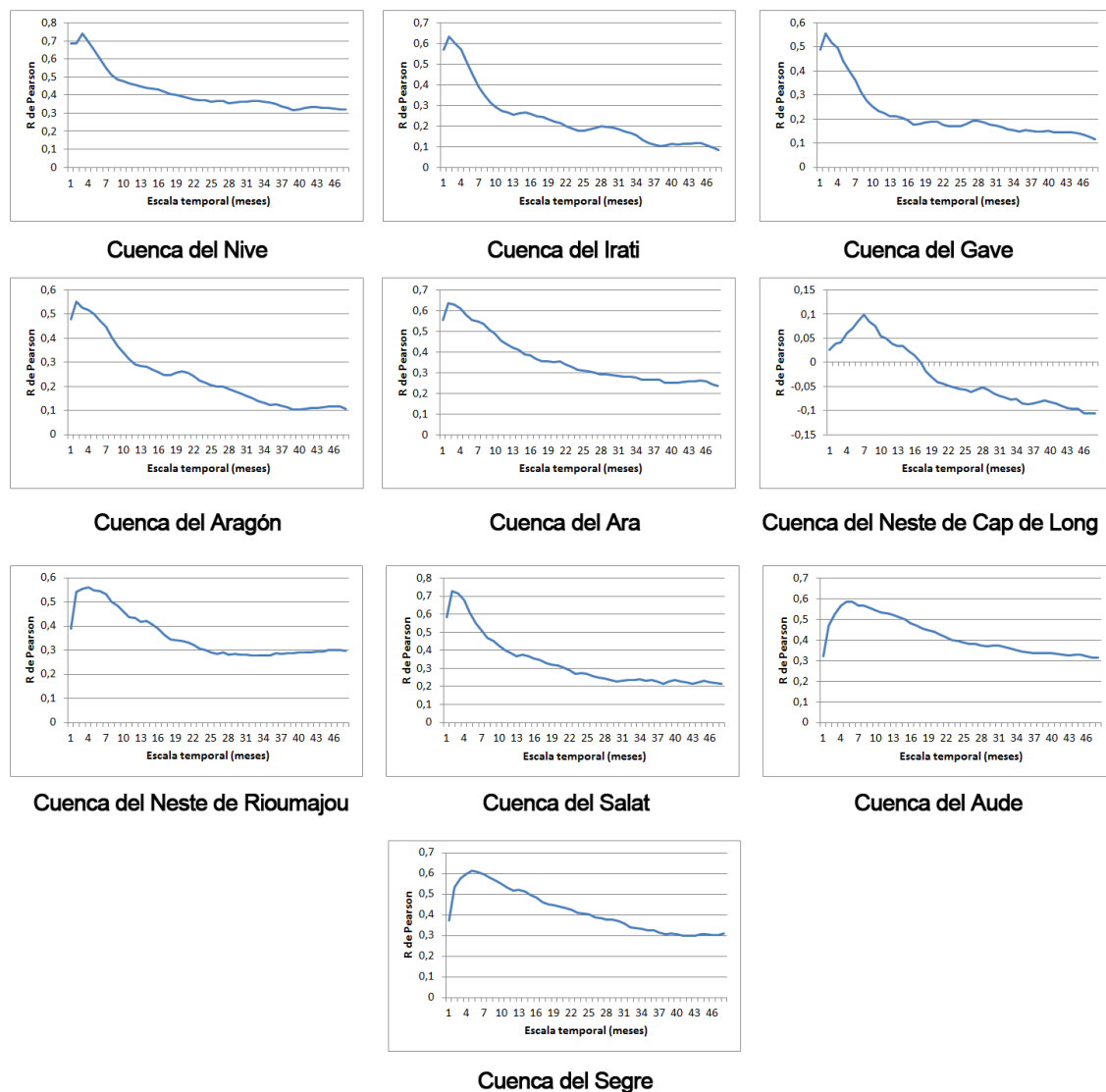


Figura 5.2 – Curvas de correlaciones continuas entre el SSI y el SPI a las escalas de 1 a 48 meses.

Como se puede apreciar en la figura las cuencas que presentan mayores coeficientes de correlación ( $> 0,7$ ) son las cuencas del Nive y del Salat. También encontramos que se alcanzan correlaciones moderadas ( $> 0,5$ ) en las cuencas del Irati, Gave, Aragón, Ara, Neste de Rioumajou, Aude y Segre. Por

el contrario, la única cuenca que presenta correlación negativa es la de la cuenca del Neste de Cap de Long.

En primer lugar observamos que las mayores correlaciones entre la precipitación y la aportación de caudal se producen en la mayoría de las cuencas a una escala temporal corta comprendida entre 1 y 4 meses (**cuencas del Nive, Irati, Gave, Aragón, Ara, Salat**). En este sentido, estas cuencas se caracterizan por tener una respuesta hidrológica a las condiciones climáticas en un período de tiempo corto. Este tipo de respuesta se asocia con cuencas de intensa generación de escorrentía, que se ve favorecida por pendientes pronunciadas, un área de drenaje relativamente pequeña y sustratos rocosos de escasa permeabilidad (López-Moreno et al., 2013).

En nuestro capítulo de caracterización de las cuencas pudimos observar que los mayores porcentajes de pendiente ( $> 18\%$ ) coinciden con las cuencas del Gave, Salat, Ara y Aragón. Con porcentajes de pendiente inferiores al  $18\%$  se encuentra la cuenca del Irati y del Nive ( $< 15\%$ ), en ambos casos se tratan de cuencas de superficie moderada con menos de  $250 \text{ km}^2$  localizadas en la fachada occidental de nuestra zona de estudio.

La mayor correlación de las cuencas nombradas la encontramos para la cuenca del Nive a una escala de 3 meses ( $r = 0,74$ ), mientras que a escala de 2 meses es la cuenca del Salat ( $r = 0,72$ ).

Por otro lado, podemos hablar de otro patrón de comportamiento hidrológico para las **cuencas del Neste de Rioumajou, Aude y Segre**. En estos casos, las mayores correlaciones entre precipitación y caudal se alcanzan en escalas temporales medias (entre 4 y 10 meses). Tanto en el caso de las cuencas del Segre como del Aude, las máximas correlaciones se alcanzan a la escala temporal de 5 meses con coeficientes de correlación de 0,61 y 0,58 respectivamente. Mientras que para la cuenca del Neste de Rioumajou lo hace a los 4 meses ( $r = 0,56$ ). Tanto en el caso de la cuenca del Aude y del Segre hay que recordar nuevamente que se trata de las cuencas localizadas más en el extremo oriental de nuestra zona de estudio y que particularmente en el Segre los usos del suelo están vinculados a una intensa antropización basada en la actividad agrícola y producción hidroeléctrica con presencia de diversos

embalses. Por lo que cabría indicar que este patrón de comportamiento en la respuesta hidrológica podría estar inducido por prácticas de gestión hídrica o regulación lo que modifica la respuesta temporal de los impactos de la sequía climática sobre la aportación de caudal.

Este patrón de comportamiento como se observa en las curvas de correlación nos indica que la respuesta se prolonga en el tiempo en forma de un larga inercia temporal (las correlaciones se mantienen elevadas por encima del 0,3 por un largo período de tiempo –superior a los 24 meses-). A diferencia con las cuencas localizadas en la parte occidental de nuestra zona de estudio, en dichos casos se aprecia una mucha mayor atenuación temporal en períodos cortos de tiempo que enseguida desciende a medida que aumenta la escala temporal, como por ejemplo se demuestra en la cuenca del Aragón, dónde se pasa de valores de correlación superiores a 0,5 a escala de 2 meses a valores de correlación cercanos al nivel de significación 0,1 a partir de los 38 meses.

La excepción a los patrones comentados viene dada por la cuenca del Neste de Cap de Long, dónde se aprecian correlaciones negativas y en el que en ningún se alcanza el valor significativo ( $r = 0,1$ ) quedándose  $r$  en 0,09 a una escala de 7 meses. En este caso, no podemos extraer resultados concluyentes ya que entre otros motivos se trata de una cuenca con una extensión aproximada de 5 km<sup>2</sup>

## 6. DISCUSIÓN Y VALORACIÓN

El presente trabajo se ha enmarcado en la búsqueda de contribuir al conocimiento del fenómeno de las sequías hidrológicas, y en concreto, al comportamiento regional para el conjunto de cuencas localizadas en Los Pirineos.

Como vimos al principio del documento en el apartado introductorio, la metodología aplicada para llevar a cabo el estudio se basó en datos de naturaleza cuantitativa –fundamentalmente la variable hidrológica constituida por las aportaciones de caudal y la variable climática compuesta de las temperaturas y las precipitaciones-. Hay que destacar que la disponibilidad temporal de esta información es la responsable de condicionar todo el estudio, en este sentido los resultados obtenidos pueden considerarse expresivos de las diferencias espaciales tanto en las tendencias observadas como también en los impactos.

Las características y propiedades de las cuencas de estudio vistas en el capítulo de caracterización de la zona a través del diagnóstico de su morfología (altitud, superficie, forma, pendiente), localización, usos del suelo...constituyen uno de los apartados del documento más importantes para interpretar los resultados de tendencias y de impactos.

Como hemos podido observar los resultados muestran una gran variabilidad en función de la variabilidad fisiográfica que muestran las cuencas, en general las cuencas presentan tendencias de distribución espacio-temporal así como de impactos significativas muy similares a los presentados en recientes artículos de investigación.

En este sentido, podríamos diferenciar la parte más occidental de nuestra zona de estudio compuesta por las **cuencas del Nive y del Irati** que se asientan sobre una topografía suave (menor altitud media y pendientes suaves) y con unos usos del suelo dominados por zonas boscosas y pastizales, además de algo de regadío. Por su localización a las puertas del atlántico que se traduce a una fuerte exposición al influjo del Frente Polar y los vientos del oeste, se trata de cuencas que registran un elevado número de precipitaciones de forma

regular. En consecuencia los resultados de tendencias para estas cuencas se traducen en tendencias apenas significativas tanto para el caudal como la precipitación, si bien es cierto que se presenta una tendencia positiva en las temperaturas, es decir, de aumento de la temperatura media durante los meses de verano (Junio, Julio y Agosto). De igual manera, en el aspecto de los impactos, ambas cuencas que se caracterizan por una respuesta hidrológica a las condiciones climáticas de sequía en períodos cortos de tiempo (entre 1 y 4 meses).

Pasando a la fachada central de nuestra área de estudio se encuentran las **cuencas del Gave, Aragón, Ara, Neste de Cap de Long y Rioumajou y Salat**. Estas cuencas se asientan sobre el sector septentrional del alto Pirineo central. Por esta razón, la influencia marítima procedente del atlántico y del mediterráneo es menor que en el caso anterior si bien el conjunto de precipitaciones sigue siendo alto aunque se produce con menor regularidad a lo largo del año que en el caso de las cuencas del Nive y del Irati, a cambio, las temperaturas durante la estación de verano e invierno muestran atenuaciones superiores que en el caso anterior.

Se trata de cuencas con unas características fisiográficas diferentes, presentan mayores altitudes y pendientes medias así como unos usos del suelo vinculados más a la alta montaña (bosques, pastizales, matorrales y zonas de roquedo) que en el caso anterior, lo que se traduce en un mayor dominio de los procesos de escorrentía. En cuanto a los análisis de tendencias se hace notable un descenso notable del caudal, especialmente durante el verano. Al mismo tiempo las temperaturas muestran una tendencia al aumento principalmente en verano, aunque también en menor medida durante la primavera y el otoño. En el caso de las precipitaciones, se constata también que durante la primavera y el otoño hay una tendencia al aumento de las mismas.

El análisis de impactos mostro como en el caso anterior que se trata de cuencas que también presentan una respuesta hidrológica a las condiciones climáticas en períodos cortos (inferior o igual a los 4-5 meses) algo propio de

cauces de alta montaña dónde hay una intensa generación de escorrentía al discurrir por pendientes elevadas, sustratos poco permeables etc.

Finalmente, el área más oriental de nuestra zona de estudio compuesta por las **cuencas del Aude y del Segre** comparte características fisiográficas similares a las de la fachada occidental pero con importantes diferencias. Si bien se ubican en un espacio con influencia marítima (Mar Mediterráneo) esta influencia es mucho menos regular e intensa que la ejercida por el frente polar en la fachada occidental, de manera que las precipitaciones a pesar de ser más elevadas que en el sector central, se comportan y distribuyen de forma más irregular a lo largo del año. Se trata de cuencas con una elevada altitud media (superior a los 1.500 metros), lo que hace que hablemos de pendientes moderadas, y en el caso del Aude en la vertiente francesa de pendiente elevada (superior al 20%). Los usos del suelo entre ambas presentan también diferencias, la cuenca francesa se encuentra más dominada en este sentido por zonas boscosas, prados y pastizales, mientras que la española, la cuenca del Segre se caracteriza por una cubierta del suelo mucho más antropizada con dominio del cultivo – de regadío y secano- y presencia de zonas urbanas, industriales o comerciales, así se traduce en una mayor presencia de infraestructuras hidráulicas como embalses.

Fruto de los factores nombrados, los resultados del análisis de tendencias permiten hablar de un descenso de caudal durante los meses de invierno y verano, aunque es especialmente notable durante la estación invernal al ser de las pocas cuencas que lo presentan junto a la cuenca del Aragón. En el caso de las temperaturas, se muestra una tendencia al aumento de la misma durante la primavera, verano y otoño para la cuenca del Segre, mientras que en el caso del Aude la tendencia se dirige hacia un leve descenso de la temperatura en los meses de verano y otoño. Sin embargo, para las precipitaciones la tendencia observada no nos permite hablar de cambios significativos en el período observado.

Por la combinación de los diferentes factores analizados, nos encontramos con un análisis de impactos que da como resultado en ambas cuencas un comportamiento hidrológico vinculado a escalas temporales medias (entre 4 y

10 meses) , por ello y a diferencia de lo visto en las cuencas anteriores podemos hablar de un patrón diferente caracterizado por una acumulación de los impactos de la sequía climática a escalas temporales más largas, como vimos anteriormente la cuenca del Segre se trata de una cuenca con uso enfocado hacia el regadío y a otros usos que en consecuencia suponen la aparición de embalses lo que pueden suponer un cambio en el patrón de respuesta al extender temporalmente la influencia de los déficits de precipitación.

## **7. CONCLUSIONES**

Las conclusiones finales a las que se ha llegado una vez finalizado el estudio nos permiten hablar de cambios en el comportamiento hidrológico de las cuencas analizadas, ya sea por origen natural o humano, si bien se ha podido demostrar que hay una fuerte relación entre las características y factores de cada una de las cuencas y el comportamiento hidrológico que presentan los cauces.

De los objetivos planteados al principio del trabajo, creo haber cumplido con ellos puesto que he podido caracterizar la zona de estudio y la elaboración de este trabajo me ha permitido abordar nuevas fuentes de información y procesos metodológicos desconocidos hasta el momento como ha podido ser la reconstrucción de series de caudal o el cálculo de los índices de sequía climática (SPI) o sequía hidrológica (SSI). Si bien, la tutorización del trabajo constituyó también una de las bases para poder desarrollar con éxito cada una de las fases del estudio.

A nivel personal me siento bastante satisfecho de los resultados obtenidos puesto que nunca antes me había introducido en el tema de la sequía de forma aplicada a una zona geográfica concreta, y en este caso ha supuesto poner en práctica gran parte de la información académica recibida durante los 4 años en el Grado de Geografía y Ordenación del Territorio. Sin embargo, también me he encontrado dificultades para abordar el trabajo fruto de la dificultad para obtener información ya que por ejemplo la disponibilidad de la misma a veces se encontraba condicionada por diferentes causas.

Finalmente los resultados obtenidos en este trabajo espero que puedan servir a futuros estudiantes que tengan interés por abordar estos temas, por lo que la experiencia obtenida puede considerarse gratificante, y de manera especial en el plano personal al haber aprendido nuevos conceptos y técnicas de trabajo que han contribuido a mi formación académica.



## 8. BIBLIGRAFÍA Y FUENTES

La bibliografía y fuentes consultadas para la elaboración de este trabajo son las siguientes:

- Aparicio Florido, J. A. (2007). El riesgo de sequía y su inclusión en los planes de protección civil. *Boletín De La Asociación De Geógrafos Españoles*, (44), 95-116.
- Birsan, M., Molnar, P., Burlando, P., & Pfaundler, M. (2005). Streamflow trends in switzerland. *Journal of Hydrology*, 314(1–4), 312-329.
- Cuadrat et al. (2014). Clima del Pirineo. *Observatorio Pirenaico del Cambio Climático*. CTP.
- El Kenawy, A., López-Moreno, J. I., & Vicente-Serrano, S. M. (2012). Trend and variability of surface air temperature in northeastern spain (1920–2006): Linkage to atmospheric circulation. *Atmospheric Research*, 106(0), 159-180.
- Giorgi, F., & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the mediterranean region. *Global and Planetary Change*, 63(2–3), 90-104.
- Hannaford, J., & Buys, G. (2012). Trends in seasonal river flow regimes in the UK. *Journal of Hydrology*, 475(0), 158-174.
- Hernández Santón, C., & Rubio Fernández, V. (1990). La evolución reciente del cauce del río ara. *Cuadernos De Investigación Geográfica*, (16), 99-108.
- Hidalgo-Muñoz, J. M., Argüeso, D., Gámiz-Fortis, S. R., Esteban-Parra, M. J., & Castro-Díez, Y. (2011). Trends of extreme precipitation and associated synoptic patterns over the southern iberian peninsula. *Journal of Hydrology*, 409(1–2), 497-511.
- Hirsch, R.M., Slack, J.R., Smith, R.A., Techniques of Trend Analysis for Monthly Water Quality Data, *Water Resources Research*, 18 (1), 107-121, 1982.

- Ibarra Benlloch, P. (2002). El medio natural de los pirineos: Límites y condicionantes para el desarrollo de actividades económicas. *Ager: Revista De Estudios Sobre Despoblación y Desarrollo Rural = Journal of Depopulation and Rural Development Studies*, (2), 9-42.
- Lana-Renault, N., Latron, J., Karssenberg, D., Serrano-Muela, P., Regüés, D., & Bierkens, M. F. P. (2011). Differences in stream flow in relation to changes in land cover: A comparative study in two sub-mediterranean mountain catchments. *Journal of Hydrology*, 411(3–4), 366-378.
- Lana-Renault, N., Latron, J., & Regüés, D. (2007). Streamflow response and water-table dynamics in a sub-mediterranean research catchment (central pyrenees). *Journal of Hydrology*, 347(3–4), 497-507.
- Lespinas, F., Ludwig, W., & Heussner, S. (2014). Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology*, 511(0), 403-422.
- Limones Rodríguez, N., & Pita López, M. F. (2013). *El estudio de la sequía hidrológica en el mediterráneo español: Propuesta de aplicación del índice estandarizado de sequía pluviométrica a las aportaciones hídricas*
- López-Moreno, J. I., Beniston, M., & García-Ruiz, J. M. (2008). Environmental change and water management in the pyrenees: Facts and future perspectives for mediterranean mountains. *Global and Planetary Change*, 61(3–4), 300-312.
- López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S. M., Zabalza, J., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., et al. (2013). Hydrological response to climate variability at different time scales: A study in the ebro basin. *Journal of Hydrology*, 477(0), 175-188.
- López-Moreno, J. I., Zabalza, J., Vicente-Serrano, S. M., Revuelto, J., Gilaberte, M., Azorin-Molina, C., et al. (2014). Impact of climate and land use change on water availability and reservoir management: Scenarios in

the upper aragón river, spanish pyrenees. *Science of the Total Environment*, 493(0), 1222-1231.

Lorenzo Lacruz, J. (2012). In Vicente Serrano S. M. (Ed.), *Las sequías hidrológicas en la península ibérica: Análisis y caracterización espacio temporal, influencias climáticas y el efecto de la gestión hidrológica en un contexto de cambio global*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza, Prensas de la Universidad.

Lorenzo-Lacruz, J., Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2012). Recent trends in iberian streamflows (1945–2005). *Journal of Hydrology*, 414–415(0), 463-475.

Ludwig, W., Serrat, P., Cesmat, L., & Garcia-Esteves, J. (2004). Evaluating the impact of the recent temperature increase on the hydrology of the têt river (southern france). *Journal of Hydrology*, 289(1–4), 204-221.

Marcos Valiente, O. (2001). Sequía: Definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. *Investigaciones Geográficas*, (26), 59-80.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2), 202-216.

Núñez, J., Rivera, D., Oyarzún, R., & Arumí, J. L. (2014). On the use of standardized drought indices under decadal climate variability: Critical assessment and drought policy implications. *Journal of Hydrology*, 517(0), 458-470.

Pita López, M. F. (1989). La sequía como desastre natural: Su incidencia en el ámbito español. *Norba.Revista De Geografía*, (6), 31-62.

Prats, A. G. (2006). *Sequías: Teoría y prácticas* Editorial Universitat Politècnica de València.

Senatore, A., Mendicino, G., Smiatek, G., & Kunstmann, H. (2011). Regional climate change projections and hydrological impact analysis for a

mediterranean basin in southern italy. *Journal of Hydrology*, 399(1–2), 70-92.

Vicente Serrano, S.M. y Cuadrat, J.M. (2002). Desarrollo de un método analítico para la obtención del SPI (Standardized Precipitation Index) como herramienta para el seguimiento prevención de sequías climáticas. Comunicación oral. VII Reunión nacional de Climatología. Albarracín (Teruel).

Vicente-Serrano, S., & López-Moreno, J. I. (2005). Hydrological response to different time scales of climatological drought: An evaluation of the standardized precipitation index in a mountainous mediterranean basin. *Hydrol.Earth Syst.Sci.*, 9(5), 523-533.

Vrochidou, A. - K., Tsanis, I. K., Grillakis, M. G., & Koutroulis, A. G. (2013). The impact of climate change on hydrometeorological droughts at a basin scale. *Journal of Hydrology*, 476(0), 290-301.

Los recursos online a los que se ha accedido se pueden destacar a continuación:

[1] Base de datos Hidro – Anuario de Aforos del CEDEX (Centro de Estudios Hidrográficos) – Descarga de series de caudal de estaciones de aforo  
<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/default.asp>

[2] Banco de datos HYDRO – Descarga de series de caudal de estaciones de aforo  
<http://www.hydro.eaufrance.fr/>

[3] GeoPortal Sitebro – descarga de geodatos (capas vectoriales sobre la cuenca del Ebro)  
<http://iber.chebro.es/geoportal/>

[4] Centro Nacional de Información Geográfica – descarga de Modelo de Digital de Elevaciones (MDE)  
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/>

[5] Servicio de descargas del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (Gobierno de España) – descarga de geodatos (capas vectoriales sobre red hidrográfica, embalses...)  
<http://servicios2.magrama.es/sia/visualizacion/descargas/mapas.jsp>

[6] Shapefile des regions au niveau departemental – descarga de geodatos sobre las regiones francesas  
<http://www.actualitix.com/shapefile-des-regions-au-niveau-departemental.html>

[7] Instituto Geográfico Nacional – descarga de geodatos sobre usos del suelo (Corine Land Cover)  
<http://www.ign.es/ign/layoutIn/corineLandCover.do>

[8] Base de datos Geográfica del Ministerio de Ecología, Desarrollo Sostenible y Energía francés – descarga de geodatos sobre usos del suelo (Corine Land Cover)  
<http://clc.developpement-durable.gouv.fr/>

[9] Información sobre el río Irati elaborada por Mastergeo y CheEbro  
<http://www.chebro.es/contenido.streamFichero.do?idBinario=12514>

[10] Descarga de geodatos – cursos de agua y red hidrográfica francesa  
<http://services.sandre.eaufrance.fr/telechargement/geo/BDCarthage/FXX/2012/arccgis/FranceEntiere/>

[11] Información sobre Índices de Sequía  
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/4098/Capitulo3.pdf>

[12] Información sobre el Índice de Precipitación Estandarizado de Sequía  
[http://www.cricyt.edu.ar/paleo/es/drought/drght\\_spi.html](http://www.cricyt.edu.ar/paleo/es/drought/drght_spi.html)

[13] Información sobre Indicadores Meteorológicos (MAGRAMA)  
[http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/ind\\_meteo\\_\\_tcm7-197213.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/observatorio-nacional-de-la-sequia/ind_meteo__tcm7-197213.pdf)

[14] Libro Blanco del Agua (MAGRAMA)  
[http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/sintesis\\_tcm7-28955.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/planificacion-hidrologica/sintesis_tcm7-28955.pdf)

[15] Publicación Global Water Partnership sobre que es una Cuenca Hidrológica  
[http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm\\_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca\\_hidrologica.pdf](http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/Cuenca_hidrologica.pdf)

[16] Observatorio Pirenaico del Cambio Climático  
<http://www.opcc-ctp.org>

*Nota: las direcciones de Internet que aparecen en esta bibliografía están revisadas y accedidas a fecha 28/08/2014.*

## 9. ANEXOS

### Resultados del análisis de tendencias - CAUDALES

			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	enero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,003	-,118	-,048	-,115	-,194	-,004	,054	-,020	,026	-,140	
		Sig. (bilateral)		,970	,179	,584	,191	,028	,960	,538	,834	,765	,111	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	febrero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,017	-,144	-,213	-,140	-,187	-,055	,028	-,076	-,029	-,083	
		Sig. (bilateral)		,842	,100	,015	,110	,033	,534	,746	,430	,742	,344	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	marzo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,137	-,162	-,349	-,082	-,073	,013	,003	,002	-,057	-,114	
		Sig. (bilateral)		,120	,065	,000	,351	,408	,881	,970	,984	,518	,193	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	abril
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,033	-,149	-,214	-,062	-,114	,023	,118	,063	-,098	-,060	
		Sig. (bilateral)		,709	,091	,015	,478	,193	,794	,181	,496	,263	,494	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	mayo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,102	-,024	-,238	,025	-,096	,040	,159	,090	-,121	-,071	
		Sig. (bilateral)		,247	,784	,007	,775	,273	,645	,071	,310	,169	,419	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	junio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,230	-,098	-,444	-,192	-,200	-,164	-,083	-,269	-,249	-,206	
		Sig. (bilateral)		,009	,263	,000	,028	,023	,062	,347	,002	,005	,019	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	julio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,176	-,166	-,356	-,235	-,342	-,256	-,235	-,481	-,208	-,143	
		Sig. (bilateral)		,045	,059	,000	,007	,000	,004	,007	,000	,018	,104	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	agosto
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,160	-,232	-,130	-,196	-,303	-,198	-,164	-,430	-,140	-,158	
		Sig. (bilateral)		,069	,008	,139	,026	,001	,024	,063	,000	,111	,072	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	septiembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,149	-,077	-,054	-,156	-,274	-,150	-,081	-,400	-,088	-,161	
		Sig. (bilateral)		,091	,380	,542	,075	,002	,087	,357	,000	,316	,067	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	octubre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,091	-,008	,050	-,196	-,157	-,072	,107	-,060	,038	-,171	
		Sig. (bilateral)		,302	,931	,567	,026	,075	,415	,223	,501	,663	,051	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	noviembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,001	-,004	-,064	-,176	-,136	-,095	,014	-,002	-,015	-,058	
		Sig. (bilateral)		,990	,960	,463	,045	,121	,279	,876	,980	,862	,509	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	diciembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,013	-,121	-,068	-,175	-,184	-,060	,050	-,049	-,028	-,133	
		Sig. (bilateral)		,881	,167	,440	,046	,036	,498	,571	,602	,746	,129	
	N		61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	

## Resultados del análisis de tendencias – PRECIPITACIONES

			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	enero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,025	-,025	,020	,078	,054	-,012	,108	,089	,016	-,089	
		Sig. (bilateral)		,779	,775	,823	,374	,542	,891	,218	,313	,852	,310	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	febrero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,167	-,057	-,117	-,089	-,058	-,069	-,039	-,011	-,105	-,045	
		Sig. (bilateral)		,057	,518	,183	,313	,509	,433	,654	,901	,232	,605	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	marzo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,172	-,012	-,111	,007	,033	,027	-,036	,055	-,094	-,013	
		Sig. (bilateral)		,051	,891	,204	,940	,709	,756	,681	,534	,284	,886	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	abril
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,102	,086	,125	,077	,067	,026	,216	,234	,104	,001	
		Sig. (bilateral)		,247	,325	,156	,384	,448	,765	,014	,008	,237	,990	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	mayo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,032	,023	-,011	,133	,132	,095	,149	,133	,048	,025	
		Sig. (bilateral)		,718	,794	,901	,129	,132	,279	,091	,129	,584	,775	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	junio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,219	-,050	-,129	-,038	-,054	-,157	-,079	-,038	-,131	-,036	
		Sig. (bilateral)		,013	,567	,142	,663	,542	,073	,370	,663	,135	,681	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	julio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,043	,007	,043	-,046	-,174	-,043	-,016	,025	,038	,085	
		Sig. (bilateral)		,627	,940	,627	,601	,048	,627	,852	,775	,663	,332	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	agosto
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,098	-,011	-,044	-,073	-,101	-,105	-,019	-,037	-,042	-,069	
		Sig. (bilateral)		,263	,901	,619	,404	,252	,232	,832	,672	,636	,429	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	septiembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,013	,011	,035	,034	,021	-,060	-,003	,005	,004	,036	
		Sig. (bilateral)		,881	,901	,690	,700	,813	,494	,970	,950	,960	,886	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	octubre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,173	,067	,190	,127	,009	,011	,175	,166	,197	-,043	
		Sig. (bilateral)		,049	,448	,030	,149	,921	,901	,046	,059	,025	,627	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	noviembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,031	,126	,082	,037	,095	,105	,143	,187	,060	,074	
		Sig. (bilateral)		,727	,152	,351	,672	,279	,232	,103	,033	,494	,397	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ARA	9066_IRATI	9018_ARAGÓN	9021_SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	diciembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	-,083	-,073	-,047	-,144	-,133	-,127	,010	-,007	,001	-,147	
		Sig. (bilateral)		,344	,404	,593	,100	,129	,149	,911	,940	,990	,094	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	

## Resultados del análisis de tendencias – TEMPERATURA

			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	enero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,199	,058	,070	,133	,155	-,087	,064	,064	,151	,082	
		Sig. (bilateral)		,024	,509	,426	,130	,077	,319	,467	,467	,086	,351	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	febrero
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,152	,008	,093	,141	,052	-,010	,126	,126	,145	,053	
		Sig. (bilateral)		,084	,931	,290	,108	,550	,911	,151	,151	,098	,550	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	marzo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,211	,039	,116	,154	-,038	,026	,109	,109	,162	,097	
		Sig. (bilateral)		,016	,654	,187	,080	,663	,765	,215	,215	,065	,273	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	abril
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,188	,071	,044	,188	-,072	,048	,158	,158	,175	,141	
		Sig. (bilateral)		,032	,419	,619	,032	,411	,588	,073	,073	,046	,110	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	mayo
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,160	,132	,095	,167	-,139	,069	,091	,091	,164	,137	
		Sig. (bilateral)		,069	,132	,279	,057	,114	,433	,301	,301	,062	,120	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	junio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,294	,140	,256	,329	-,079	,196	,289	,289	,304	,233	
		Sig. (bilateral)		,001	,111	,004	,000	,370	,026	,001	,001	,001	,008	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	julio
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,271	,105	,214	,287	-,222	,108	,229	,229	,270	,193	
		Sig. (bilateral)		,002	,232	,015	,001	,012	,218	,009	,009	,002	,028	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	agosto
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,295	,141	,202	,307	-,099	,122	,254	,254	,280	,298	
		Sig. (bilateral)		,001	,108	,021	,000	,260	,163	,004	,004	,001	,001	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	septiembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,071	-,061	,010	,070	-,275	-,123	,055	,055	,069	,029	
		Sig. (bilateral)		,419	,490	,911	,426	,002	,160	,534	,534	,433	,746	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	octubre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,189	,073	,092	,198	-,025	,031	,222	,222	,248	,125	
		Sig. (bilateral)		,031	,408	,293	,024	,775	,727	,012	,012	,005	,156	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	noviembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,035	-,027	,026	,077	-,066	-,073	,037	,037	,099	,043	
		Sig. (bilateral)		,690	,756	,765	,384	,455	,404	,677	,677	,257	,627	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	
			año	9040 _ ARA	9066 _IRATI	9018 _ARAGÓN	9021 _SEGR E	Y1012010	O0362510	O0126210	O0105110	Q6332510	Q9164610	diciembre
tau_b de Kendall	año	Coefficiente de correlación	1,000	,046	-,084	,007	,115	,010	-,173	,004	,004	,069	-,020	
		Sig. (bilateral)		,601	,338	,940	,189	,911	,049	,965	,965	,433	,818	
		N	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61	