

# **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

## **ANÁLISIS DE LA CONCENTRACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN EN EL VALLE DEL EBRO EN EL PERÍODO 1981-2010**

***Autor: Manuel Porquet Pardina***

***Director: Miguel Ángel Saz***

**Máster Universitario en  
Ordenación Territorial y Medioambiental**

**Septiembre 2012**



**Universidad**  
Zaragoza

**Departamento de Geografía  
y Ordenación del Territorio**



## Resumen

En el presente trabajo se han estudiado los totales de precipitación y su concentración en la Cuenca del Ebro durante el periodo 1981-2010, su distribución geográfica y su variabilidad temporal, a partir del dato diario de precipitación proveniente de la base de datos de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Los resultados sugieren un aumento del número de días de precipitación en toda la Cuenca, mientras que respecto al total de precipitación, se observa un aumento suave en el sector SW y el Pirineo Aragonés Oriental, y un descenso también poco pronunciado en el resto de la Cuenca. A escala estacional existen importantes diferencias, siendo los descensos más acusados en verano y las tendencias al alza más destacadas en primavera.

**Palabras clave:** concentración de la precipitación, Cuenca del Ebro, precipitación diaria

## Abstract

Total precipitation and daily rainfall concentration has been analyzed in the Ebro Basin (NE of Spain), using daily data of the Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), during the period 1981-2010. Results suggest the increase of number of days of precipitation throughout the basin, while the total amount of precipitation increases softly in the SW sector and the Pirineo Aragonés, and decreases in the rest of the study area. On a seasonal scale, there are some differences: summer shows a precipitation decreasing, opposite to the one produced in Spring

**Key words:** rainfall concentration, Ebro Basin , daily rainfall

## Índice

1. Introducción .....	pág. 5
2. Objetivos.....	pág. 7
3. Datos y metodología .....	pág. 8
3.1. Datos.....	pág. 8
3.2. Selección de observatorios .....	pág. 9
3.3. Depurado y relleno de los datos .....	pág. 11
3.3.1 Extracción y clasificación por observatorios. ....	pág. 11
3.3.2 Datos acumulados o inapreciables. ....	pág. 11
3.3.3 Completado del calendario de las series. ....	pág. 12
3.3.4 . Ausencia de series pluviométricas completas en el sector noreste para el periodo de estudio. ....	pág. 13
3.3.5 Relleno de lagunas. ....	pág. 14
3.4. Métodos cartográficos.....	pág. 16
3.4.1 Método de interpolación Inverso a la distancia (IDW). ....	pág. 16
3.4.2 Método de interpolación Kriging. ....	pág. 17
3.4.3 Modelización espacial de la precipitación total a partir de regresión múltiple por pasos y corrección de residuales.....	pág. 19
3.5. Resumen del software utilizado.....	pág. 21
4. Resultados.....	pág. 22
4.1. Variabilidad espacial de la precipitación anual y estacional, y estudio de sus tendencias .....	pág. 22
4.2. Cuantificación de los días de precipitación anual y estacional, y su variabilidad temporal .....	pág. 33
4.3. Estudio de la variabilidad espacial sobre los percentiles 80 y 90 de precipitación, así como su tendencia temporal.....	pág. 42
4.4. Análisis sobre el porcentaje que, sobre el total, representan los máximos de precipitación diaria, y su evolución.....	pág. 45

5.	Discusiones.....	pág. 47
6.	Conclusiones.....	pág. 48
7.	Agradecimientos.....	pág. 50
8.	Bibliografía .....	pág. 51
9.	Anexos.....	pág. 52

## 1. INTRODUCCIÓN

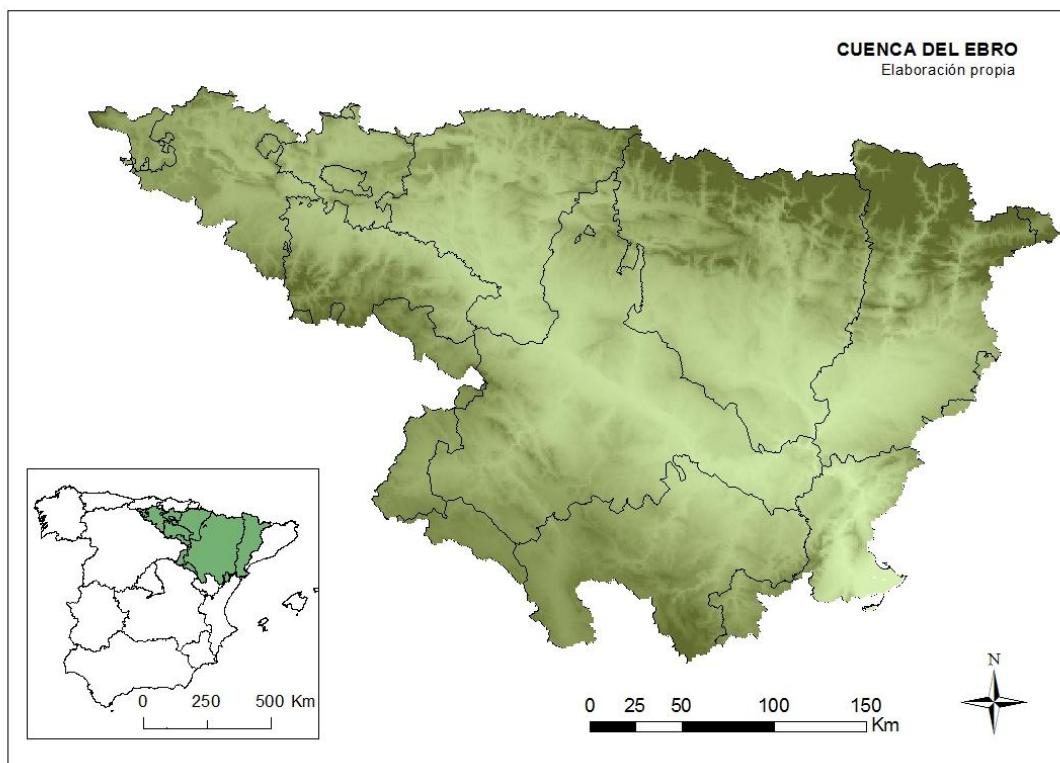
La precipitación de la Cuenca del Ebro presenta una gran heterogeneidad debido a su gran extensión, a la configuración del relieve, opuesto en muchas ocasiones a los flujos de vientos dominantes y a la influencia de dos mares, el Cantábrico y el Mediterráneo, y dos continentes, África y el continente euroasiático, de características muy contrastadas.

A grandes rasgos se pueden diferenciar tres zonas en cuanto a las características de su pluviometría:

- i. Zona Cantábrica: con precipitaciones abundantes durante todo el año condicionadas por el paso más frecuente de borrascas asociadas al frente polar a la disposición periférica del relieve.
- ii. Depresión Central, que ocupa el 80% de la superficie de la Cuenca, con precipitaciones escasas debido al efecto barrera que condiciona el relieve y un régimen equinoccial;
- iii. Zona Mediterránea, con precipitaciones equinocciales pero con un marcado máximo otoñal.

Estas tres zonas son consecuencia de la interacción de dos series de factores que actúan a distinta escala: por un lado la dinámica atmosférica propia de las latitudes medias, y por otro la influencia que sobre ella ejerce una disposición orográfica compuesta por relieves pronunciados en los extremos (alturas superiores a los 3.000 m en el Pirineo) y un amplio sector deprimido en el interior.

La Cuenca del Ebro se encuentra, por su latitud, en el límite meridional del dominio templado, en la zona de circulación de vientos del oeste, y próximo a la zona de altas presiones subtropicales. Esto conlleva que la Cuenca quede dominada la mayor parte del año por los mecanismos propios del área templada (masas de aire polar y borrascas atlánticas con sus frentes asociados), mientras que conforme se aproximan los meses estivales, se aprecia una disminución de esta influencia con el progresivo dominio de las masas de aire cálido de las regiones subtropicales.



**Figura 1:** Localización de la Cuenca del Ebro

Por su parte, la disposición orográfica también tiene una influencia muy relevante en la distribución de las precipitaciones. La acción de bloqueo que ejercen las montañas periféricas es particularmente eficaz al paso de las depresiones procedentes del Atlántico. Con frecuencia se observa cómo las perturbaciones de este tipo provocan intensas lluvias en la cordillera pirenaica y en la divisoria cantábrica, que disminuyen conforme atraviesan Navarra y La Rioja, y que llegan debilitadas y con precipitaciones casi nulas al centro de la depresión de la cuenca.

En resumen, la combinación de factores atmosféricos y geográficos da como resultado una amplia gama de ambientes pluviométricos y una variabilidad climática que hace que estén presentes desde climas secos de carácter estepario en el sector central a húmedos en los Pirineos.

Esa heterogeneidad pluviométrica y el intenso uso que en la cuenca se le da al recurso agua, con las implicaciones económicas que ello supone, obligan a tener el mejor conocimiento posible de su comportamiento. La mayor parte del agua utilizada en la cuenca proviene de la precipitación, por lo que su estudio resulta fundamental. Como fundamental es referirse para ello al periodo más reciente posible. Aproximaciones a esta variable se han hecho para el periodo 1961-90 y 1971-2000, ambos periodos normales según la OMM pero no referidos a lo que podríamos calificar de clima actual. Es por ello que en este trabajo se aporta información sobre el periodo climático normal más reciente posible, el 1981-2010, representativo del clima actual y periodo en el que algunas de las variaciones en el clima señaladas por los dos primeros informes del IPCC deberían ya de manifestarse.

En relación con esa necesidad para la gestión, las aplicaciones que este trabajo ofrece pueden darse en distintos campos de la ordenación del territorio. Por ejemplo, con respecto a la ya señalada gestión del agua como recurso, el tener un mayor conocimiento de la distribución (tanto temporal como espacial) de las precipitaciones, así como de su variabilidad temporal, puede dar información útil en la toma de decisiones relacionadas con este tema, como pueden ser la planificación de obras hidráulicas. Por otra parte, la intensidad de las precipitaciones está directamente relacionada con la erosión. Este hecho es importante en la planificación y ordenación del territorio, a la hora de conocer zonas más proclives a sufrir precipitaciones intensas que puedan alterar la geomorfología de una zona a corto plazo, la regeneración post-incendio o los riesgos asociados con los eventos de inundación o las sequías.

## **2. OBJETIVOS DEL TRABAJO**

El objetivo general del trabajo comprende el **análisis de la concentración de la precipitación en la Cuenca del Ebro, su comportamiento y su distribución espacial en el periodo 1981-2010.**

Para llegar a este objetivo principal, se han descrito también una serie de objetivos parciales o secundarios, como son:

1. el estudio de la **variabilidad espacial de la pluviometría** anual y estacional, y la posible presencia de **tendencias** en el periodo de referencia considerado
2. la cuantificación del **número de días de precipitación** a nivel anual y estacional, su reparto espacial y su variabilidad temporal
3. el análisis específico de la **concentración según el estudio de los percentiles** 80 y 90, así como su tendencia temporal
4. el análisis específico de la **concentración según los diez máximos** de precipitación diaria, su plasmación espacial y su evolución durante los últimos 30 años
5. identificar la posible relación entre la **distribución de la precipitación y circulación general atmosférica**

### **3. DATOS Y METODOLOGÍA**

#### **3.1 Datos**

Los datos utilizados para la realización de este proyecto proceden del Banco Nacional de Datos Climatológico de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), todos ellos en formato digital y para el periodo 1981-2010.



**Figura 2: Estación meteorológica en La Almunia (Zaragoza). A la izquierda el pluviómetro que recoge las precipitaciones.**

Los datos registrados por los observadores son enviados a AEMET mediante tarjetas, como la de la figura 3, donde aparecen los valores obtenidos en el pluviómetro de la estación manual. Los datos son posteriormente digitalizados por personal de AEMET a partir de esas tarjetas. En el caso de las automáticas, ese dato va directamente al banco nacional.

Debido al volumen de datos que era preciso utilizar para este trabajo, en el que recordemos se aborda la pluviometría diaria de toda la Cuenca del Ebro (más de 1.500.000) la extracción de los mismos desde la base de datos de AEMET se efectuó de forma fraccionada con objeto de no colapsar el servidor. Para ello se dividió la descarga según los periodos: 1981-87, 1988-93, 1994-98, 1999-04 y 2005-10.

Día	PRECIPITACIÓN mm	METEOROS OBSERVADOS			VIENTO DOMINANTE	Número de la Estación Audiencia Boltaña
		m	r	n		
1						
2						
3						
4	275	R	R	A		
5	510					
6		R				
7			R			
8	131	R	G			
9	140	R	G			
10					287-3	
11						
12						
13						
14	143	R	R	R		
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
31						
Precipitación total del mes						3015 mm
Suma						143
DIAS PRECIPITACIÓN						
< 0,1 (p.)						
> 0,1						
> 1,0						
> 10,0						
> 30,0						
PRECIPITACIÓN MAXIMA EN UN DÍA						225 mm. dia 5
Viento dominante						
En los días de lluvia						
En el día de más lluvia						

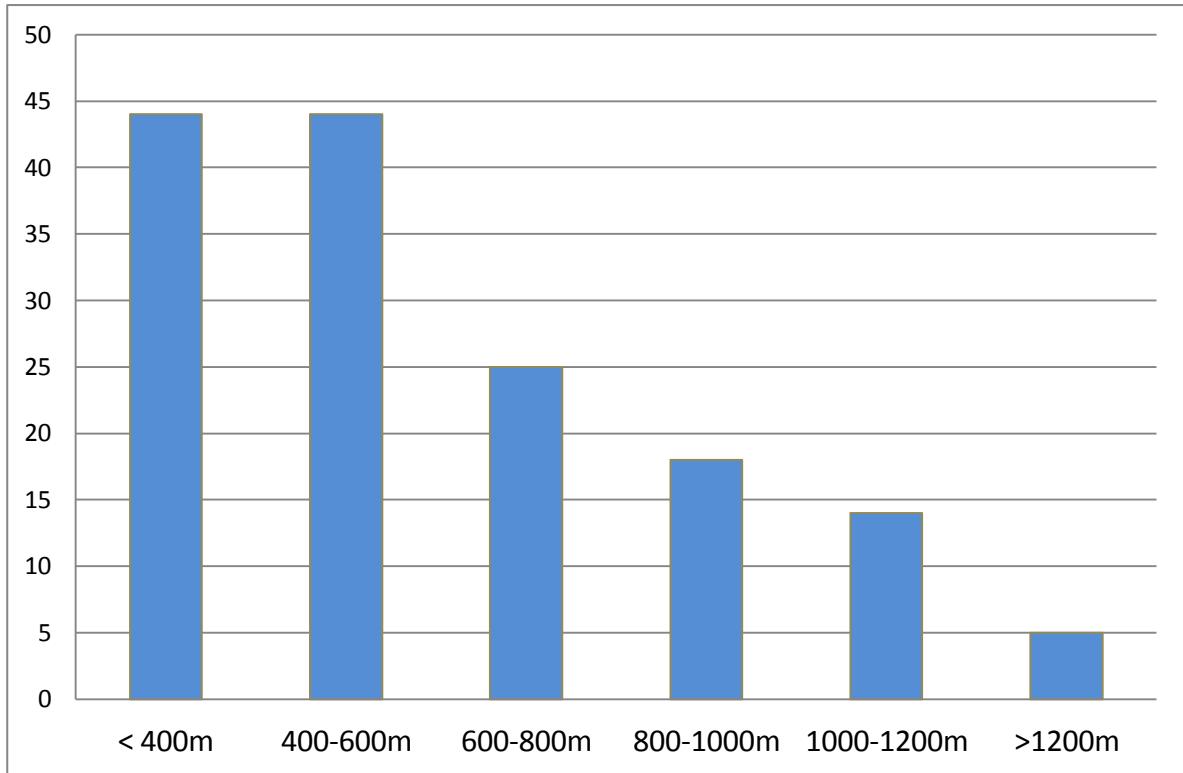
Figura 3: Tarjeta para el observatorio de Boltaña, Julio 2001

### 3.2 Selección de observatorios

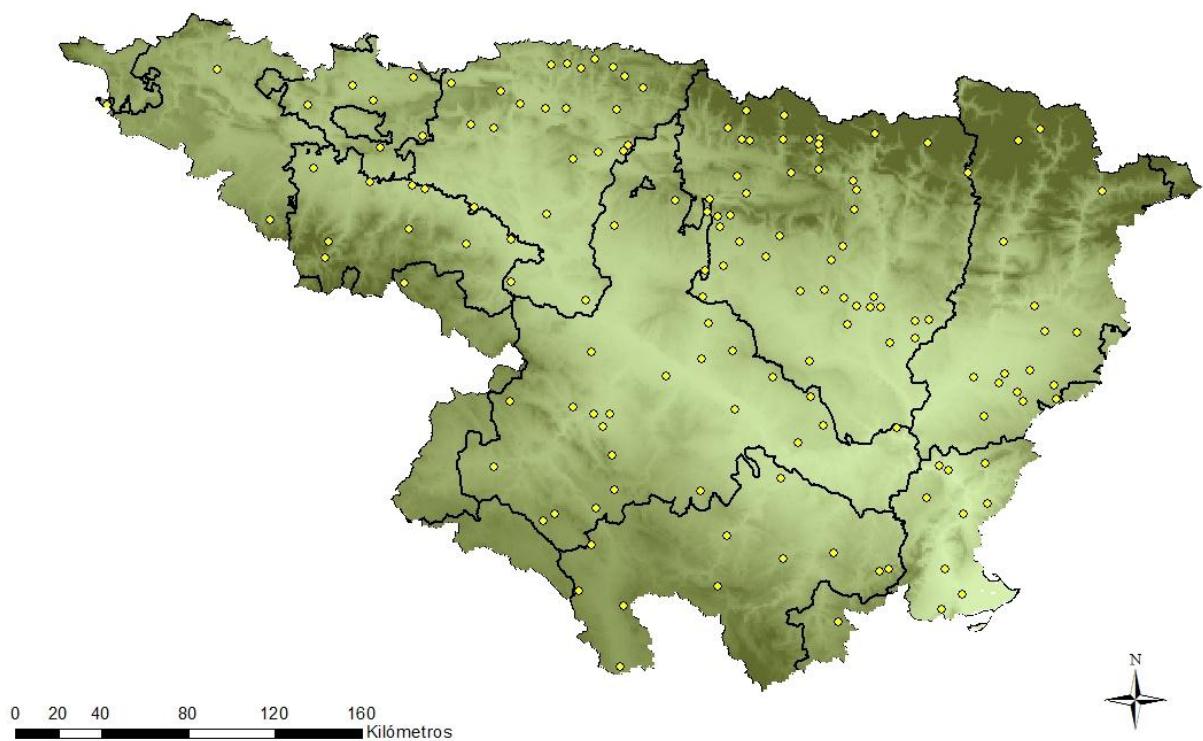
Para la selección de observatorios se tuvieron en cuenta dos aspectos: la continuidad de las series y su distribución geográfica. En relación al primero de ellos se realizó un filtrado de la base de datos de AEMET, de forma que se seleccionaran únicamente observatorios con datos de, como mínimo, 350 meses sobre los 360 que forman los treinta años del periodo de estudio. El objetivo era el de minimizar en lo posible el proceso de relleno de lagunas, trabajando con datos reales medidos por el observador y no con datos modelizados a partir de cualquier algoritmo de relleno. Este proceso puede difuminar la presencia de valores extremos en las series, fundamentales para el objeto de nuestro trabajo.

Tras esta primera selección, se obtuvieron hasta 145 observatorios, si bien en su distribución geográfica se observó una zona en el noreste de la cuenca, al norte de la provincia de Lérida, con una cobertura espacial de observatorios muy escasa. Para solventar este problema, se seleccionaron 5 observatorios más para ese sector, rebajando la exigencia de calidad en cuanto al número de meses disponibles, y se realizó una reconstrucción de sus series (ver punto 3.3.4).

El resultado final es una base de datos brutos diarios de precipitación para el periodo 1981-2010 compuesta por 150 observatorios (Anexo 1), lo que nos da una cobertura espacial de un observatorio por cada 6,36 km<sup>2</sup>, y una altura media para cada observatorio de 595 metros sobre el nivel del mar, con valores que van desde los 8 metros en la estación de Amposta hasta los algo más de 1900 metros en Sant Maurici.



**Figura 4:** Distribución de las alturas según el número de observatorios



**Figura 5:** Localización de los 150 observatorios empleados

### **3.3 Depuración de datos y relleno de lagunas**

En este proceso se pretende obtener una base de datos final continua, es decir, de datos diarios de precipitación para todos los días del periodo 1981-2010, libre de falsos 0 y de valores extremos que no se correspondan con la realidad de la precipitación caída.

### 3.3.1 Extracción y clasificación por observatorios

El formato original de la información del Banco Nacional de Datos de AEMET aparece en la fig 6. Como se ha comentado anteriormente, la información está recogida en cinco partes distintas, cada una de ellas con la información diaria de cada uno de los 145 observatorios para los períodos 1981-87, 1988-93, 1994-98, 1999-04 y 2005-10.

**Figura 6:** Una de las fracciones de los datos originales al extraerse de la base de datos de AEMET.

La organización preliminar de esta base de datos original supone un notable esfuerzo, ya que han de separarse individualmente los datos de cada observatorio (150 en total) y de cada periodo, habiéndose de generar una nueva base de datos con esa información organizada en el tiempo y en el espacio. El proceso llevó a la detección de fallos en estaciones presuntamente completas, ya que no en todos los casos se disponía del total de 10.957 días, aspecto que la selección original de datos desde ORACLE no había detectado, y que se solucionó según el apartado 3.3.3.

### 3.3.2 Datos acumulados o inapreciables

Los datos diarios de precipitación se almacenan en décimas de litro. Sin embargo, la base de datos contiene valores “-3” y “-4” que evidentemente no son registros de precipitación, sino códigos empleados por AEMET para señalar en el primer caso precipitaciones inapreciables, y en el segundo valores acumulados en una fecha posterior.

Los valores “-3” se refieren así a lluvias inferiores a 0’1 litros. Esos días no se codificaron como días en los que se registró precipitación, puesto que se considera como día de precipitación aquel que registra más de 0’1 litros. Pero ese valor de -3 se sustituyó por 0,01 litros de forma que los valores negativos no afectasen al volumen total registrado a lo largo del año, sin que por otra parte lo pudiera incrementar de forma tangible. Apenas un tercio del total de observatorios contaban con valores de este tipo, con cantidades que van desde un 2% hasta un 8% total de los datos.

Como hemos señalado, los valores “-4” indican datos que se acumulan en una fecha posterior. El problema es que el valor registrado al final de esa sucesión de -4 no refleja la precipitación caída ese día concreto, sino que se trata de la precipitación acumulada durante los días anteriores.

Para corregir este problema se optó por distintas alternativas, que requerían de un análisis individual de cada dato problema:

1. Para estaciones con no más de 20 casos, se comprueban uno a uno cada uno de los datos problema a partir de los registros diarios de las estaciones vecinas, entendiendo como tales las situadas a menos de 15 kilómetros.
  - a. Si en estas estaciones próximas no ha llovido, el valor “-4” se sustituye por un 0, y el dato de precipitación acumulado al final se mantiene.
  - b. Si en las estaciones vecinas ha llovido menos de 1'5 mm, el dato “-4” se sustituye por 0'1 mm, de forma que se mantiene como día de precipitación, pero no se varía de forma significativa el total acumulado en esos días.
  - c. Sin embargo, a diferencia de los dos casos anteriores, si los “-4” coinciden con varios días de lluvia en las estaciones vecinas, se eliminan y se dejan como laguna, eliminando también el dato final que acumula todos los valores. De esta forma serán rellenados posteriormente por el paquete estadístico R. Lo mismo se hace en el caso de dudas acerca de si ha llovido o no.
2. Para estaciones con más de 20 casos, éstos se eliminan directamente junto con el valor posterior, dejándose como lagunas a llenar más adelante.

Hasta 98 estaciones sobre el total contaban con uno o más valores “-4”, aunque en ningún caso este tipo de datos sobrepasan el 1% del total (no más de 109 fechas).

### 3.3.3 Completado del calendario de las series

Una vez depurados los valores “-3” y “-4”, y sin tener en cuenta la presencia o no de lagunas, se debería contar con un total de 10.957 datos por observatorio, uno por cada día del periodo de estudio.

Hasta 12 estaciones contaban con la serie totalmente completa. Sin embargo se observó que el resto aparecían con menos datos de los que correspondía. Mediante el programa informático Access se creó una tabla completa de 10.957 líneas con formato año/mes/fecha de forma que pudiera cotejarse uno por uno con todos los observatorios.

De esta forma las fichas de cada observatorio pudieron ser completadas al menos en su número total de días, a la espera de proceder al relleno de lagunas. Cabe destacar que la ausencia de fechas alcanzaba el 8% sobre el total en dos estaciones, mientras que en el resto rondaba entre el 0'5 y el 2% de los datos.

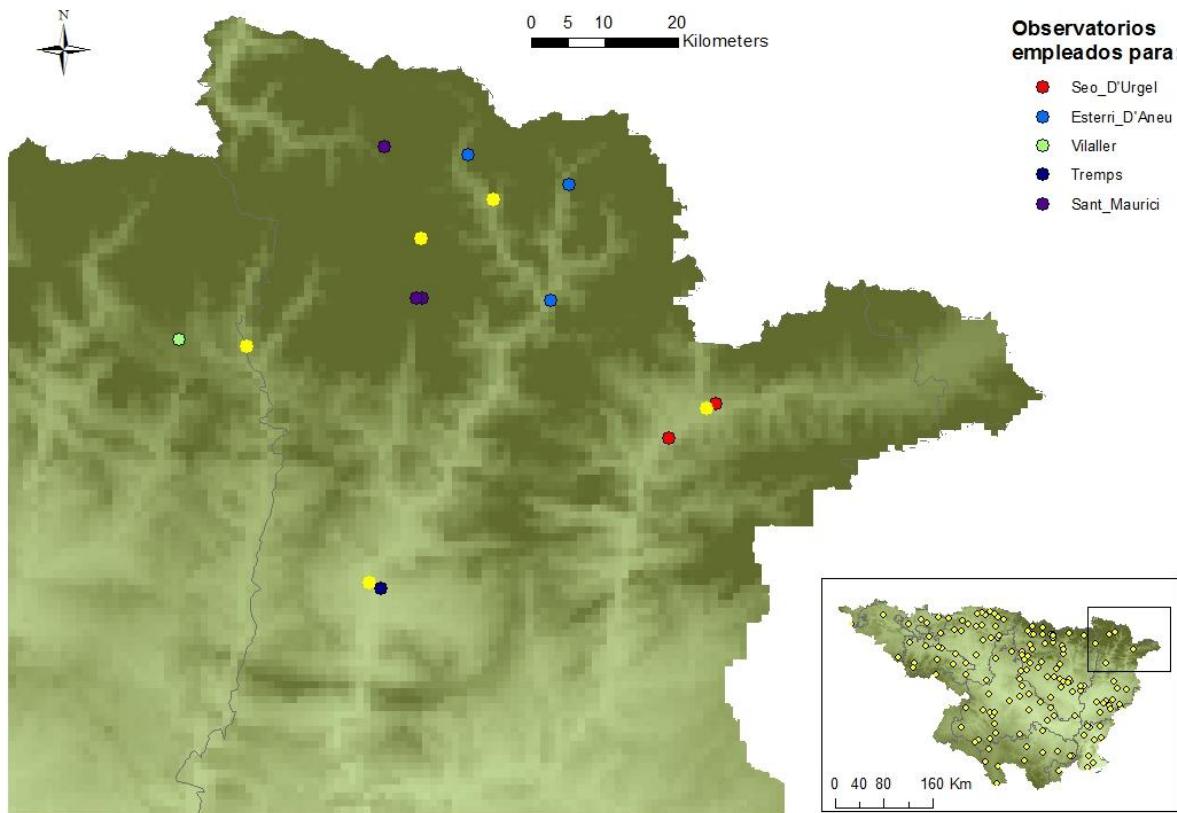
### 3.3.4. Ausencia de series pluviométricas completas en el sector noreste para el periodo de estudio

Como se ha comentado en el punto 2, al representar las 145 estaciones se observó una laguna geográfica en el sector noreste de la cuenca.

Tras la búsqueda sin éxito de observatorios con series lo suficientemente largas para esa zona, se optó por lo siguiente: a partir de varios conjuntos de observatorios muy cercanos entre sí, se escogió el que mayor número de datos contenía en cada uno de esos conjuntos (en todos los casos entre 7.000 y 9.000 datos sobre los 10.957 totales), y a partir de los observatorios cercanos se añadieron las fechas faltantes (Figura 7), teniendo en cuenta buscar la mayor cercanía (no más de 15km) y la menor diferencia de altura sobre el nivel del mar posible. De esta forma se obtuvieron datos para “La Seo D’Urgell”, “Esterri D’Aneu”, “Sant Maurici”, “Vilaller” y “Villamitjana-Tremps”. En la figura 8 se observa la situación de estos cinco observatorios, junto con las estaciones vecinas utilizadas, y el vacío geográfico que habría supuesto su ausencia de no haber sido empleados

Estación principal	Estaciones utilizadas	% de datos sobre el total
Sant Maurici	Sant Maurici	74%
	Estany - Gento	15%
	La Torre de Cabdella	1.5%
	Tredos (Baqueira)	1.5%
	(lagunas)	8%
Esterri d'Aneu	Esterri d'Aneu	71%
	Tavescan	15%
	Llavorri	8%
	Isil (Bonaigua)	6%
	(lagunas)	2%
Tremps (bomberos)	Tremps	60%
	Villamitjana	37%
	(lagunas)	3%
Vilaller	Vilaller	65%
	Las Paules	28%
	(lagunas)	7%
Seo d'Urgell	Seo d'Urgell + Seo d'Urgell (bomberos)	81%
	Adrall	9%
	(lagunas)	10%

**Figura 7:** Estaciones añadidas por medio de la unión de series de precipitación



**Figura 8:** Sección Noreste de la cuenca. En amarillo, cada una de las 5 estaciones de referencia, junto con las estaciones utilizadas para su relleno.

Una vez finalizado este proceso, se llevaron a cabo las mismas operaciones de depuración y completado de fechas faltantes comentadas en los puntos anteriores, completándose de esta forma el listado de 150 observatorios que se van a utilizar, si bien además en este caso se desarrolló un proceso de homogeneización.

### 3.3.5 Relleno de lagunas

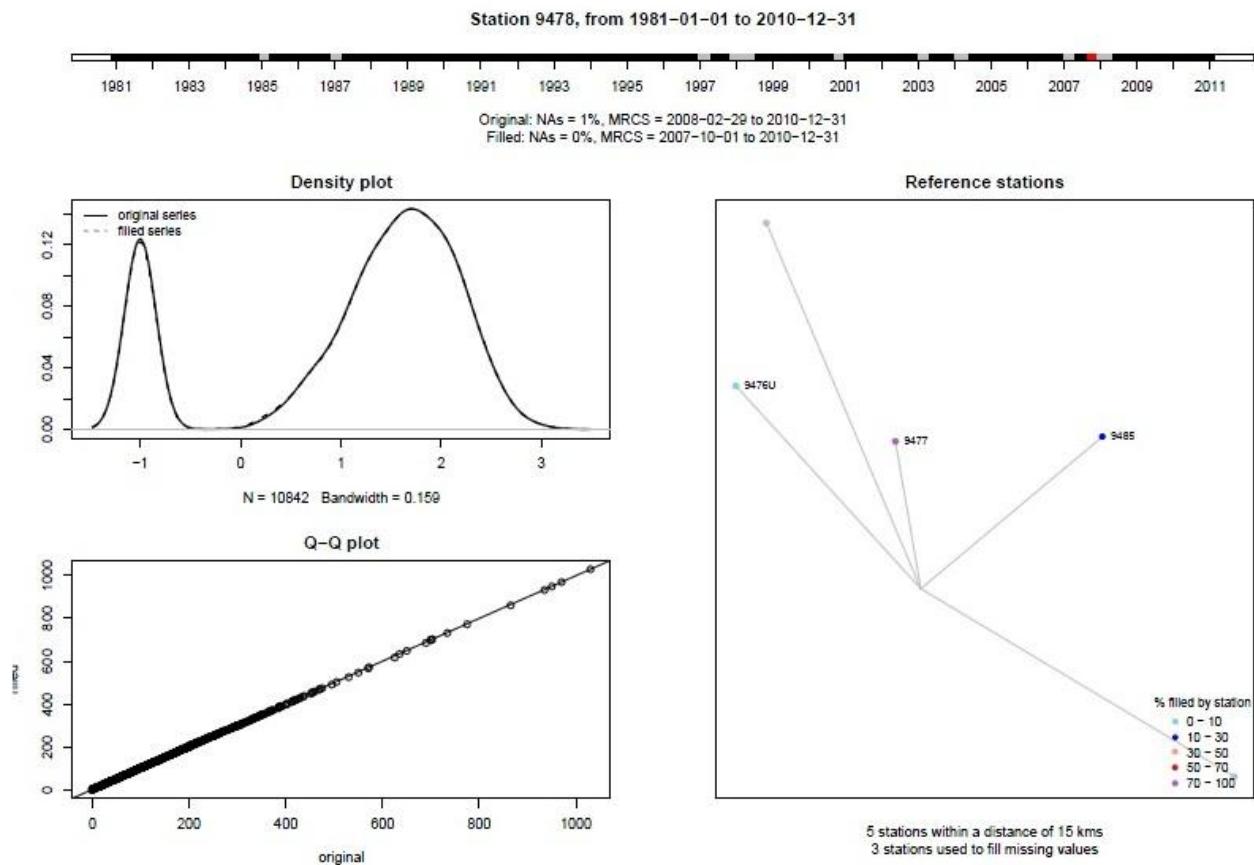
El relleno de lagunas se ha llevado a cabo mediante software R, a partir del proceso desarrollado por Beguería y Serrano (2012).

La secuencia metodológica de desarrollar ese script es la siguiente:

- El relleno de dato diario de las series candidatas se realiza a través de todas las series de referencia que se encuentren dentro del umbral de distancia definido (entre 10 y 40 km en función de la distancia de las estaciones vecinas).
- El dato faltante en la serie candidata es llenado en función de la serie de anomalías de las series de referencia en orden de distancia. Estas series de anomalías se calculan mediante una función de distribución empírica acumulada (*edcf*), de manera que se obtiene la posición relativa de cada dato cada día, en relación a la serie de tiempo completa para esa estación.
- Cuando se inserta el dato en el día faltante de la candidata no se inserta la anomalía o el dato de la referencia, sino que se ajusta con un kernel de regresión de Nadaraya-Watson (1964) que, básicamente, realiza un suavizado del dato a insertar para ponderarlo en la serie candidata en función de la anomalía de la referencia. (Anexo 2)

Conforme el programa va rellenando las lagunas de las estaciones, va creando una base de datos formada por fichas de cada una de las estaciones (figura 9) en la que aparecen reflejadas:

- en la parte superior, el número de lagunas originales, el número de lagunas rellenadas (ambas en una escala temporal),
- a la derecha, de forma gráfica, las estaciones de referencia utilizadas y el porcentaje de datos rellenados a partir de cada una de esas estaciones,
- y a la izquierda la relación entre la densidad de los puntos en la serie original con la serie rellenadas, y su ajuste mediante una gráfica Q-Q, que ofrece el diagnóstico de diferencias entre la distribución de probabilidad de los datos utilizados con los datos rellenos.



**Figura 9:** Ejemplo de una de las fichas individuales obtenidas tras el relleno de lagunas mediante R

Al final del proceso, se llenaron aproximadamente un total de 25.000 lagunas, lo que supone aproximadamente un 1'5% del total de los datos.

### 3.4. Cartografía de la información climática

Existen diferentes métodos para la realización de cartografías climáticas. La gran capacidad de cálculo de los actuales sistemas informáticos y la generalización de los Sistemas de Información Geográfica permite la realización de análisis encaminados a la estimación de los registros climáticos en aquellos puntos del espacio en los que no se dispone información, de forma que la información puntual registrada en los observatorios instrumentales podemos convertirla en superficies de información, bien como producto final o bien como capa que puede operar con otras en la realización de análisis que incluyan la variable clima como predictiva de otros fenómenos.

Entre estos métodos existen distintas opciones, que pueden clasificarse en métodos locales, donde únicamente se tienen en cuenta los datos de la variable climática registrada en los observatorios y los datos de los observatorios cercanos, y en métodos globales, que además de los datos de todos los observatorios de la zona de estudio, utilizan también información auxiliar de carácter geográfico y/o topográfico. Estas variables corresponden a capas en formato ráster obtenidas a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) o de diferentes procedimientos de análisis, fundamentalmente cálculo de distancias. Las variables independientes consideradas han sido la longitud, la latitud, la distancia al mar Mediterráneo, la distancia al mar Cantábrico, la elevación sobre el nivel del mar y la radiación solar incidente.

Para contar con las ventajas de ambos tipos de métodos y minimizar sus inconvenientes, es posible su combinación planteando un proceso mixto, en el que inicialmente se examinan las relaciones físicas entre los datos climáticos y diferentes variables geográficas y topográficas, y posteriormente se tiene en cuenta la correlación espacial entre la información recogida en los observatorios meteorológicos (Vicente-Serrano, et al. 2003)

#### 3.4.1 Método de interpolación Inverso a la distancia (IDW)

Para algunas cartografías, en especial para aquellas en las que se intentaba plasmar en el espacio las tendencias de distintas variables, se han aplicado métodos de modelización basados en el inverso a la distancia. La base de este método es que existe una autocorrelación espacial de los datos a cartografiar. Se trata de un método local, que estima el valor de la variable de un punto a partir de los puntos más cercanos en el espacio, es decir, mediante un promedio ponderado según la distancia a cada uno de los puntos muestreados de la zona de estudio..

Para proyectar el método expuesto se aplicó una función determinada para calcular el valor estimado; en donde  $Z(x_0)$  es el valor climático de una estación vecina;  $d_{ij}$  es la distancia entre  $z(x)$  y  $z(x_i)$ , y  $r$  es el exponente de la distancia

$$z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n z(x_i) \cdot d_{ij}^{-r}}{\sum_{i=1}^n d_{ij}^{-r}}$$

El exponente  $r$  es función del peso que se le atribuye a la distancia, es decir, cuanto mayor sea el exponencial, mayor será la importancia que se le atribuya a la distancia. El valor de  $r$  empleado se calculó mediante el Sistema de Información Geográfica (SIG) tratando de minimizar el error obtenido en la validación cruzada (Vicente-Serrano, et al. 2003).

### 3.4.2 Método de interpolación Kriging

En algunos casos, las cartografías obtenidas mediante IDW se compararon con otras desarrolladas mediante kriging. La cartografía final obtenida con ambos métodos no presenta diferencias espaciales significativas, seleccionándose aquella que en el proceso de validación cruzada mostrase un valor para el error cuadrático medio RMSE más bajo.

Los métodos geoestadísticos, que podríamos agrupar bajo la denominación genérica de kriging, han experimentado un notable avance en los últimos años gracias al desarrollo de los SIG y su potencialidad de cálculo. Se trata de métodos de interpolación complejos desde un punto de vista matemático, que si por algo vienen definidos es porque tratan de integrar en su proceso de cálculo aspectos relacionados con la variabilidad espacial de los datos.

Tratando de describir estos métodos de forma sencilla, podríamos decir que al igual que en otros casos de métodos de interpolación, la estimación de un valor en un punto se realizará a partir del valor de los puntos de observación vecinos, pero los pesos de ponderación se basarán no sólo en la distancia entre esos puntos, sino también en la relación espacial que se establece en el valor de estos puntos.

El espacio es bidimensional y, en general, un atributo con variaciones espaciales en su comportamiento no suele mostrar una dirección preferente en cuanto a su variación espacial. Además, teniendo en cuenta que disponemos de registros en un número limitado de puntos que podemos considerar infinito, encontramos que los procedimientos estadísticos habituales que como el IDW se basan en la media, la desviación o la covarianza, se muestran en general insuficientes para el tratamiento de los datos. Es así que en el análisis de las variaciones espaciales de los atributos medidos en distintos puntos de una red de muestreo se haya introducido un estadístico alternativo al que conocemos como semivariograma.

Un semivariograma es un procedimiento estadístico que trata de darnos una visión más completa de cuál es la estructura de la variabilidad espacial de un atributo medido sobre un conjunto limitado de datos en el espacio. Más en concreto, un semivariograma nos va a decir a partir del conjunto muestral hasta dónde llegaría, en distancia, la dependencia espacial de los datos, o lo que es lo mismo, hasta dónde existe relación estadística entre los datos medidos en los distintos puntos de la muestra.

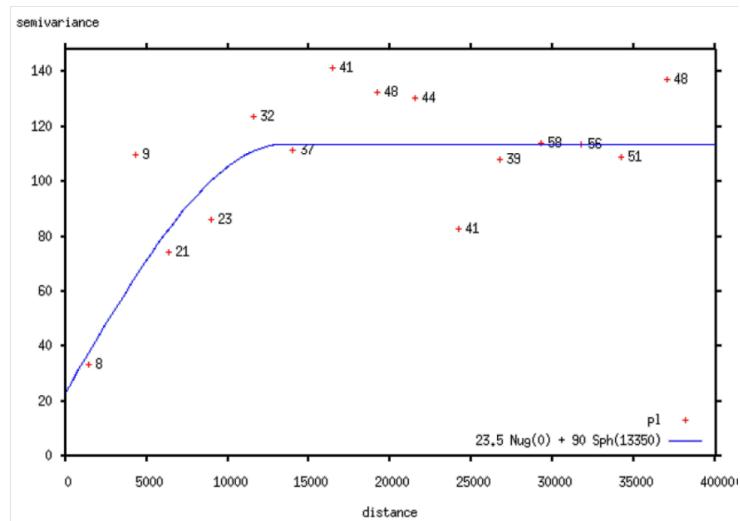
Para obtener un semivariograma, los pasos que se siguen son los siguientes:

- Determinar todos los posibles pares de puntos que pueden establecerse en la muestra
- Para cada uno de esos pares de punto ( $i, j$ ) hay que calcular la distancia ( $d_{ij}$ ) entre los puntos.
- Calcular además para cada par de puntos el cuadrado de las diferencias entre los valores medidos del atributo en cada uno de ellos
- $dZ^2 = (Z_i - Z_j)^2$
- Despues, hemos de establecer unos valores críticos de distancia ( $h$ ) que dependerán de las dimensiones del área de estudio. P.ej. 1.000 mts, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, etc.
- Asignar a cada uno de esos valores de distancia  $h$  los  $dZ^2$  de los pares de puntos cuya distancia  $ij$  sea más cercana a los valores críticos establecidos
- Para cada valor de  $h$  (distancia) calcularemos el valor  $Y$  de la función del semivariograma:

$$\gamma(h) = \frac{\sum_{k=1}^{n_h} dZ_k^2}{2n_h}$$

Fórmula según la cual el valor del semivariograma en una distancia crítica  $h$  será igual al sumatorio de las diferencias al cuadrado entre los valores de cada par de puntos asignado a esa distancia ( $h$ ) partido por el número de pares asignados a esa distancia multiplicados por 2.

Calculado el valor de semivarianza para los diferentes valores de  $h$  obtendremos un semivariograma experimental (fig. 10), dependiente en general del número total de datos muestrales pero también de la coherencia espacial de estos, resultando en que un semivariograma puede no ser útil si existen pocos datos o si en las series de datos existen valores extremos.



**Figura 10.** Ejemplo de semivariograma experimental

En cualquier caso, con muestras con un número de datos suficiente y con cierta coherencia en la distribución espacial de los valores medidos, es lógico pensar que para valores de distancia crítica ( $h$ ) pequeños, el valor obtenido por el semivariograma alcanzará valores pequeños, puesto que es de esperar que las diferencias entre los valores medidos en puntos cercanos sean pequeñas. Y claro está, al aumentar  $h$  y con ello la distancia entre los puntos, el valor  $\gamma(h)$  aumentará al ser teóricamente mayor la diferencia observada entre puntos situados a distancias espaciales mayores, hasta llegar a una distancia  $h$  a partir de la cual  $\gamma(h)$  se mantenga más o menos estable, es decir, hasta que el valor de semivarianza no cambia ya en el espacio (momento en el que podemos pensar que prácticamente desaparece la relación entre los valores de los distintos puntos muestrales en función de la distancia).

Para interpretar y poder aplicar la información del semivariograma en un proceso de interpolación, éste ha de ajustarse a una función o modelo teórico que nos proporciona unos parámetros con los que describir la variación espacial de la variable, parámetros que después van ser utilizados por el proceso de cálculo mediante kriging.

Ese modelo o semivariograma teórico es generalmente un semivariograma esférico, aunque existen otros procedimientos de cálculo, que se define por:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left\{ \frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} (h/a)^3 \right\} \text{ cuando } 0 < h < a$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \text{ cuando } h > a,$$

La representación gráfica del semivariograma, colocando h en abscisas y Y(h) en ordenadas, nos proporciona un resumen de cuál es la estructura espacial de la variable que pretendemos cartografiar. Una información que nos puede servir como referencia a la hora de modificar los parámetros de cálculo de la interpolación basada en métodos de kriging en nuestro SIG.

Y es ese modelo teórico el que utilizaremos para determinar los pesos  $\lambda_i$  necesarios para la interpolación mediante kriging. De forma que el valor estimado de un lugar viene dado por:

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i * Z(x_i)$$

Siendo  $\lambda_i$  el peso desconocido que tenemos que calcular para cada valor observado y  $Z(x_i)$  el valor observado en un lugar

Existen diversos tipos de kriging: ordinario, simple, universal y Cokriging. La diferencia entre estos métodos radica en la forma en que se calculan los pesos de  $\lambda_i$  a partir del semivariograma teórico mediante la resolución de sistemas de ecuaciones basadas en matrices. No entraremos obviamente en cómo es este proceso de cálculo, sino que la elección de un tipo u otro de kriging vendrá dada por parámetros finales y estadísticos de error que muestre la cartografía final, en el proceso de validación y validación cruzada que ya veremos más adelante. En el caso de este trabajo ha sido el kriging ordinario el que ha ofrecido los mejores resultados.

### 3.4.3. Modelización espacial de la precipitación total y del número de días de precipitación a partir de regresión múltiple por pasos y corrección de residuales

A pesar de que el número de observatorios es elevado, resulta obvio que es imposible abarcar la totalidad de la Cuenca del Ebro de una forma uniforme y con una cobertura espacial adecuada para que los métodos locales o geoestadísticos logren captar toda posible variabilidad espacial de las variables pluviométricas a cartografiar. Variabilidad que está relacionada con factores geográficos y topográficos que se posible tener en cuenta mediante su modelización a través de análisis de regresión.

Especialmente significativo puede ser el ejemplo de la estimación de los valores pluviométricos en altura. Por encima de los 1.500 metros en nuestra base de datos existe sólo un observatorio. Esto significa que el IDW o el kriging, que sólo tienen en cuenta los valores registrados en los observatorios, toman como máximo un valor de precipitación registrado muy por debajo de los que seguramente se obtendrán en zonas más elevadas. Es por ello necesario utilizar métodos que tengan en cuenta las variables que influyen sobre la distribución espacial de la precipitación.

Para llevar a cabo esta operación, se cuenta con las variables independientes o predictores mencionados en el apartado 3.4. Para cada uno de los observatorios se obtuvo el valor que en ese punto ofrece el ráster de cada uno de los predictores, creando una base de datos a partir de la que se realizó un análisis de regresión múltiple por pasos para cada variable.

De acuerdo a este procedimiento, el valor de la variable climática en los puntos donde no existe información se obtiene mediante la siguiente función de transferencia:

$$z(x) = b_0 + b_1 P_1 + b_2 P_2 + \dots + b_n P_n$$

donde Z es el valor predicho en el punto (x),  $b_0, \dots, b_n$  son los coeficientes de la regresión y  $P_1, \dots, P_n$  son los valores de las diferentes variables independientes en el punto x.

Mediante una regresión por pasos se seleccionan aquellas variables que introducen un porcentaje significativo de varianza explicada. Como ejemplo se muestra la tabla resumen de uno de los modelos obtenidos, en este caso para la precipitación media en Primavera para el periodo de estudio:

Resumen del modelo							
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado corregida	Error típ. de la estimación			
4	0.81548411	0.665014328	0.655773344	47.02787555			
5	0.8490393	<b>0.720867738</b>	0.711175646	43.07745291			
d	Variables predictoras: (Constante), latitud1, z, radiacion1, dist_med1						
e	Variables predictoras: (Constante), latitud1, z, radiacion1, dist_med1, dist_canta						

**Tabla 1:** Síntesis del modelo y valor de la variable para Primavera en los 150 observatorios. Se pueden observar dos de los cinco modelos diferentes, así como la corrección del error inducido

Coeficientes(a)					
Modelo		Coeficientes no estandarizados		Coeficientes estandarizados	
		B	Error típ.	Beta	t
5 (Constante)		<b>-609.3055736</b>	545.3203306		-1.11733515
latitud1		<b>0.375170634</b>	0.103368668	0.336454371	3.62944247
z		<b>0.15507052</b>	0.01305989	0.597692801	11.8737998
radiacion1		<b>-1.74462E-05</b>	3.96383E-06	-0.20062876	-4.40136405
dist_med1		<b>-0.800513815</b>	0.130583071	-0.954275338	-6.13030318
dist_canta		<b>-0.95658154</b>	0.178205424	-1.036403605	-5.36785874
a	Variable dependiente: Primavera1				

**Tabla 2:** Coeficientes y variables del modelo más adecuado (5), cuya selección ha dependido del coeficiente de relación R mostrado en la tabla anterior.

Así pues y de acuerdo con la fórmula anterior, la ecuación resultante sería:

$$Pmm = (- 609.3) + (0.37517 \times "L") + (0.15507 \times "Z") - (0.000017446237 \times "R") - (0.8005 \times "dM") - (0.9566 \times "dC")$$

donde L es la latitud, Z es la elevación o altura sobre el nivel del mar, R es la radiación, dM es la distancia al mar Mediterráneo y dC es la distancia al mar Cantábrico.

Debido a que los resultados de la modelización no son exactos, éstos no coinciden con el valor medido en los observatorios meteorológicos. Existe un error conocido en la predicción final, denominado error residual, causado por las variaciones locales del clima que no reproducen bien los modelos generales obtenidos mediante regresión múltiple.

Gracias al conocimiento de estos residuales es posible llevar a cabo una corrección de los modelos originales, de forma que en cada observatorio el valor del residual se obtiene mediante:

$$\text{Residual} = \text{Observado} - \text{Predicho}$$

Los residuales muestran en general un reparto espacial que no es aleatorio, de forma que su cartografía nos señala zonas en las que el modelo sobreestima el valor de la variable analizada, en otras en las que queda por debajo sistemáticamente de los valores observados y otros espacios en los que el valor observado y predicho muestran más semejanza. Modelizar esos errores y convertirlos en un ráster permite introducir la variabilidad local de la pluviometría dentro de ese marco general. Para ello se utilizan un interpolador local, en nuestro caso un IDW. De esta forma, con la suma del mapa de residuales interpolados y el mapa resultado de la estimación mediante los modelos de regresión, se corrigen los resultados iniciales del modelo y se obtienen valores reales en los puntos de los observatorios meteorológicos:

$$\text{Observado} = \text{Predicho} + \text{Residual}$$

Mediante esta modelización de las variables a partir de regresiones múltiples y corrección posterior por interpolación de residuales se han obtenido los siguientes mapas: media anual de precipitación para el periodo de estudio, media para cada una de las cuatro estaciones, media anual de días de precipitación y media de los días de precipitación para cada una de las cuatro estaciones.

El resto de cartografías (relacionadas con tendencias, porcentajes sobre el total, máximos históricos...) fueron obtenidas a partir de la base de datos diarios mediante IDW o kriging, seleccionándose la cartografía final en función del RMSE, como hemos señalado anteriormente.

El resultado son capas digitales con una resolución de 1.000 metros que permiten visualizar gráficamente las variables relacionadas con la precipitación y su distribución espacial y temporal sobre el territorio estudiado.

### **3.5 Resumen del software utilizado**

Desde el punto de vista formativo y personal nos gustaría destacar el gran número de recursos utilizados en esta fase de depuración y cartografía de la información, de los cuáles antes de comenzar este proyecto podía tener más o menos nociones acerca de su manejo y sus posibilidades.

Con respecto al paquete Office, conocía a nivel de usuario la mayoría de las opciones, si bien es cierto que he manejado en Excel fórmulas complejas que no había necesitado antes, y que gracias a Access, del cual no había hecho uso nunca, se ha podido llenar las fechas faltantes de forma, si no amena, desde luego mucho más rápida de lo que habría supuesto buscar estos datos uno por uno en cada observatorio.

En cuanto a R para el relleno de lagunas, y SPSS para el modelado de resultados, también he adquirido unos conocimientos básicos que pueden serme de utilidad más adelante.

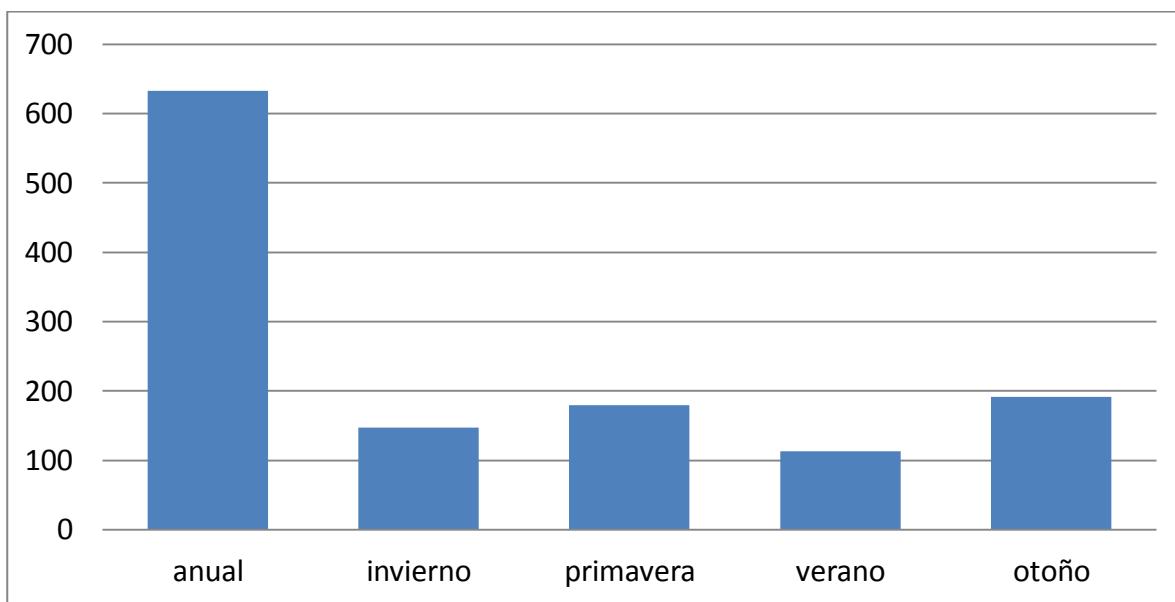
Por último, en lo referido a ArcGis, en este Máster había adquirido prácticamente todos los recursos necesarios que he necesitado para la elaboración de las cartografías, por lo que básicamente he asentado esos conocimientos.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Variabilidad espacial de la precipitación anual y estacional, y el estudio de sus tendencias durante el periodo 1981-2010

A partir de la información modelizada de la precipitación total anual de los 150 observatorios de la zona de estudio, la precipitación total anual media para la Cuenca del Ebro en el periodo 1981-2010 alcanza los 654 mm, con un reparto estacional que señala a Otoño y Primavera como las estaciones más lluviosas, con una media para todo el solar regional de 195 y 189 mm respectivamente, y a Verano la más seca, con una media de 124 mm. En el caso del invierno, la media estimada para todo el valle del Ebro es de 146 (figura columnas).

Sin embargo, como bien es sabido, estos valores medios de precipitación anual son muy dispares en función de la localización geográfica. Encontramos desde los valores máximos en las estaciones a lo largo del Pirineo, con ejemplos como Abaurrea Alta (1.444 mm), Linas de Broto (1.297 mm) o Sant Maurici (1.143 mm), con un valor pluviométrico máximo estimado por el modelos para la cuenca de 2.700 mm, a zonas del interior de la cuenca donde no se superan los 400 mm y hasta en ocasiones 350 mm anuales, con ejemplos como Sastago (333 mm) o Buñuel (320 mm)



**Figura 11:** Valores medios (mm) de la precipitación total anual y estacional para el conjunto de la Cuenca del Ebro.  
La media anual es de 633 mm.

En la figura 11 se puede apreciar, como ya se ha comentado, la gran variabilidad pluviométrica existente en la Cuenca del Ebro, cuya distribución depende básicamente de la dependencia constante de la topografía y de la dificultad de penetración de los frentes atmosféricos, sobre todo en el interior de la cuenca.

Además de estos extremos, encontramos otras zonas con máximas relativas conocidas por distintas causas. Por un lado, la influencia atlántica hace de todo el sector noroeste un área con precipitaciones relativamente cuantiosas, con valores en torno a 700-800 mm (Pradolengua 749 mm, Mansilla 740 mm, Miñón 698 mm).

Por otra parte, a pesar de contar con alturas mínimas, los observatorios cercanos al Mediterráneo cuentan con la influencia, sobre todo en Otoño, de actividad ciclónica inestable que puede provocar torrenciales aguaceros capaces de superar los 150 mm en menos de 24 horas. Así, encontramos valores en torno a los 550 mm e incluso superiores (Godall 633 mm, Amposta 547 mm, Tortosa 507 mm)

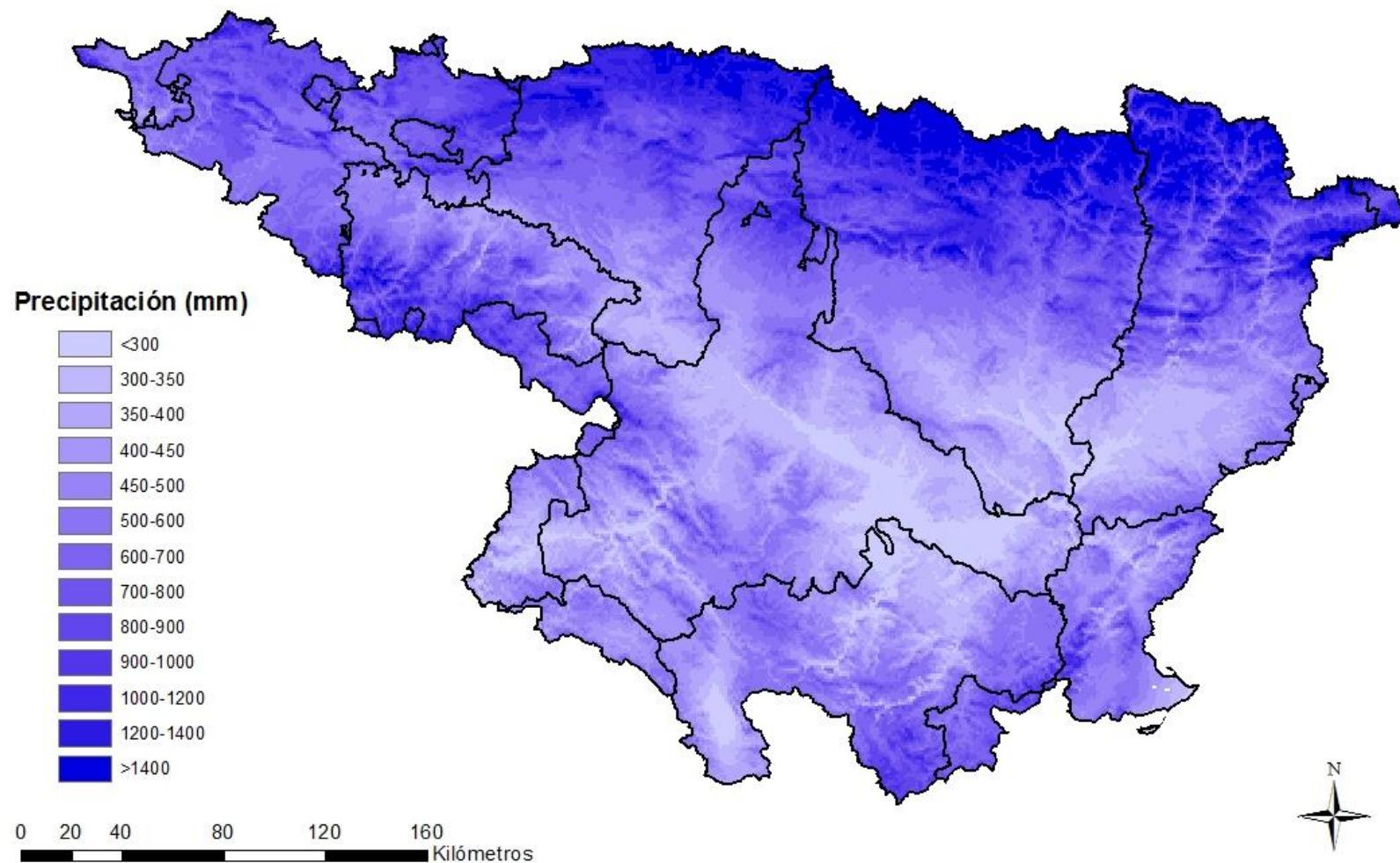
Conviene recordar que, como ya se ha explicado en apartados anteriores y debido a la ausencia de suficientes datos en el sector noreste, el peso que ejerce la altura sobre el nivel del mar en esa zona es mayor del que se da en el resto de la Cuenca, de ahí que los resultados aparezcan más resaltados según la orografía del pirineo oriental.

Esta variabilidad también se observa al representar las precipitaciones de forma estacional (figuras 12 y 13):

Con respecto a los Inviernos, son relativamente secos en toda la cuenca excepto en el Pirineo, sobre todo en la parte occidental. Primavera y Otoño acumulan la la mayor parte de las precipitaciones anuales. Por su parte, en Verano gran parte de la cuenca no supera los 100mm, y en algunas zonas apenas se superan los 50mm .

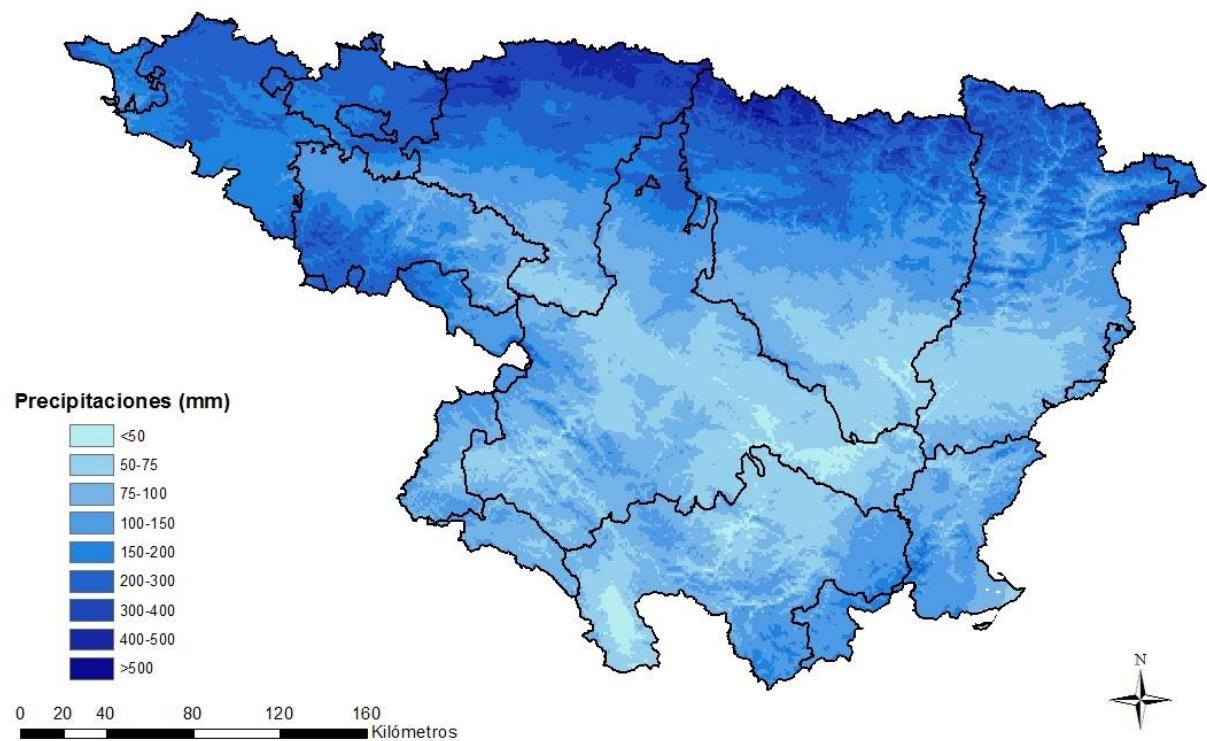
Estás diferencias se pueden apreciar en la figura 14 en la que se representa de forma proporcional la precipitación para cada estación con respecto al total anual.

Especialmente llamativo resultan los sectores de la provincia de Teruel y del pirineo de Lérida, donde en Invierno se registran los menores valores de precipitación, mientras que en Verano ambos superan el 26% de la precipitación anual, las zonas con este valor más elevado de toda la cuenca.

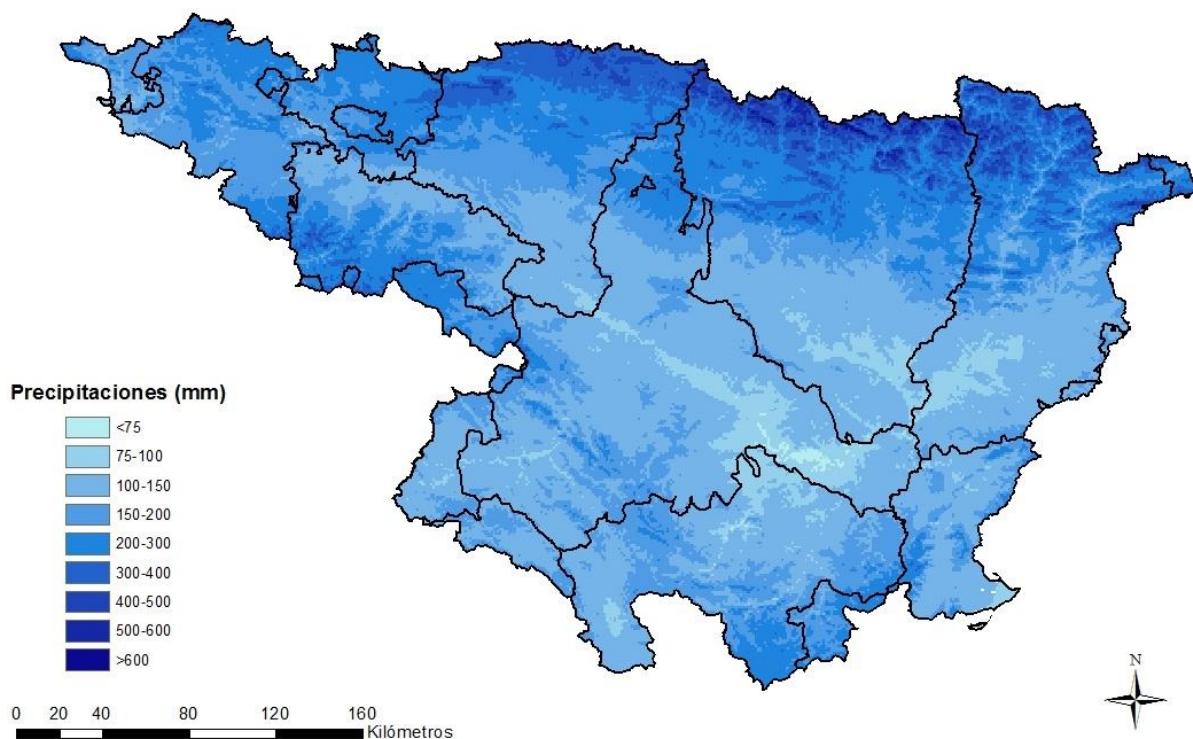


**Figura 11:** Precipitación total anual – Periodo 1981 a 2010

a)

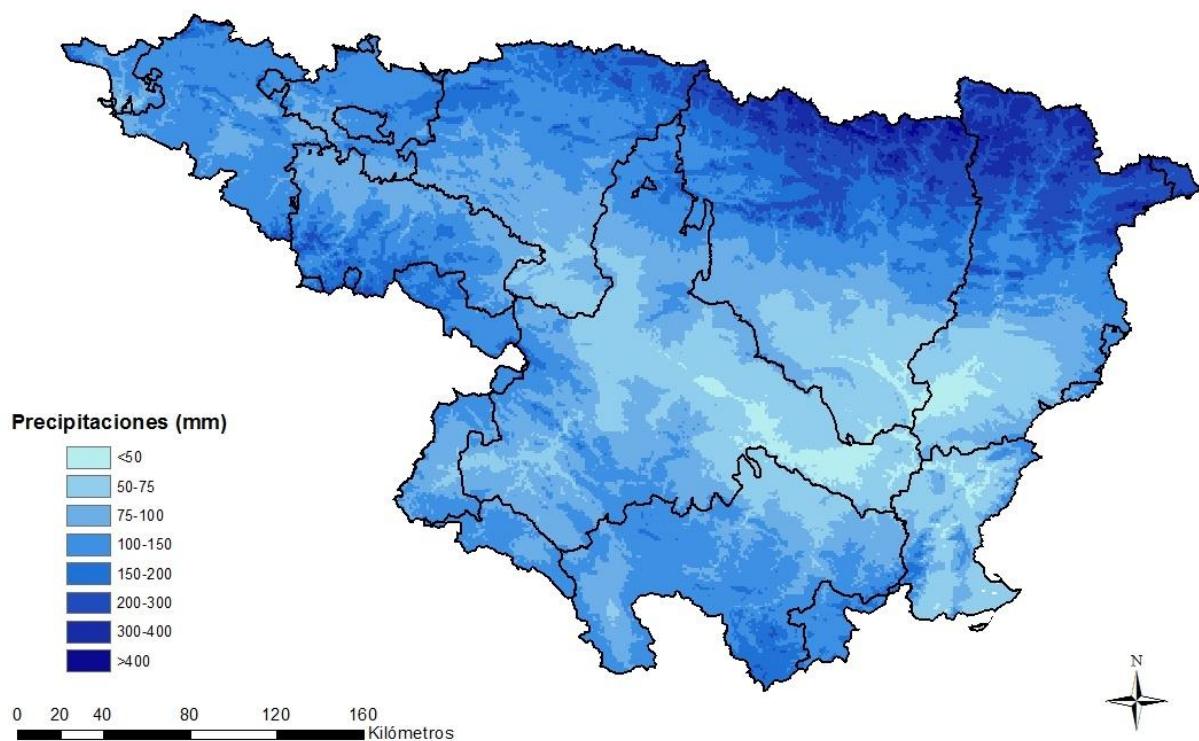


b)

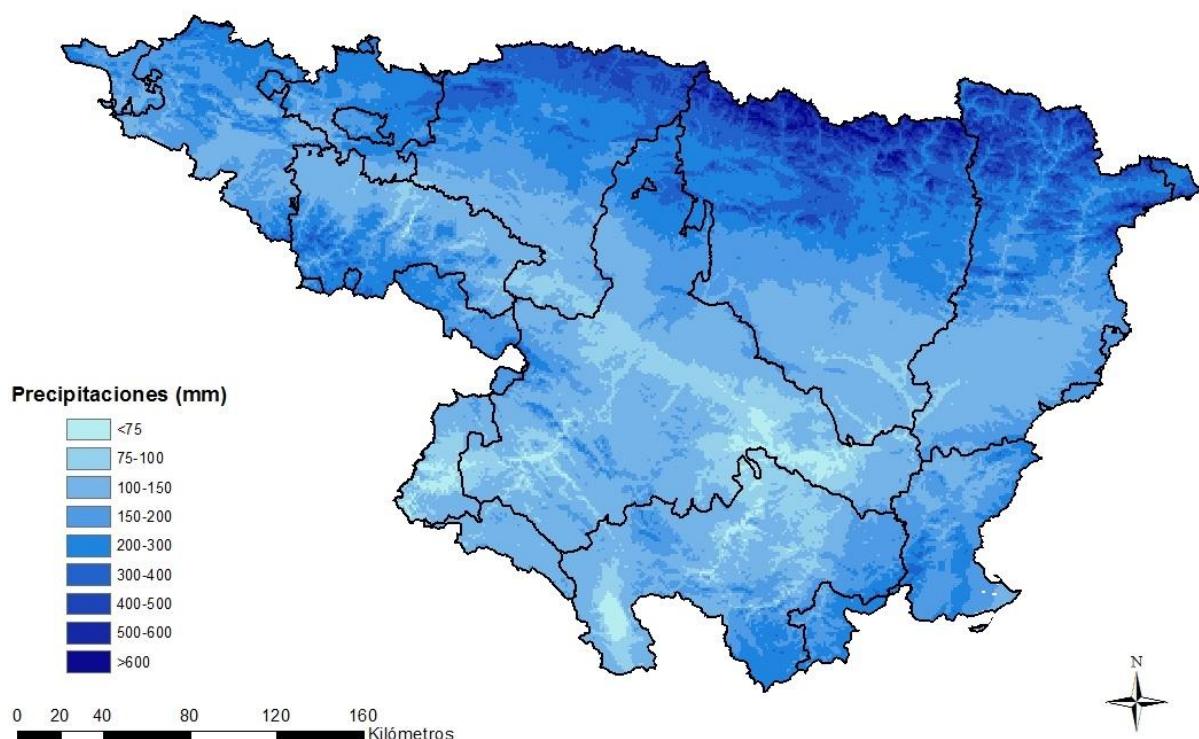


**Figura 12:** a) Precipitación media en Invierno y b) Primavera

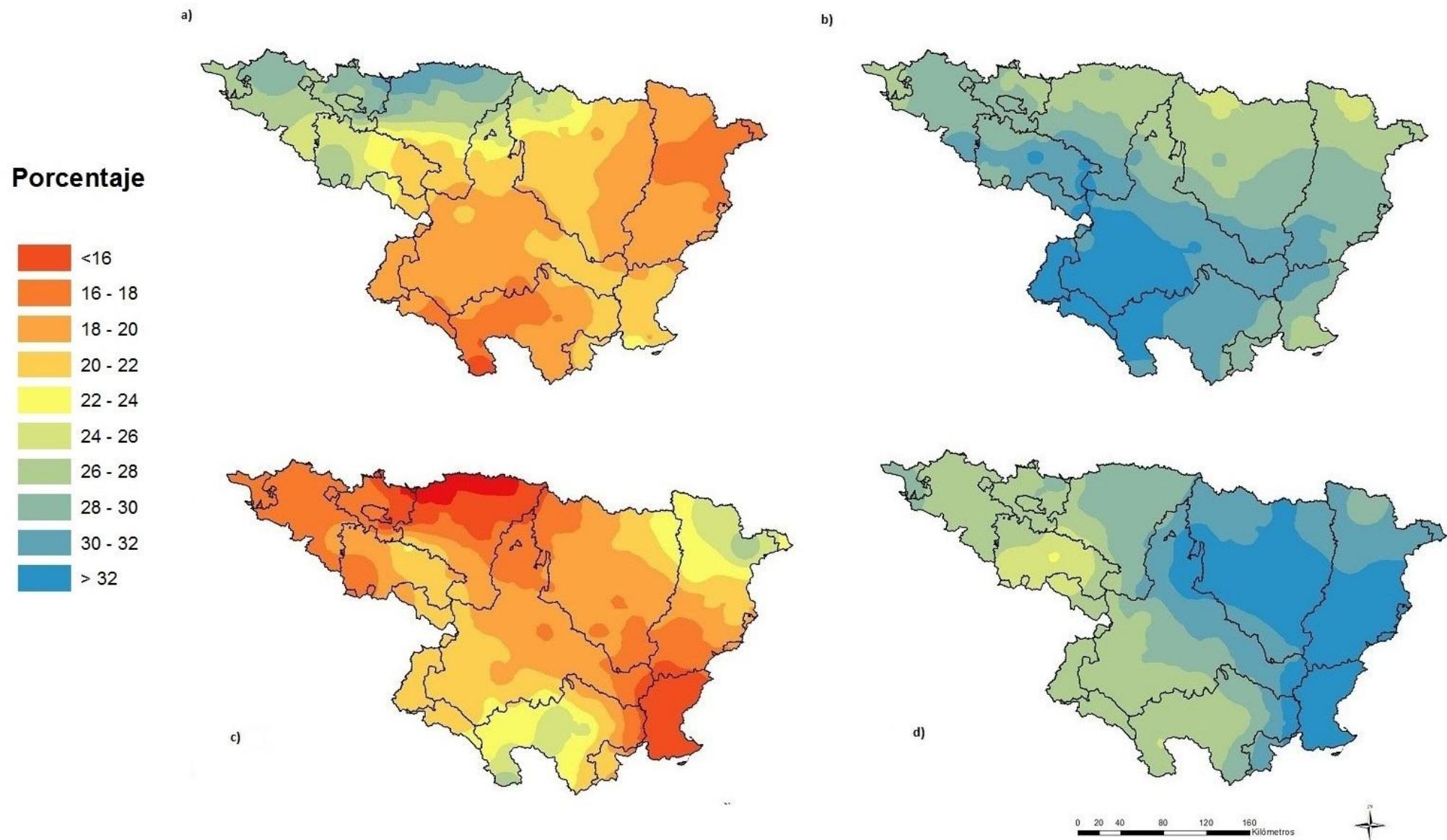
c)



d)



**Figura 13:** c) Precipitación media en Verano y d) Otoño



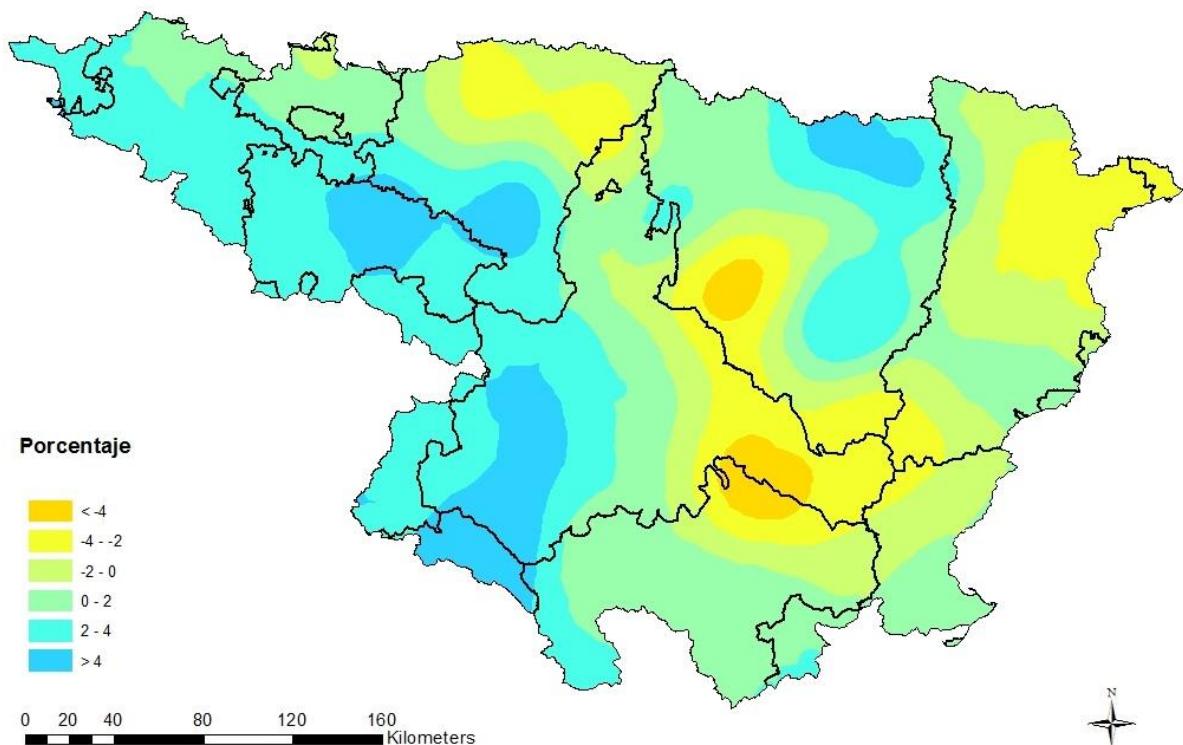
**Figura 14:** Porcentaje de las precipitaciones estacionales sobre el total anual a) Invierno, b) Primavera, c) Verano, d) Otoño

Una vez representados los totales de la precipitación anual y estacional, y su porcentaje con respecto al total, el siguiente paso consiste en analizar la tendencia que estas precipitaciones han tenido durante los 30 años de estudio.

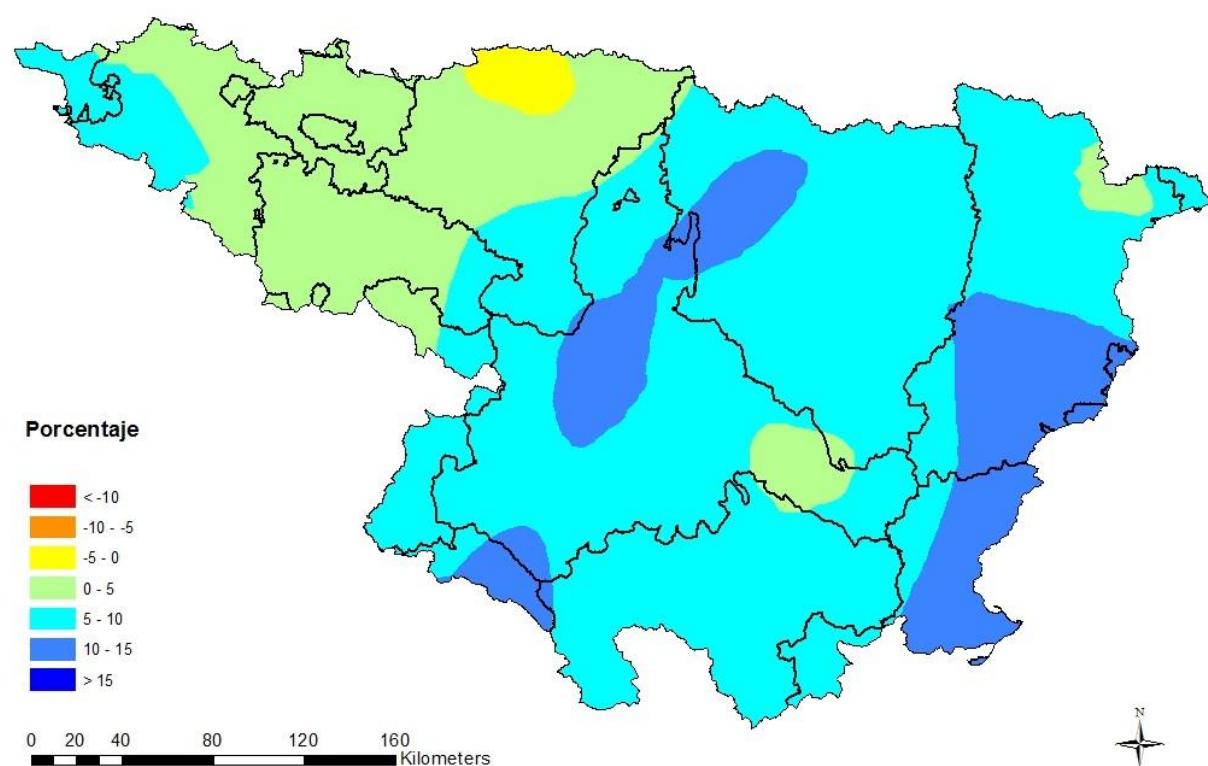
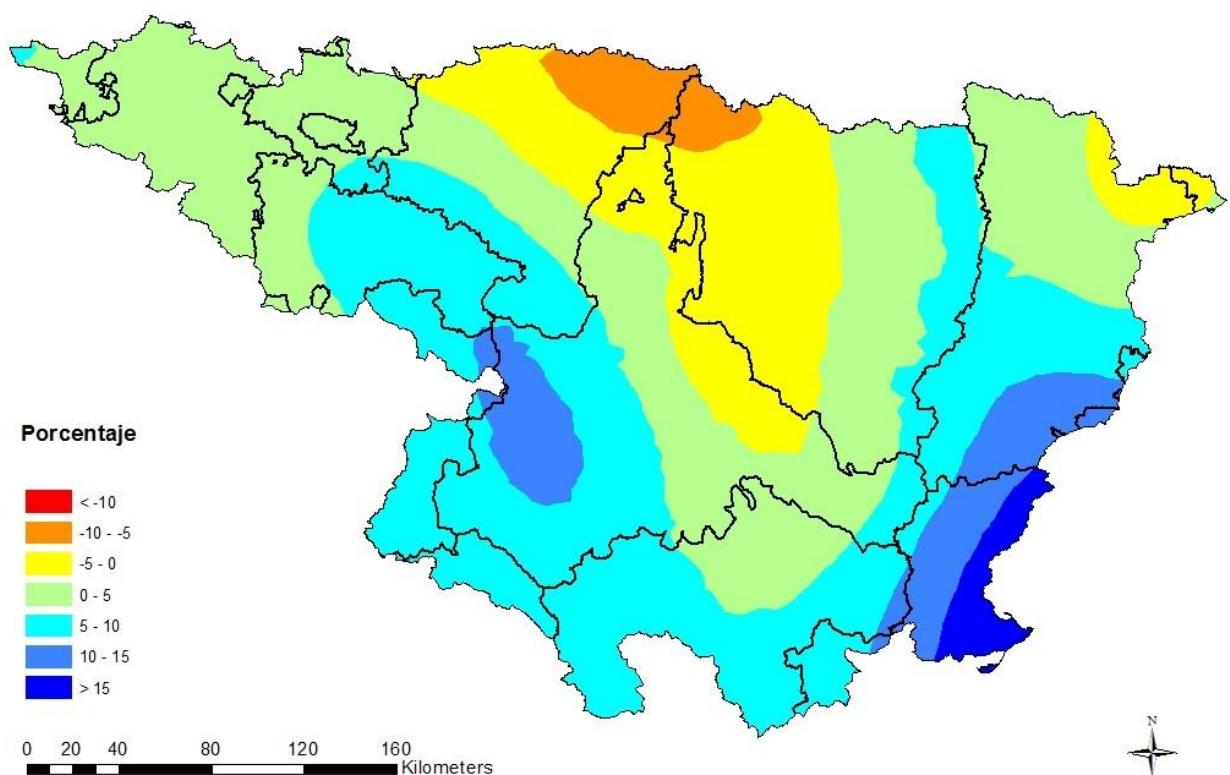
La verificación de este fenómeno no es fácil en ningún ámbito geográfico, debido al complejo reparto espacial que muestra la precipitación sobre el territorio. La señal de las tendencias de la pluviometría suele ser más difusa en el espacio que en el caso de las temperaturas y está más afectada por la presencia de valores extremos (Trenberth et al 2007). En cualquier caso, gracias a la densa red de observatorios empleada, se ha realizado la mejor cartografía posible relativa a la tendencia de los totales anuales así como estacionales, observándose, como veremos posteriormente, algunos aspectos interesantes relacionados con la coherencia espacial de los resultados de las tendencias calculadas.

Debido a la gran variabilidad en la distribución de las precipitaciones, se considera que no tiene sentido cartografiar estas tendencias simplemente como una variación cuantitativa en milímetros, ya que por ejemplo un descenso de 50 milímetros cada 10 años no representa lo mismo en una zona con 300mm anuales que en una de 1000 mm al año. Por ello se ha decidido cartografiar estas tendencias como la variación de la precipitación en tanto por ciento sobre la media y cada 10 años (%/década).

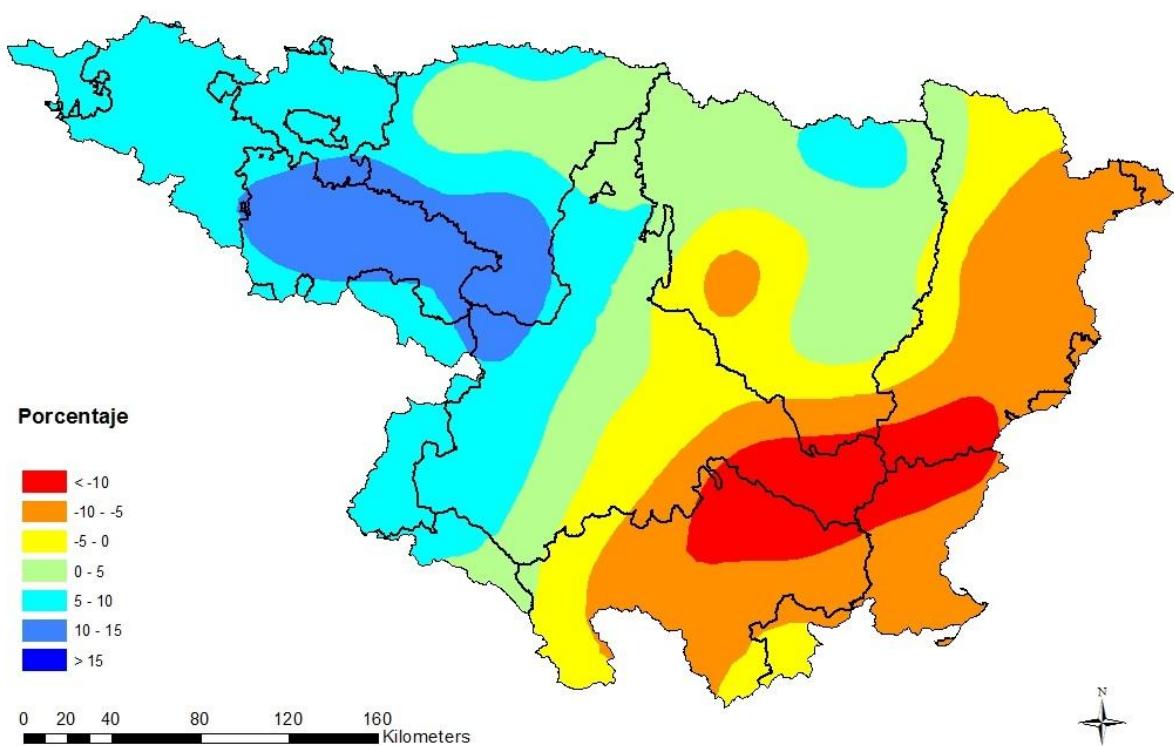
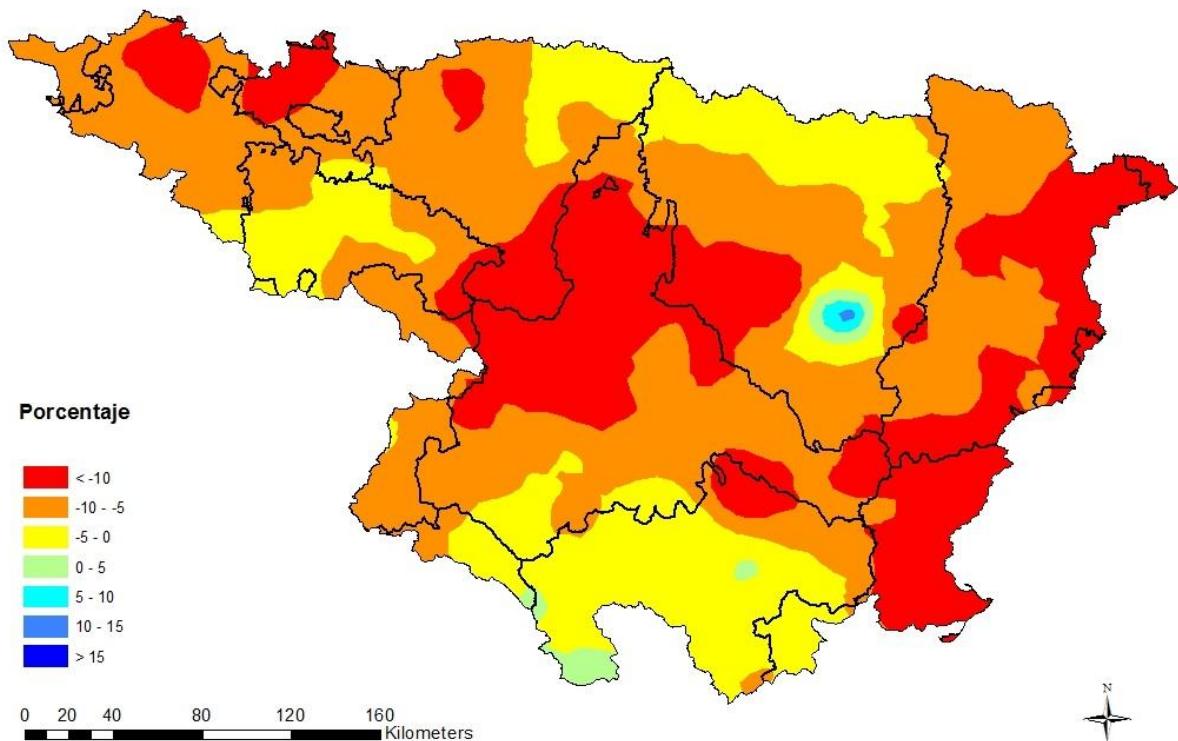
De nuevo, se cuenta con cartografías para la variación anual primero, y dividida según estaciones después:



**Figura 15:** Tendencia de la precipitación anual (%/década)



**Figura 16:** Tendencia de la precipitación estacional (%/década) para a) Invierno y b) Primavera



**Figura 17:** Tendencia de la precipitación estacional (%/década) para c) Verano y d) Otoño

A partir de las cartografías anteriores, se puede afirmar que:

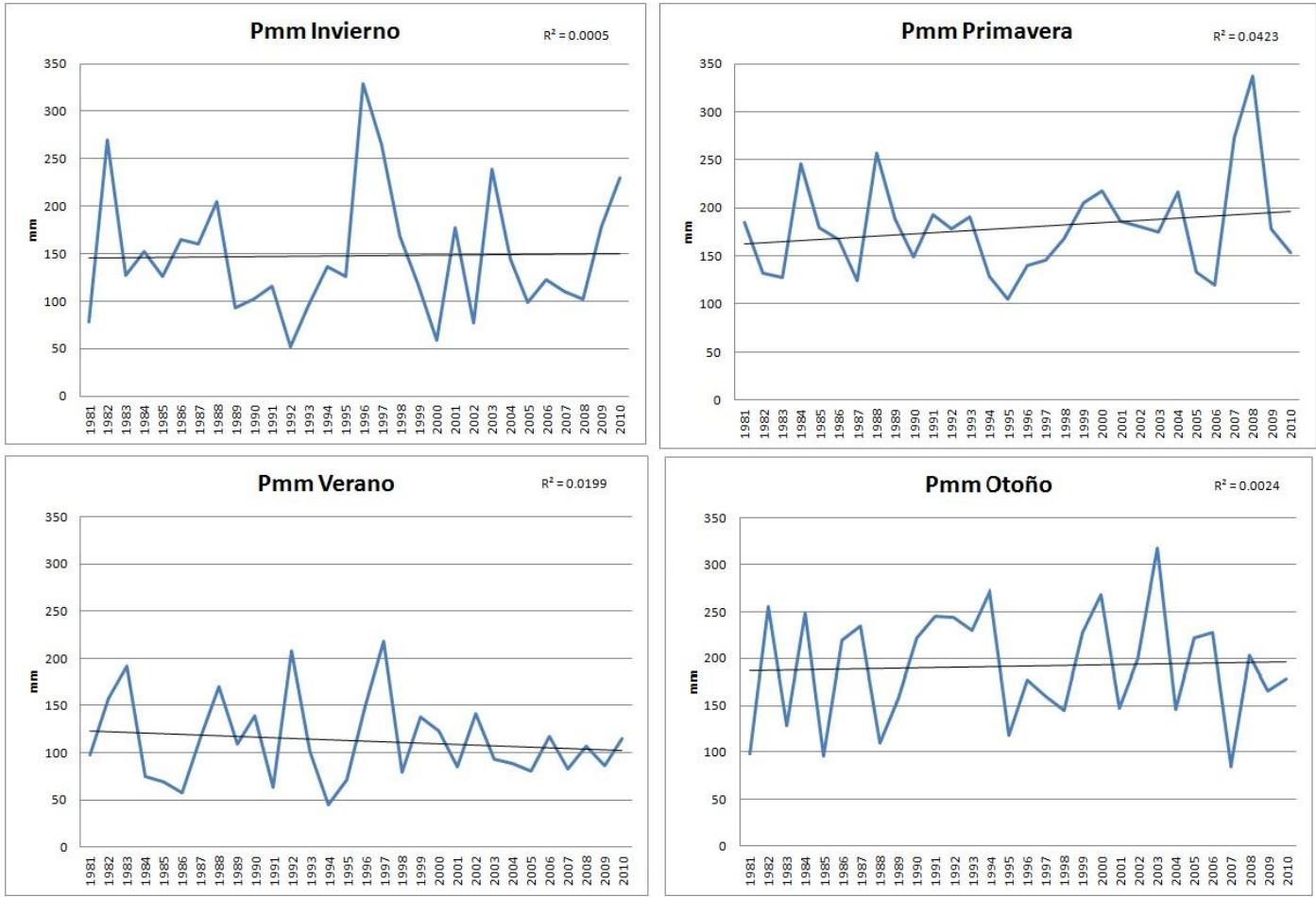
1. La tendencia global de la cuenca no registra grandes variaciones, considerando cuatro zonas, que se distribuyen de forma más o menos paralelas a la morfología de la cuenca, esto es Noroeste (NW) a Sureste (SE):

- una primera zona que tiene su extremo occidental en Cantabria y que extiende hasta prácticamente el delta del Ebro, pasando por la Rioja, la zona SW de Zaragoza y parte del norte de Teruel donde las precipitaciones están aumentando de forma muy suave, con valores que en ocasiones superan el 4% cada diez años, localizados sobre todo en La Rioja y en el Valle del Jiloca.
- un segundo sector, paralelo al primero, que va desde el pirineo Navarro, pasando por el NE-E de Zaragoza y el SW de Huesca hasta la provincia de Lérida, donde las precipitaciones han disminuido hasta más de un 4% de forma general, con picos más elevados en la Hoya de Huesca y en la zona de Alcañiz.
- una tercera franja correspondiente al Pirineo Oscense Oriental, que se extiende siguiendo, a grandes rasgos, el trazado del Río Cinca, donde de nuevo las precipitaciones han aumentado del 1% en las cotas más altas, y entre un 2 y 4% conforme descendemos
- y por último la zona pirenaica más oriental, en la provincia de Lérida, donde de nuevo la tendencia es negativa.

2. Al considerar estas tendencias a escala estacional, se puede destacar que:

- en Invierno se aprecia una tendencia al incremento de las precipitaciones que es considerablemente significativa sobre todo en las zonas más cercanas y adyacentes al Mediterráneo, y en el Sistema Ibérico. Por el contrario, la parte occidental de la provincia de Huesca y sobre todo el pirineo Navarro encuentran una disminución notable en sus precipitaciones;
- en Primavera la tendencia es positiva en toda la Cuenca salvo de nuevo en norte de la Comunidad Foral de Navarra, donde, aunque de forma muy suave, se dan tendencias negativas;
- en Verano toda la cuenca está viendo como las precipitaciones son cada vez menores, excepto en un foco localizado en la comarca del Cinca, que podría deberse a una mayor incidencia de las tormentas de verano en esta zona.
- por último las tendencias en Otoño se distribuyen dividiendo la Cuenca en dos zonas claramente diferenciadas. Un área con aumento de las precipitaciones en la parte NW (Cantabria, País Vasco, la Rioja, parte de Navarra y parte de Zaragoza) y otra con tendencia negativa en toda la zona SE, de forma más acentuada conforme nos acercamos al Mediterráneo.

Además de las cartografías anteriores, que representan las tendencias modelizadas para toda la cuenca, se han elaborado una serie de gráficas representadas en la Figura 18 que nos muestran estas tendencias para la media estacional de las precipitaciones sobre los 150 observatorios empleados en este trabajo, y que muestra de forma más generalizada esta variabilidad, además de reflejar los años dentro del periodo de estudio en el que se han dado picos en los valores



**Figura 18:** Promedio estacional de las precipitaciones para los 150 observatorios de referencia, y su línea de tendencia

Así pues, y comparando la información de estas gráficas con las cartografías anteriores, queda reflejado que en Invierno y en Otoño, a pesar de la distinta variabilidad de las precipitaciones en función de la zona geográfica, las tendencias generales de la cuenca son ligeramente positivas. Y corrobora que para Primavera la tendencia es claramente creciente, todo lo contrario que para el caso de Verano

## 4.2 Cuantificación de los días de precipitación anual y estacional, y su variabilidad temporal

El número total de días de lluvia viene dado por el número de registros mayores a 0'1 mm/día según la definición de evento lluvioso dada por la OMM.

Siguiendo con la misma estructura que la empleada con el total de precipitaciones, se han elaborado cartografías del número total de días de precipitación anual y estacional, así como sus relaciones porcentuales y sus tendencias.

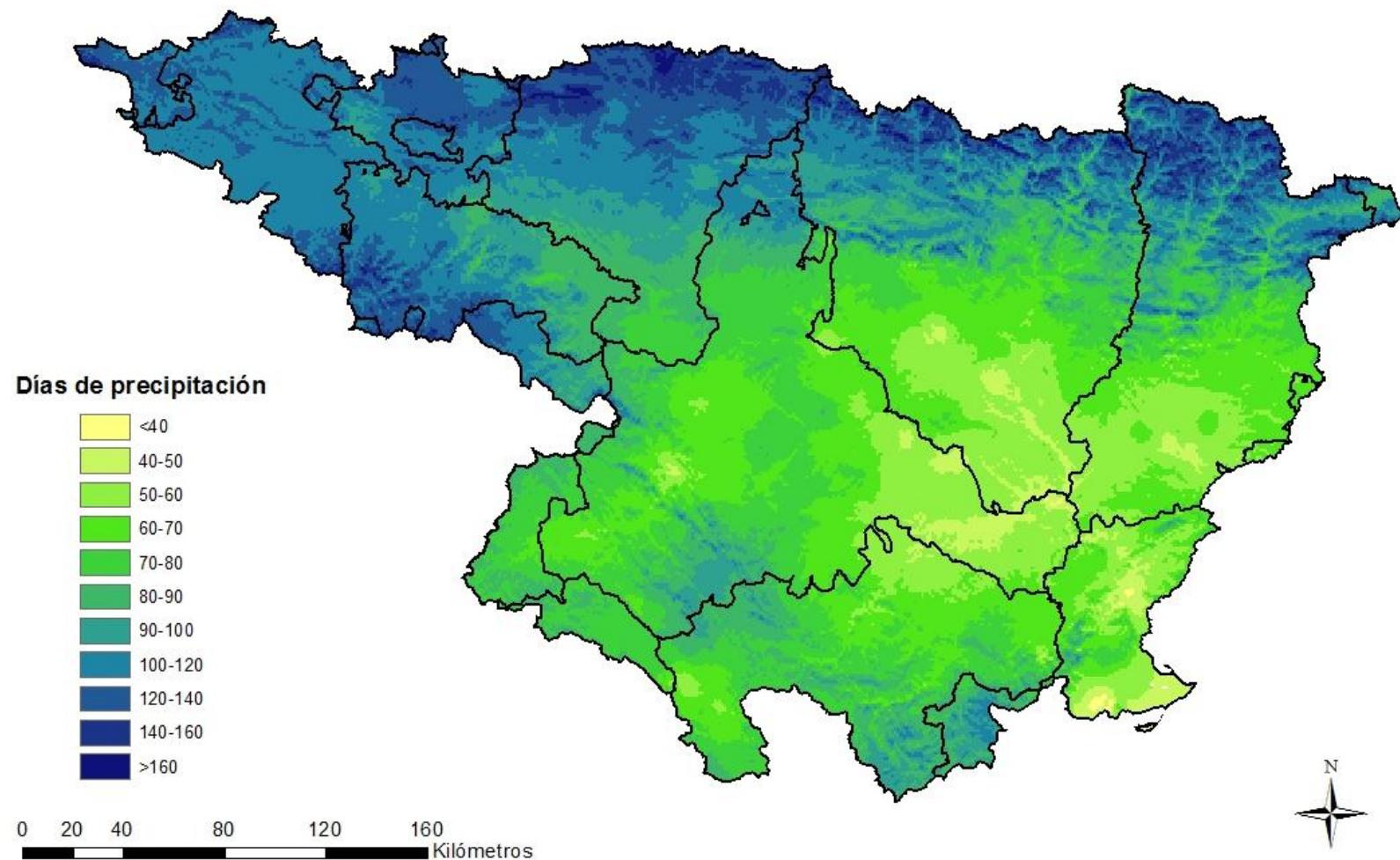
El mapa general sobre el número de días de precipitación muestra, como era de esperar, los mayores valores en toda la zona noroccidental de la cuenca, esto es las zonas más próximas al Atlántico (Gamiz 135 días, Arriola 112 días) y el Pirineo en su parte más occidental (Eparoz 148 días, Eugui-Esteribar 172 días). También encontramos valores elevados a lo largo en las estaciones a mayor altura, como a lo largo del Pirineo (Fiscal 90 días, Bernués 85 días, Canfranc 132 días) y en la Cordillera Ibérica (Tornos 91 días, Cubel-Casas altas 87 días). En la depresión del Jiloca, la frecuencia de fenómenos convectivos hace que, de forma aislada, se destaque algún máximo local en cuanto al número de días de precipitación de esa zona.

Por el contrario, los valores empiezan a disminuir de forma drástica conforme nos adentramos en la depresión central del Ebro (Pozuelo de Aragón 60 días, Calatorao-Cooperativa 61 días, Perdiguera 58 días) alcanzando los valores mínimos sobre todo en la comarca de Los Monegros y en las zonas adyacentes al Mediterráneo, donde apenas se alcanzan los 45 días de precipitación anuales. Algunos ejemplos pueden ser La Amolda (44 días), Monegrillo (48 días) en el interior, mientras que en la costa encontramos Godal con 41 días, y Amposta con 55 días.

Por último, en las distintas capitales de provincia dentro de la cuenca encontramos los siguientes datos: Foronda-Vitoria 142 días, Pamplona-Noain 125 días, Logroño-Agoncillo 102 días, Huesca-Obras Públicas 79 días, Zaragoza-Aeropuerto 76 días y Lérida 63 días.

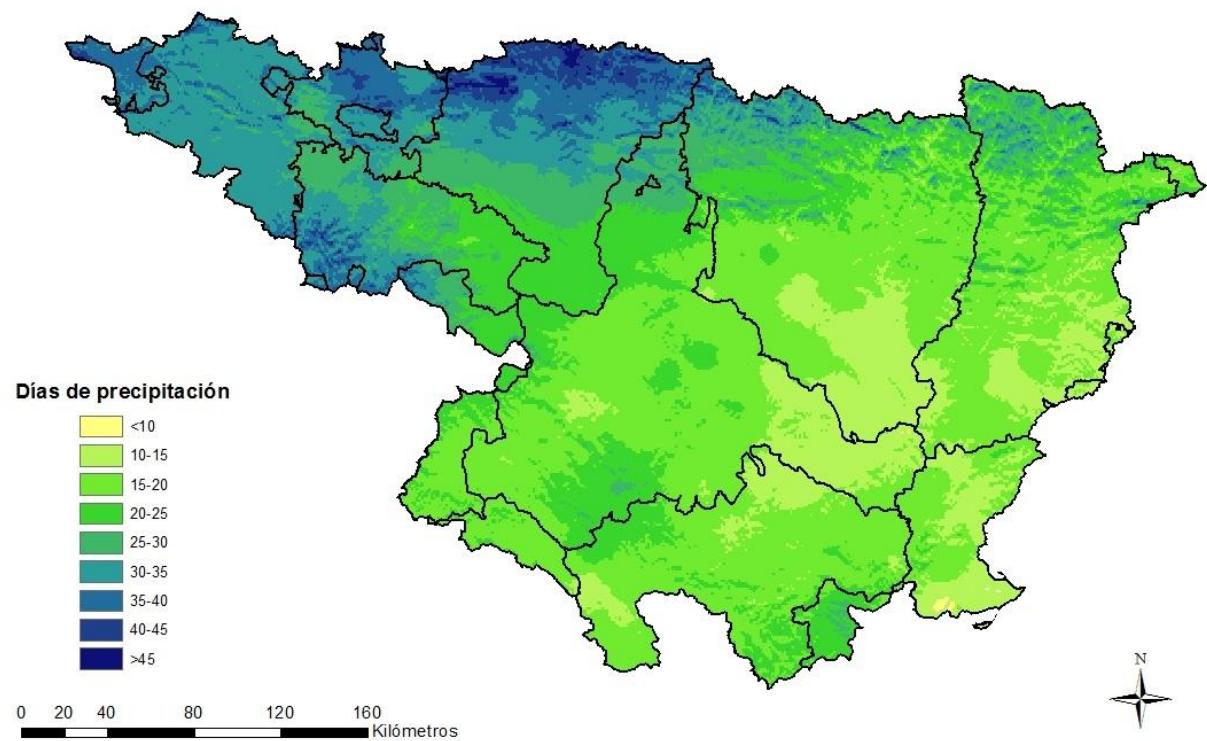
Al observar el reparto estacional de los días a lo largo del año (figuras 20 y 21), Primavera y Verano muestran claramente los máximos y mínimos respectivamente; sin embargo Invierno y Otoño no muestran una simetría geográfica, sino que en Invierno se observa un mayor número de días de precipitación en el sector NW, o lo que es lo mismo en toda la zona de Cantabria, País Vasco, Navarra y La Rioja, mientras que en Otoño ese mayor porcentaje de días de precipitación se desplaza hacia el Este, ocupando el norte de la provincia de Zaragoza, la provincia de Huesca y Cataluña.

Con respecto a la distribución según el porcentaje de días (fig 22), primavera se muestra como la estación más lluviosa, con un reparto muy uniforme y valores en torno al 30% en toda la Cuenca. Cabe destacar el máximo relativo anual que se da en la Cordillera Ibérica con respecto al resto del año. Por el contrario, en verano encontramos mínimos muy marcados, sobre todo en la cabecera del Valle, donde apenas se da el 16% de los días de lluvia de todo el año.

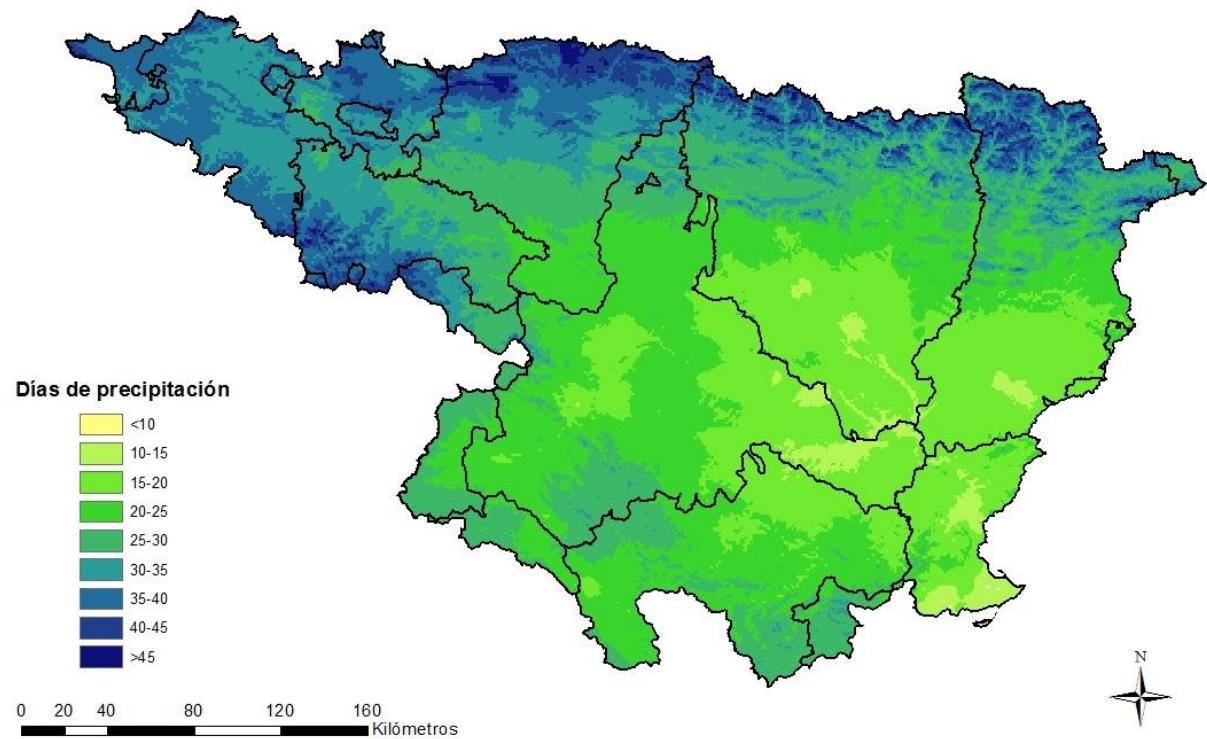


**Figura 19:** Número de días de precipitación anual

a)

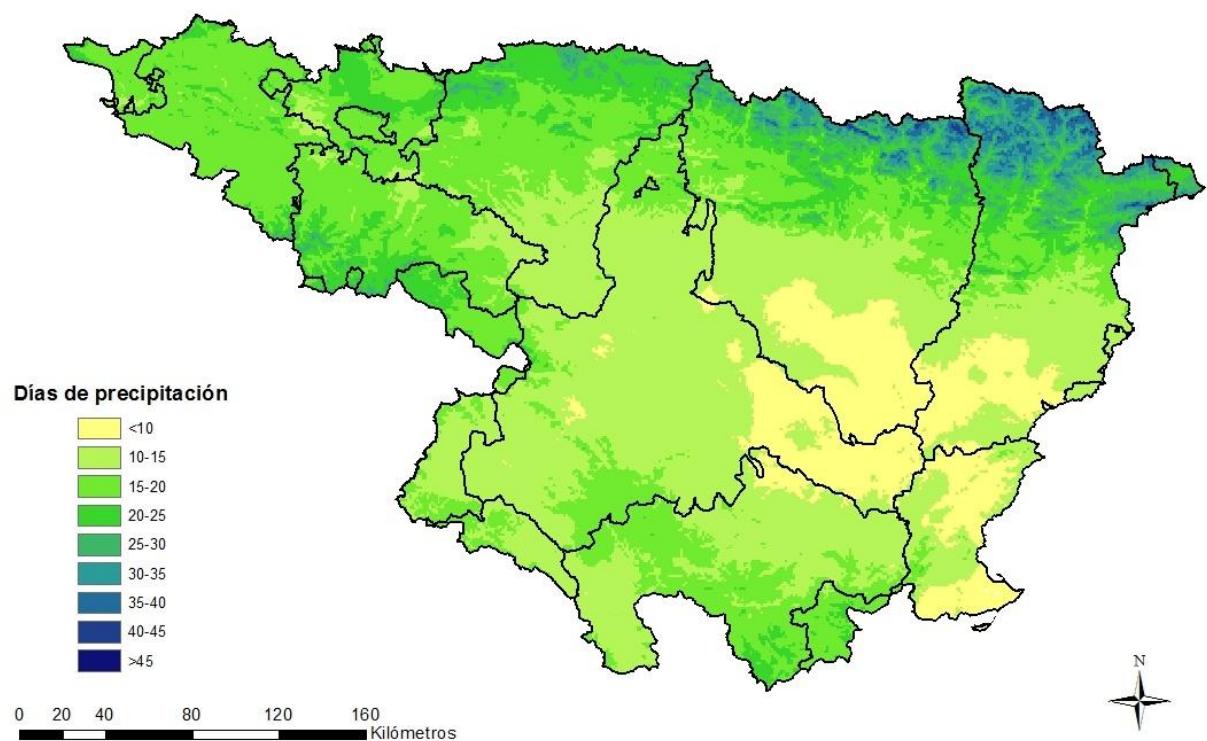


b)

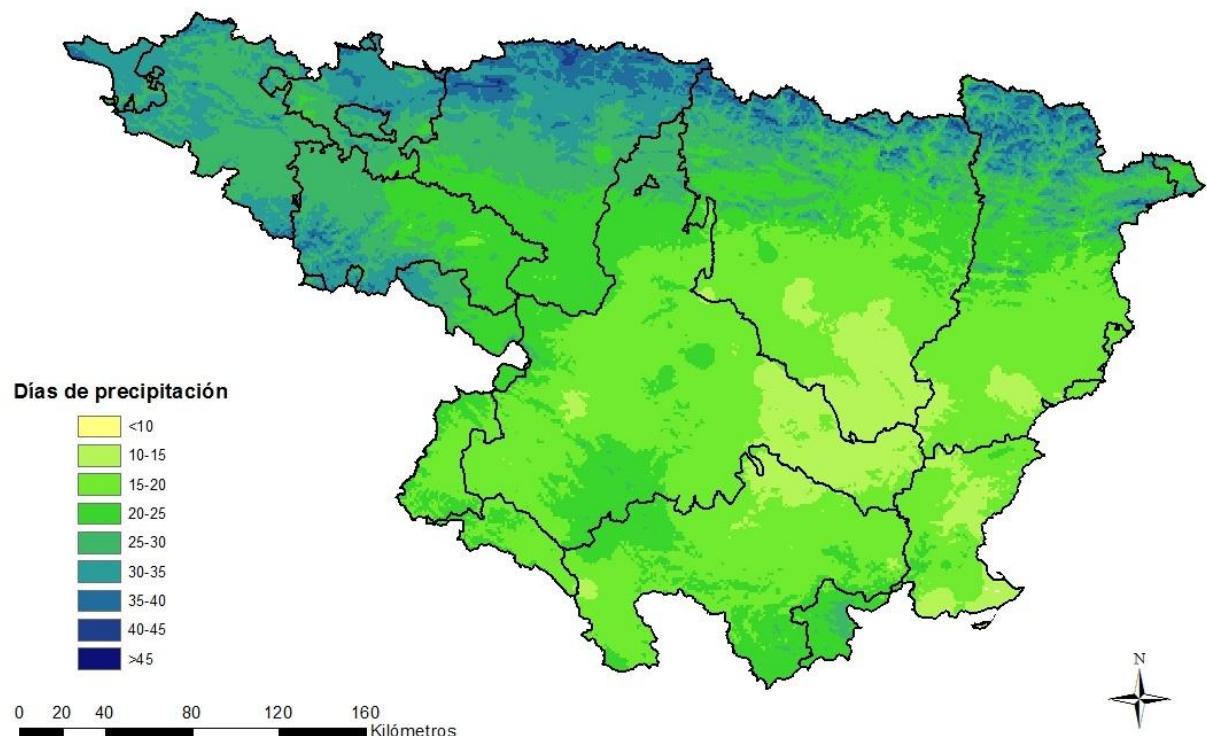


**Figura 20:** Número de días de precipitación para a) Invierno y b) Primavera

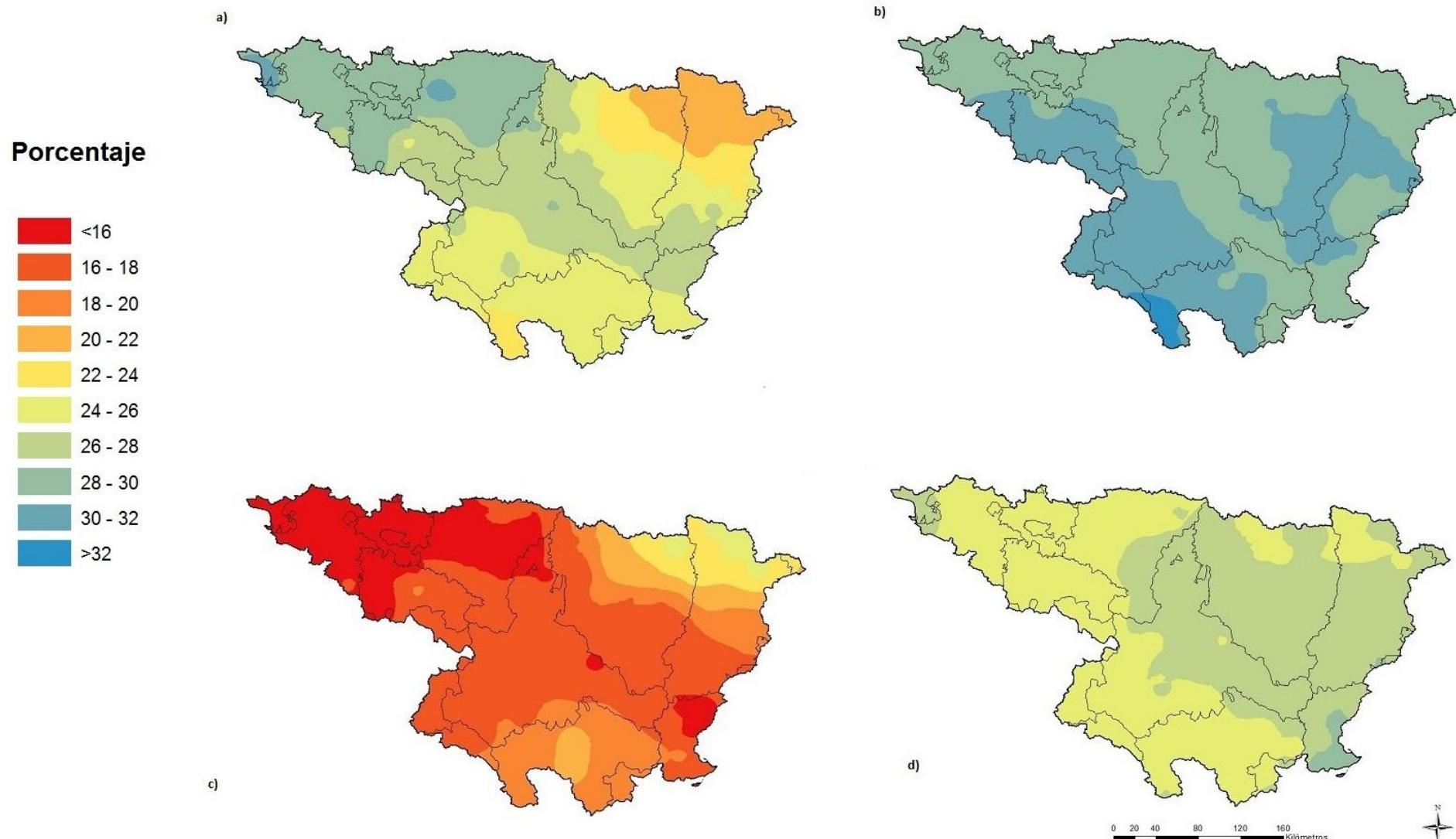
c)



d)



**Figura 21:** Número de días de precipitación para c) Verano y d) Otoño

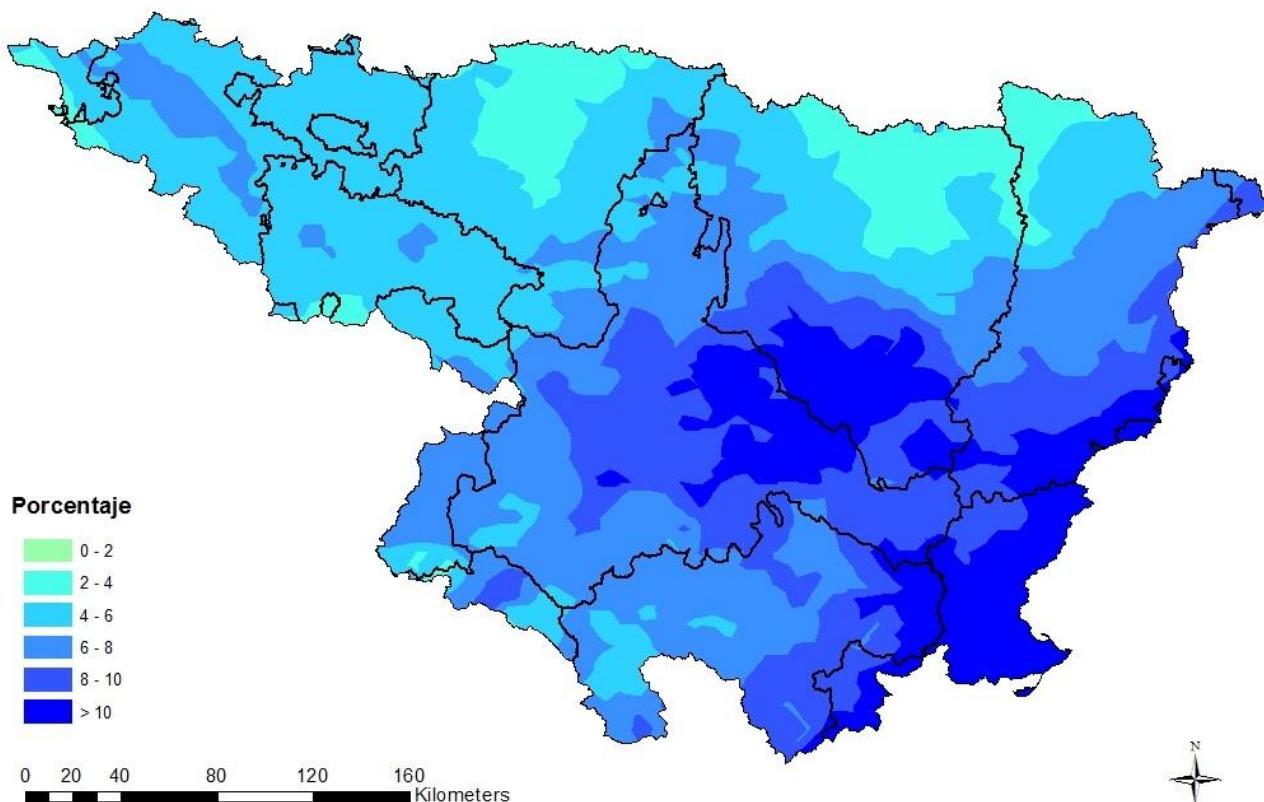


**Figura 22:** Porcentaje del número de días de precipitación estacional sobre el total anual a) Invierno, b) Primavera, c) Verano, d) Otoño

Para el estudio de la variabilidad temporal del número de días de precipitación se ha tenido en cuenta el mismo criterio que con el total de precipitación, esto es calcular esta tendencia según el porcentaje de variación cada diez años, puesto que una misma disminución o aumento del número de días total no tendría por qué tener la misma en función de los valores que se den en una zona u otra.

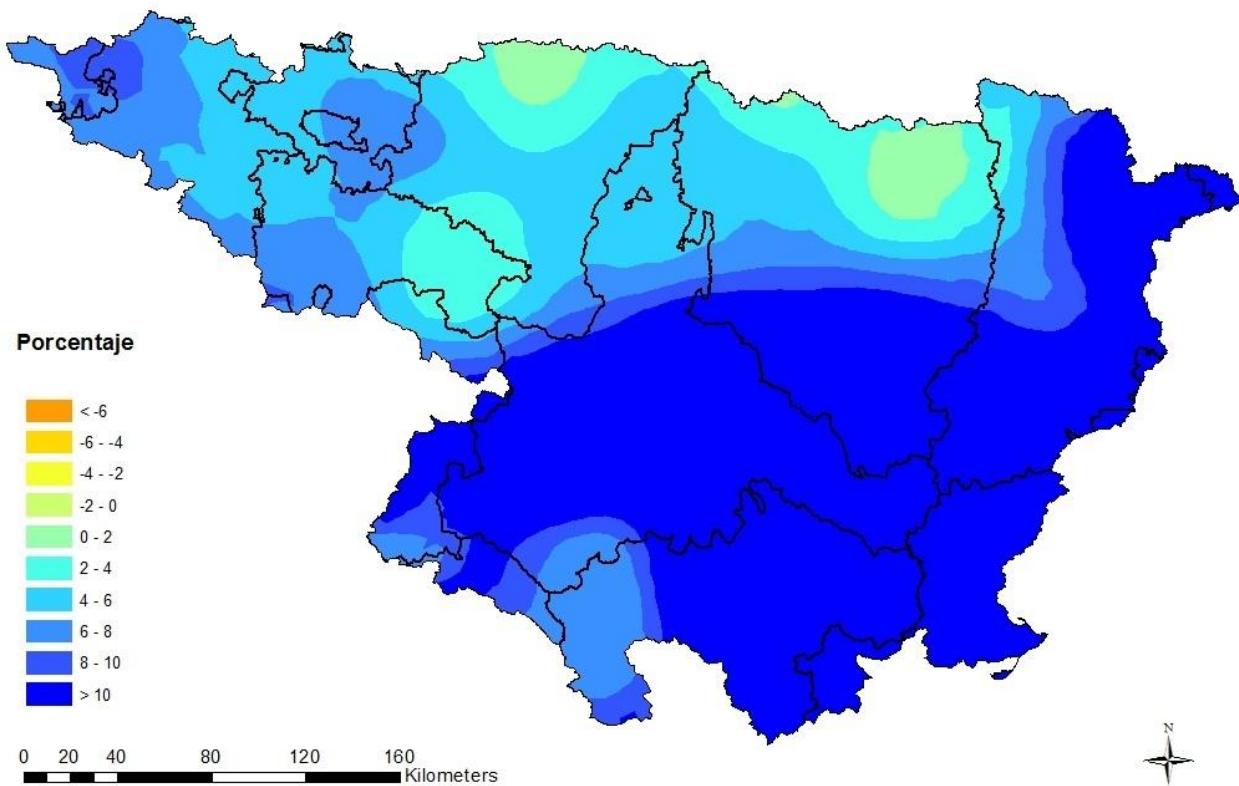
La variabilidad del número de días de precipitación, como se puede ver en la figura 23, es, en conjunto positiva, con una tendencia que además aumenta de forma gradual siguiendo una dirección aproximada NW – SE. Lo más destacable en este aspecto es que, a pesar de la disminución del total de precipitación en la depresión del Ebro, también se está produciendo un aumento de los días en los que se registra esta precipitación. Esto indicaría, a priori, una menor intensidad en las precipitaciones, aunque más adelante veremos que esta afirmación tiene matices importantes.

Por el contrario, el interior y norte de la Comunidad de Navarra, así como la mayor parte del Pirineo tanto aragonés como catalán sufren variaciones mínimas que apenas alcanzan el 2%, del mismo modo que en extremo sur de la Cuenca. En el caso de Navarra, la tendencia de las precipitaciones era ligeramente negativa, lo que indicaría un mayor número de días de precipitación con menores registros, por regla general. En el caso del Pirineo aragonés y del Sistema Ibérico parece que la tendencia del total de precipitaciones es aproximadamente equivalente al de los días de precipitación.

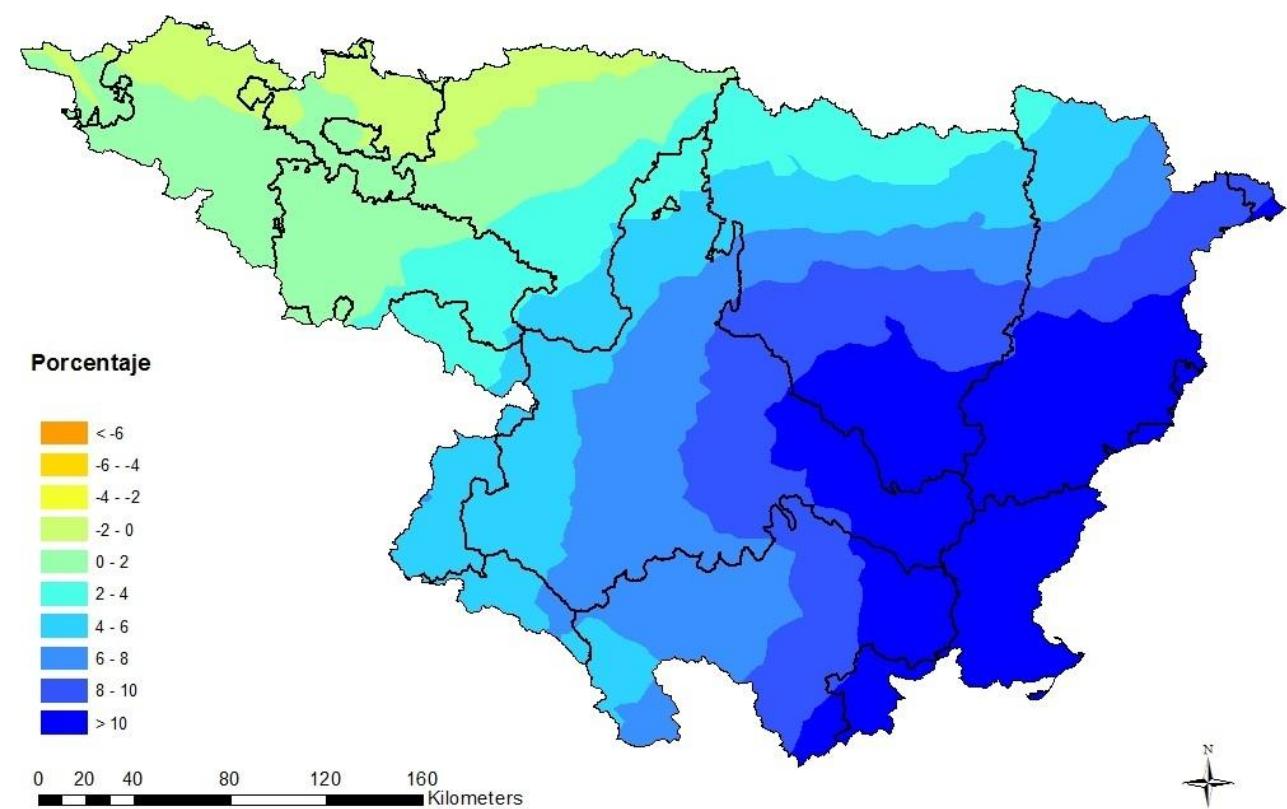


**Figura 23:** Tendencia del número de días de precipitación anual

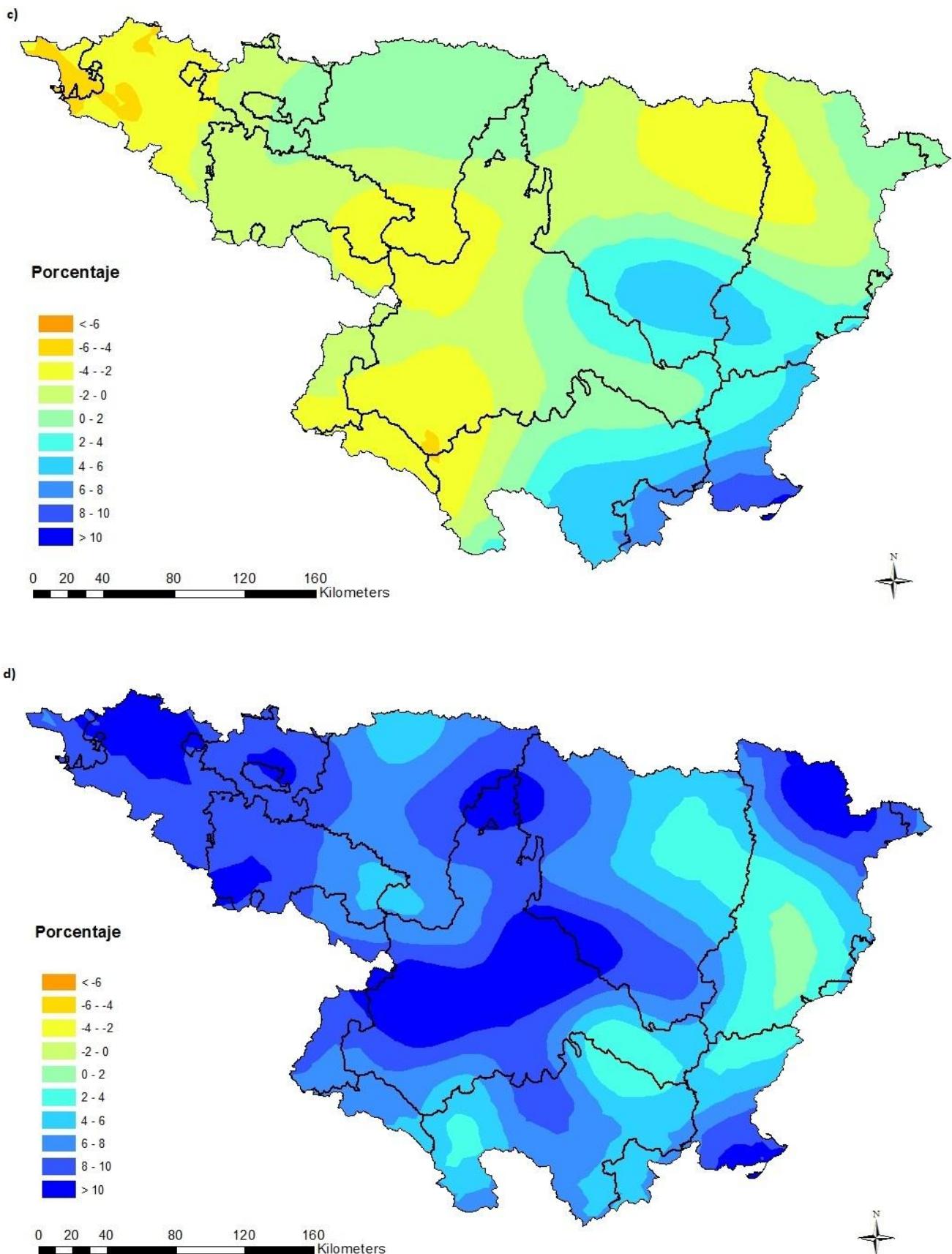
a)



b)



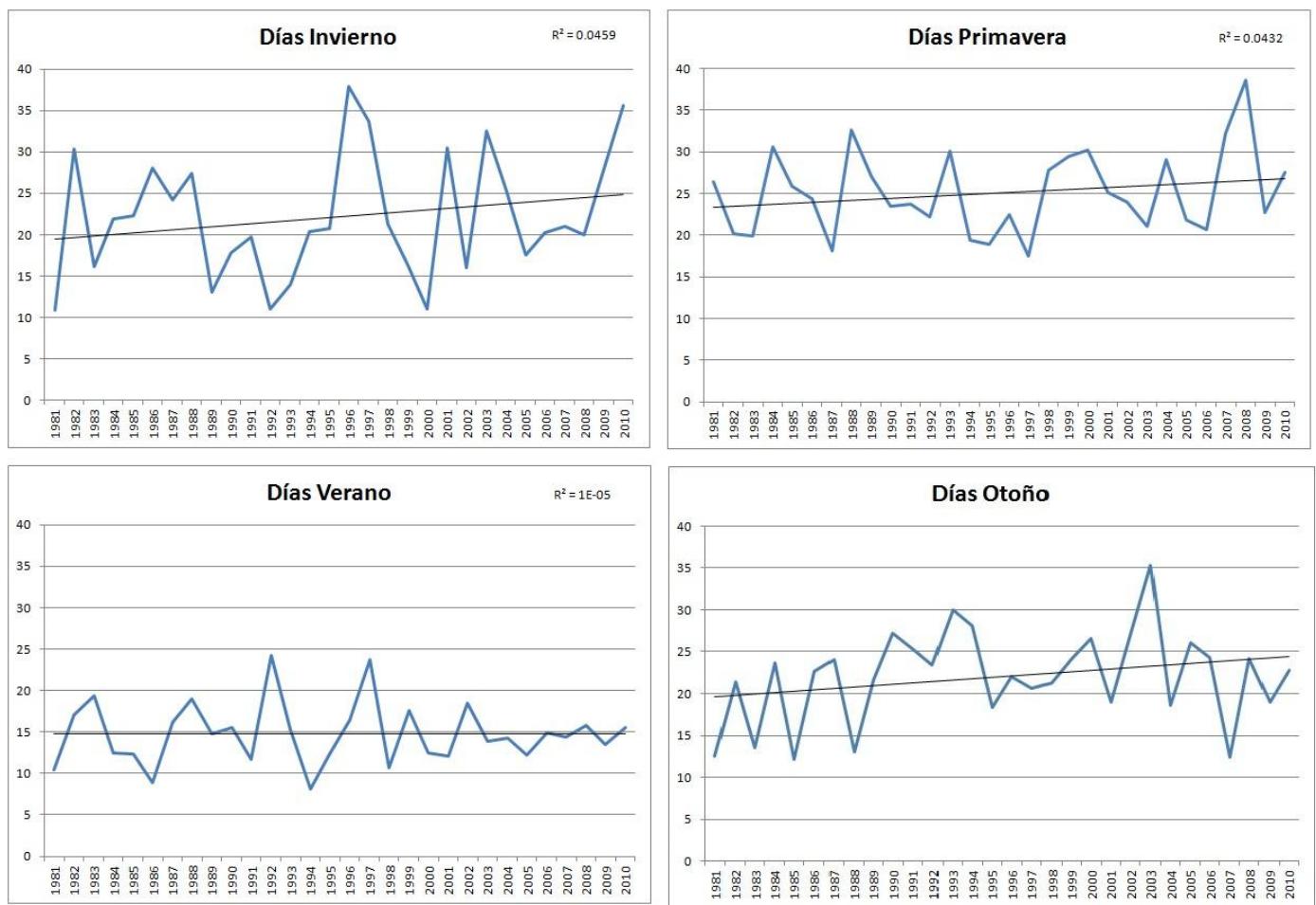
**Figura 24:** Tendencia del nº de días de precipitación para a) Invierno y b) Primavera



**Figura 25:** Tendencia del nº de días de precipitación para c) Verano y d) Otoño

A escala estacional, se pueden observar los siguientes resultados: tanto en Invierno como en Otoño la tendencia positiva abarca toda la zona de estudio, de forma más acusada en el sector noroccidental en Otoño, mientras que en Invierno aumentan sobre todo en la parte más deprimida de la cuenca y en toda la franja este. En Primavera, la tendencia es muy parecida a la anual, aumentando desde el NW hacia el SE. Sin embargo cabe destacar que, aunque de forma suave, en toda la zona más cercana al Cantábrico los días de precipitación tienden a disminuir. Por último, en Verano existe una tendencia en general negativa, excepto en la parte central de la cuenca y sobre todo en la zona más próxima al Mediterráneo, donde el aumento es considerable.

Por último, y como en el caso de las precipitaciones, se han elaborado una serie de gráficas de carácter estacional (figura 26), que muestran los resultados concretos para los 150 observatorios y cuya tendencia puede extrapolarse al resto de la Cuenca. En estas gráfica se aprecia la marcada variabilidad creciente para las estaciones de Invierno, Primavera y Otoño, mientras que para Verano muestra una tendencia prácticamente nula para el conjunto de la cuenca, lo que hablaría de una “compensación” entre el crecimiento en las zonas del norte de Navarra, de la depresión interior y de la vertiente Mediterránea con respecto al resto de la cuenca



**Figura 26:** Promedio estacional del número de días de precipitación para los 150 observatorios de referencia a lo largo del periodo de estudio, y su línea de tendencia

#### **4.3 Estudio de la variabilidad espacial de los percentiles 80 y 90, así como su tendencia temporal**

Con respecto a la concentración de la precipitación, se han elaborado dos tipos de mapas distintos. Por un lado, la distribución de los percentiles 80 y 90 (P80 y P90) de precipitación (figuras 27 y 28), y por otro sus tendencias temporales (figura 29 y 30)

En cuanto a los percentiles, los mapas reflejan los mayores valores en el Pirineo de Huesca y en Navarra, con valores superiores a los 16-20 mm para el P80 y cercanos o incluso superando los 30 mm para el P90. También se encuentran valores altos en la desembocadura del Ebro, probablemente por la influencia mediterránea.

Estos valores indicarían para estas zonas, en el caso del P80, que el 20% de los días de precipitación se registran lluvias superiores a esos 16-20 mm, mientras que el 10% de los días esos valores llegan a superar los 30 mm.

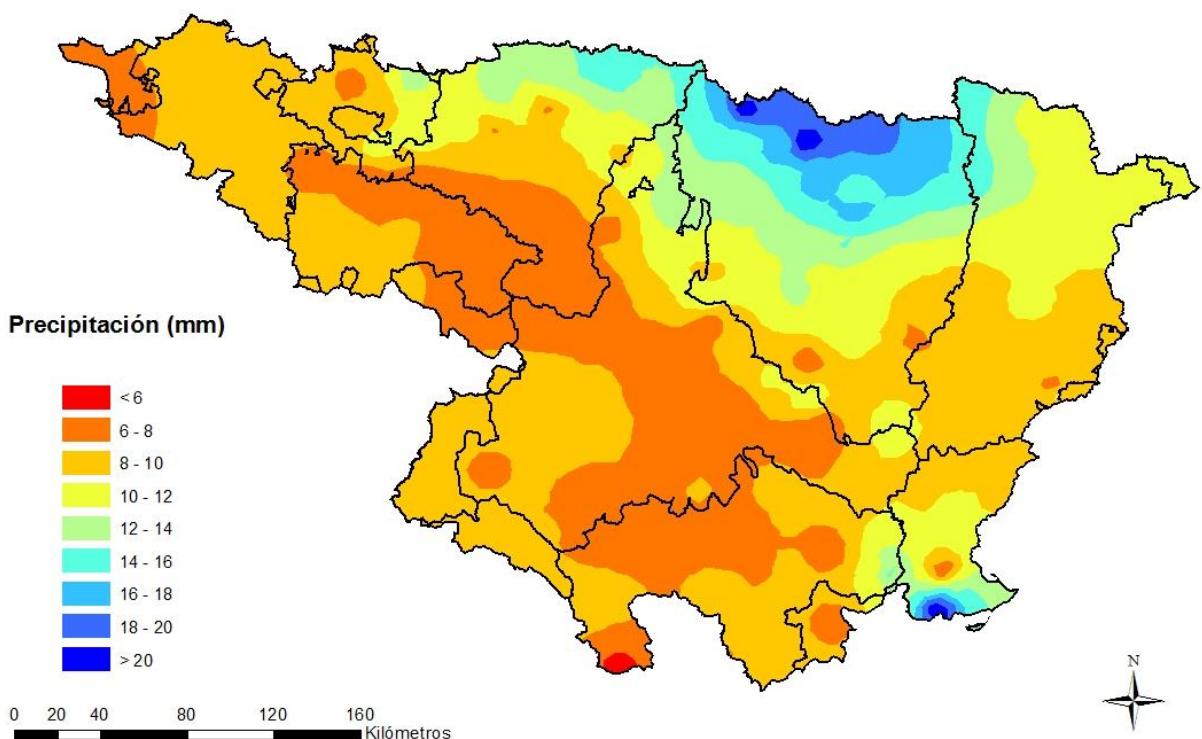
Por otra parte, en la cabecera del valle y debido a la influencia atlántica se dan lluvias más o menos uniformes, sin días claramente torrenciales, como muestran los valores en torno 8-10 mm para el P80 y entre 12 y 16mm para el P90.

Esto quiere decir que el 20% de los días de precipitación se superan los 8-10 mm, o lo que es lo mismo, que cuatro de cada cinco días de lluvia, se trata de lluvias poco intensas que no superan esas cantidades.

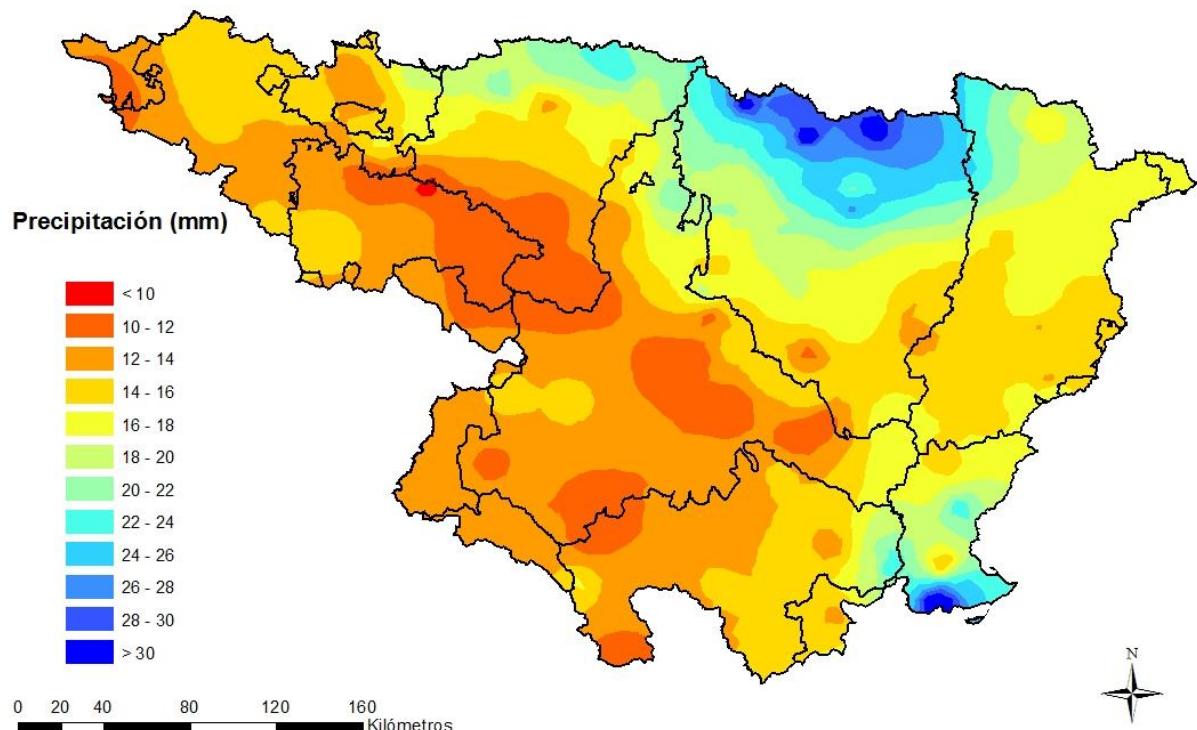
En cambio, en el centro del valle encontramos percentiles todavía menores, que sin embargo no reflejan la posible concentración de la precipitación en los días más o menos torrenciales, debido a que los totales anuales son bajos, y los máximos diarios no son importantes, a pesar de que sean proporcionalmente llamativos con respecto al total anual. Éste hecho concuerda con los datos reflejados en el punto 4.4.

Con respecto a las tendencias, de nuevo se ha trabajado en términos de tanto por ciento cada década. Las cartografías resultantes siguen un patrón bastante marcado, con tendencias positivas tanto para P80 como para P90 en varias zonas, como son la cabecera del valle, el Pirineo Aragonés Oriental y en el Valle del Jiloca.

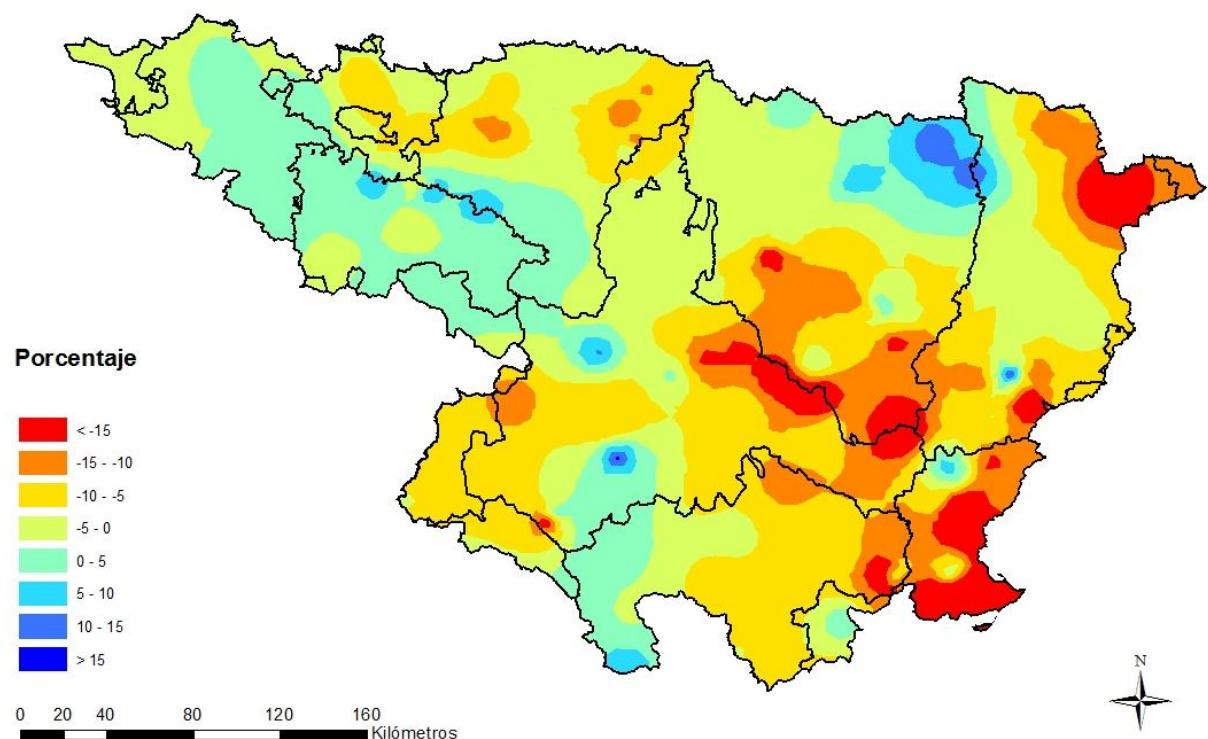
. Por el contrario, el resto de la cuenca tiene tendencias negativas de distinto orden en este aspecto. Las zonas más acusadas por este descenso son el Pirineo de Lérida, la zona de la desembocadura del Ebro, y toda la parte sur de la provincia de Huesca y este de la provincia de Zaragoza, ocupando sobre todo el trazado del Ebro y la comarca de los Monegros.



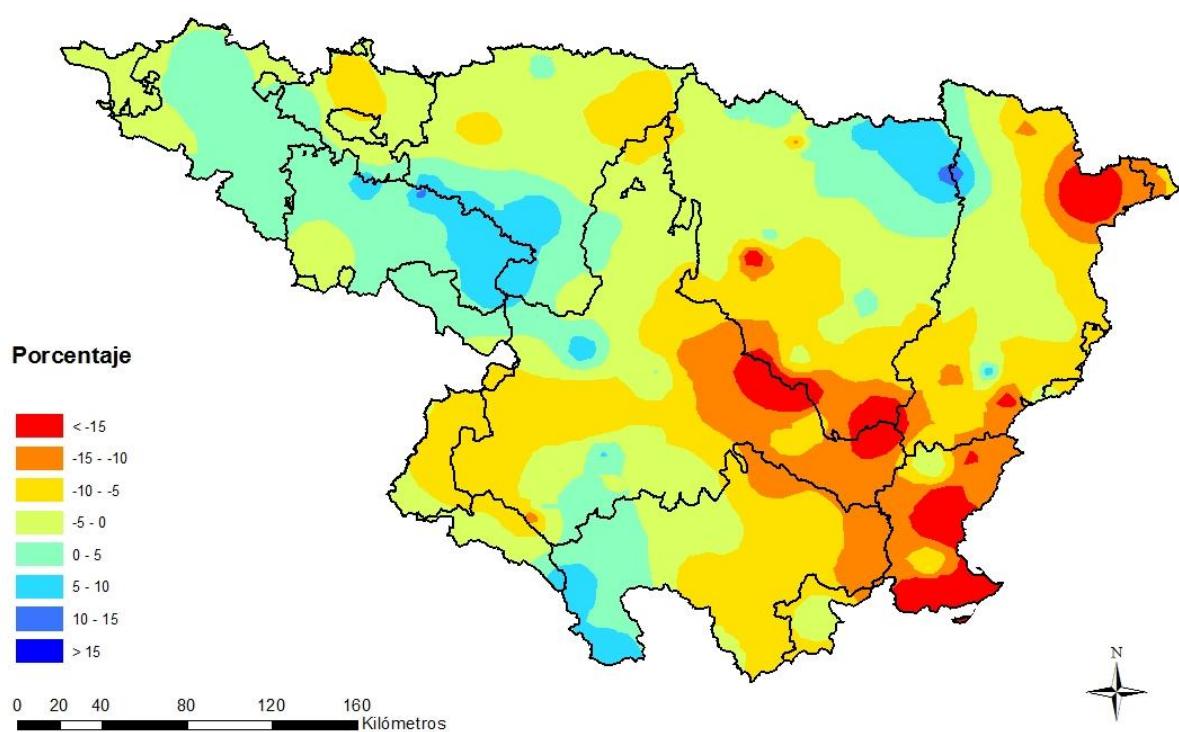
**Figura 27:** Percentil 80



**Figura 28:** Percentil 90



**Figura 29: Tendencia (%/década) del percentil 80**



**Figura 30: Tendencia (%/década) del percentil 80**

#### **4.4 El análisis sobre el porcentaje que, sobre el total, representan los máximos de precipitación diaria, su distribución espacial y su evolución durante los últimos 30 años**

Resulta interesante la cartografía del porcentaje que sobre el total anual de precipitación representa la suma de los 10 máximos. Este valor da una idea de hasta qué punto la precipitación registrada a lo largo de un año en determinadas zonas de la Cuenca del Ebro llega a concentrarse en un número determinado de eventos. Este dato, junto con los percentiles anteriores, puede ser relevante de cara a valorar efectos sobre las actividades antrópicas y la dinámica geomorfológica del territorio.

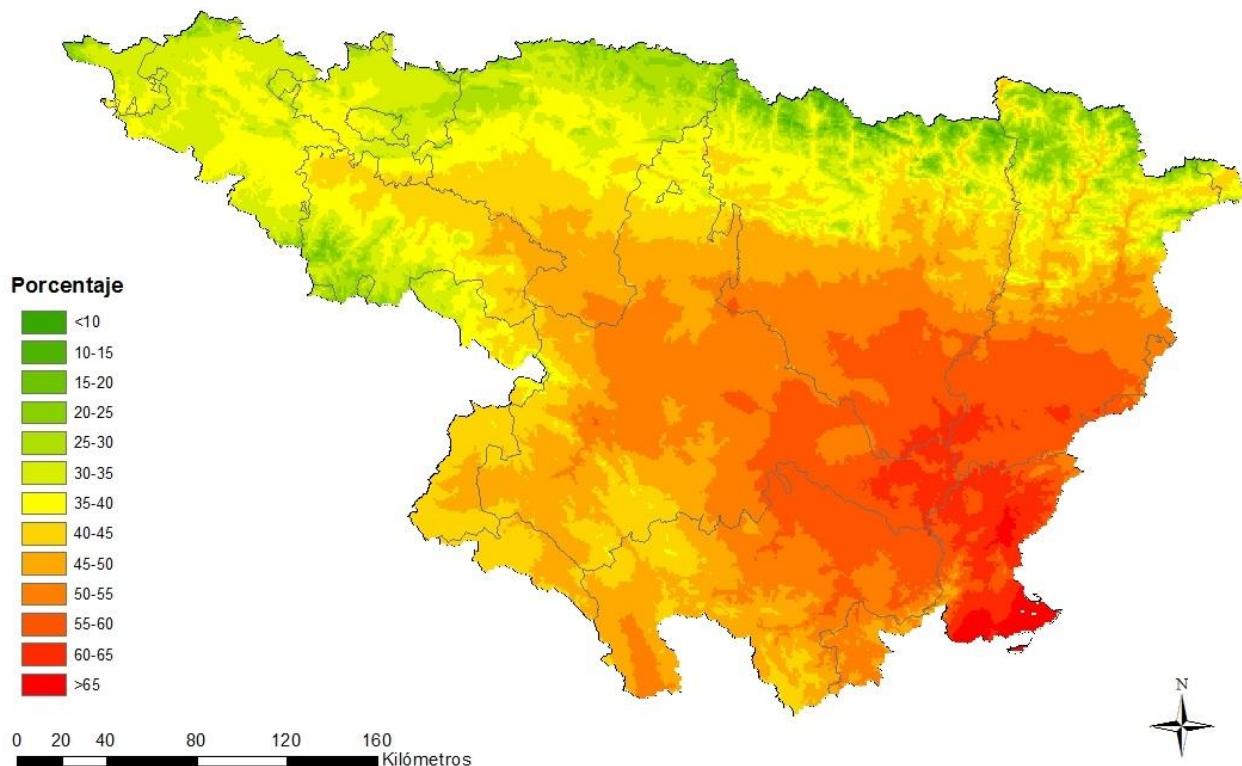
En la figura 31 se ha representado este porcentaje, y la distribución de esta concentración varía de forma muy gradual. Todo el sector norte y noroeste cuenta con valores bajos, lo que indica que, aunque pueda haber precipitaciones más o menos intensas, el valor de éstas sobre el total no es alto, ya que además coincide con las zonas de mayor precipitación anual. En cambio, conforme nos acercamos a la desembocadura del Ebro y por tanto al Mediterráneo, este porcentaje aumenta hasta alcanzar valores cercanos al 70%, lo que indica una gran intensidad de las tormentas unido a valores de precipitación anual más bien bajos, sobre todo en la zona media y baja del valle.

Toda la zona de la depresión interior alcanza por tanto los mayores porcentajes, pero sin embargo se había observado con anterioridad el aumento general en los días de precipitación y la disminución en el total de las precipitaciones.. Esta combinación de factores parece conducir a unas precipitaciones extremas, es decir, durante la mayor parte de los días de precipitación, ésta resulta muy escasa, pero cuando no es así, las precipitaciones son muy intensas.

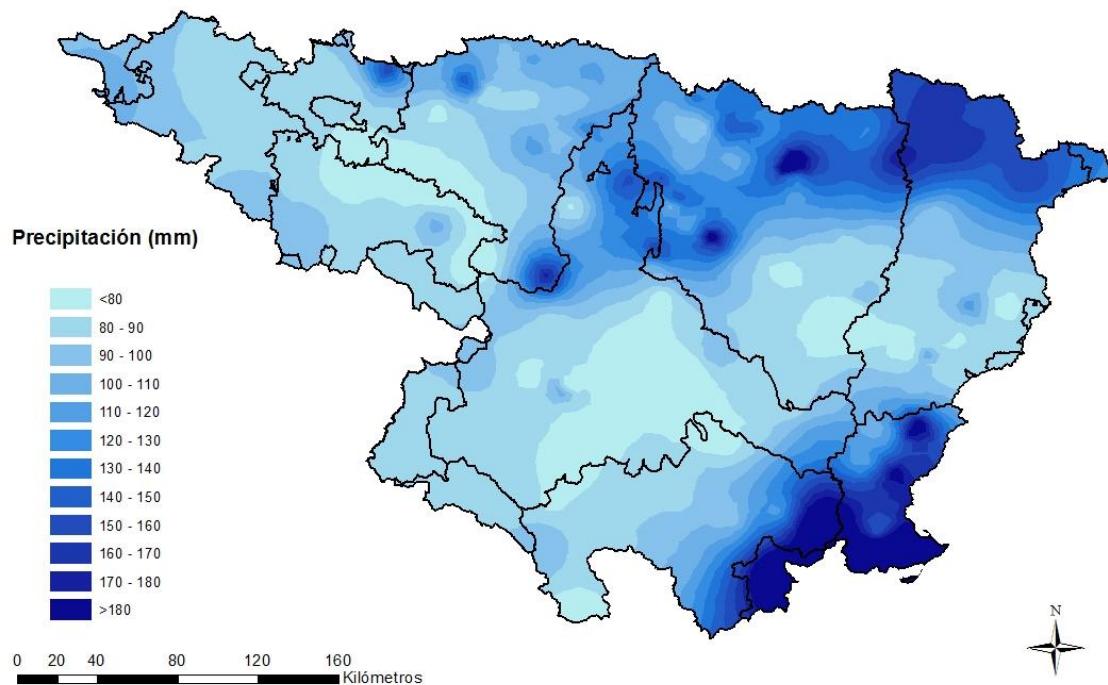
Además, para completar esta información, además se ha elaborado una cartografía con los máximos históricos en el periodo de estudio (figura 32). Los valores más elevados se dan en el Pirineo (Boltaña 275 mm, Embalse de la Peña 207 mm, Biescas 160 mm) y en el sector más cercano al Mediterráneo, dominado por los aguaceros torrenciales en la estación estival (Godall 250 mm, Amposta 226 mm, Morella 233 mm).

En el otro lado de la balanza se sitúan los observatorios del interior de la cuenca, que apenas han registrado eventos superiores a 60 mm, como son Fuentes de Ebro 56 mm, Tamarite 56'5 o Belver 60 mm.

La tabla completa con los valores máximos recogidos en los 150 observatorios que forman este trabajo se encuentra en el Anexo 5.



**Figura 31:** Porcentaje de los 10 valores máximos de pmm en 24 horas con respecto a la media anual



**Figura 32:** Volumen máximo de precipitación caída en 24horas

#### 4.5 Identificación de la posible relación entre distribución de los días de precipitación y circulación general atmosférica

La Oscilación del Atlántico Norte (NAO en sus siglas en inglés) consiste en la variabilidad observada de patrones de circulación atmosférica debido a las diferencias de presión entre la región anticiclónica subtropical de las Azores y la región de bajas presiones cerca de Islandia. Se trata de la mayor fuente de variabilidad tanto estacional como interdecadal de la circulación atmosférica sobre el continente europeo, y por ende, sobre la Península Ibérica, especialmente en invierno, cuando es más pronunciada (Añel Cabanelas et Al, 2005)

En el caso que nos ocupa, la fase negativa de la NAO consiste en el debilitamiento del anticiclón de las Azores, que permite que las borrascas atlánticas se desplacen por latitudes más bajas de las habituales, de manera que se aproximarán al norte de la Península Ibérica. Por el contrario las fases positivas suponen un tiempo más seco en el sur de Europa e inviernos más húmedos y tormentosos en el norte (Hurrell, 1995)

A partir de los datos obtenidos, y para una serie de 9 observatorios distribuidos de forma homogénea por toda la Cuenca del Ebro, se ha realizado un breve estudio sobre la posible relación entre la distribución de la precipitación y la circulación general atmosférica en la zona de estudio.

Las 9 estaciones escogidas han sido Vitoria-Foronda, Pamplona, Logroño, Huesca, Fiscal, Daroca, Zaragoza, Lleida y Tortosa, todas ellas salvo Fiscal estaciones de referencia dentro de la Cuenca del Ebro.

El índice NAO mensual se han correlacionado ( $r$  de Pearson) con los días de precipitación mensuales de todo el periodo de estudio, correspondientes a cada observatorio (M. Vide, Fdez Belmonte, 2001). Para  $N=30$  pares de datos, si  $|r| > | -0.3494, +0.3494 |$  rechazaremos la hipótesis nula con un nivel de confianza del 95%,  $\alpha<0.05$ , es decir consideraremos que existe relación estadísticamente significativa. Esta será más evidente cuanto más cercana a -1 ó 1.

	Foronda	Pamplona	Logroño	Huesca	Fiscal	Zaragoza	Daroca	Lleida	Tortosa
ENERO	<b>-0.49707722</b>	<b>-0.52775638</b>	<b>-0.65758368</b>	<b>-0.5498192</b>	<b>-0.54193968</b>	<b>-0.58321247</b>	<b>-0.64632023</b>	<b>-0.45518487</b>	<b>-0.5442411</b>
FEBRERO	<b>-0.53757286</b>	<b>-0.53167689</b>	<b>-0.50692532</b>	<b>-0.54045209</b>	<b>-0.53762616</b>	<b>-0.5503462</b>	<b>-0.5106316</b>	<b>-0.50141041</b>	-0.20330843
MARZO	<b>-0.33739463</b>	<b>-0.42442236</b>	<b>-0.5229934</b>	<b>-0.57826817</b>	<b>-0.56553664</b>	<b>-0.5103119</b>	-0.28941102	<b>-0.50166026</b>	-0.14302475
ABRIL	-0.11343918	-0.10138241	-0.14404269	-0.24502625	-0.30907533	-0.27363645	-0.10850723	-0.35190501	-0.20126417
MAYO	<b>-0.38127999</b>	-0.2580291	<b>-0.37968949</b>	<b>-0.3828383</b>	<b>-0.40857723</b>	<b>-0.43938786</b>	<b>-0.32430378</b>	-0.23023492	<b>-0.36640147</b>
JUNIO	-0.21753261	-0.37217416	-0.11123197	0.05896966	-0.19267435	0.05416312	0.26199764	-0.10165468	-0.11493305
JULIO	0.1441014	0.08417426	0.25030106	0.32675848	0.04354785	0.27463448	0.24104217	0.14381829	0.01496627
AGOSTO	0.17881037	0.20675835	0.2224229	0.20483748	0.11670372	0.43242741	0.27972042	0.00708234	-0.07426279
SEPTIEMBRE	-0.36313136	-0.40284187	-0.02891638	-0.27074963	-0.15537593	-0.23512102	-0.20465354	-0.09102561	0.01101535
OCTUBRE	-0.36111556	-0.22284903	-0.33061092	-0.09918225	-0.1423187	-0.10793193	0.00957228	-0.2606186	0.0862473
NOVIEMBRE	-0.22078938	-0.24497173	<b>-0.31579211</b>	<b>-0.39141701</b>	<b>-0.39714272</b>	<b>-0.37396246</b>	<b>-0.44733257</b>	-0.11776826	-0.21814149
DICIEMBRE	<b>-0.30697714</b>	<b>-0.31353398</b>	<b>-0.34862574</b>	<b>-0.62993615</b>	<b>-0.72694657</b>	<b>-0.50138495</b>	<b>-0.53677366</b>	<b>-0.54432475</b>	<b>-0.68044906</b>

**Tabla 3:** Correlación (Pearson) entre el Índice Nao de Hurrell con el número de días de precipitación en las nueve estaciones de ejemplo. En negrita correlación estadísticamente significativa

Estos resultados coinciden con lo expuesto con anterioridad: para las fases negativas de la NAO, la distribución de las precipitaciones se ve afectada dentro de la Cuenca del Ebro. Valores más negativos de este índice se relacionan con mayor número de episodios lluviosos, especialmente para los meses invernales, si bien también cabe destacar la correlación existente en los meses de Mayo y Noviembre.

También se realizó la misma operación correlacionando este índice NAO con el total de precipitaciones, aunque la correlación obtenida seguía siendo estadísticamente significativa, no era tan evidente como la que se ha mostrado con los días de precipitación.

## 5. DISCUSIÓN

La distribución espacial de las precipitaciones, su cuantía y las características generales de la pluviometría, son aspectos que, como señalábamos en la introducción, constituyen información clave a la hora de gestionar el recurso agua en un espacio de características tan complejas y usos tan intensivos sobre ese recurso como es el valle del Ebro. La referencia al periodo 1981-2010 es además fundamental. Se trata del periodo climático normal OMM más reciente, el que nos está mostrando la realidad de la pluviometría anual y un periodo, además, en el que ya se están empezando a observar las consecuencias del señalado por el IPCC como el cambio climático antropogénico.

No eran de esperar a partir de este estudio grandes cambios en cuanto a las pautas generales de distribución espacial de la pluviometría en la cuenca. Los factores de carácter geográfico, estructural y atmosférico que la condicionan no han variado significativamente respecto a los anteriores periodos normales, por lo que esos gradientes positivos centro periferia se mantienen. Hacia el norte es clara la influencia de los Pirineos y la Cordillera Cantábrica. Hacia el sur, la Ibérica condiciona también un incremento de la pluviometría siendo un hecho bien conocido que la magnitud del gradiente es significativamente inferior. Hacia el Mediterráneo y el Cantábrico se marcan también incrementos, más notables en el caso de ese gradiente NW.

En relación a los totales anuales y estacionales calculados para este periodo, la literatura anterior ofrece pocos datos para el conjunto de la cuenca comparables a los generados en este estudio, en el que esa aproximación se ha realizado a partir de una modelización en SIG y no como la media de un conjunto de estaciones. Es por ello que no podemos ofrecer resultados en cuanto a esa comparativa, pero sí es cierto que los datos ofrecidos para el periodo 1981-2010 en el territorio que de nuestro área de estudio pertenece administrativamente a Aragón, no varían de forma significativa con los datos del Atlas Climático de Aragón, calculados para el 1971-2000 (Cuadrat et al, 2007).

No se aprecian pues cambios en cuanto a los totales pluviométricos entre ambos periodos, como tampoco parece observarse una tendencia clara de las precipitaciones de la Cuenca en el periodo de estudio. Utilizando un grupo de observatorios que entendíamos representativos de distintos ambientes, para el conjunto del Valle del Ebro se observa una tendencia ligeramente positiva, en torno al 1%, que quizá debería considerarse como neutra en razón de su nula significación estadística, si bien como ya se ha explicado la distribución de esta tendencia si dividimos la Cuenca en distintas zonas más localizadas es algo más marcada (en torno a un 5%), tanto positiva como negativa. Esta difusa señal de la tendencia, está en la línea de lo señalado por el IPCC (Trenberth et al, 2007) para las zonas más cercanas al Mediterráneo. Las modelizaciones parecen mostrar una tendencia negativa, pero el elevado grado de incertidumbre que ofrecen esos modelos anima a la ejecución de estudios como el que presentamos aquí que ofrezcan resultados sobre datos reales que ayuden a monitorizar esas tendencias.

Pero una cuestión es el "cuánto llueve" y otra es el "cómo llueve". Y en este aspecto sí que los resultados mostrados en el apartado anterior nos llevan a pensar en variaciones más significativas. En primer lugar destaca algo que parece contrario a la percepción general que sobre la evolución reciente de la precipitación parece haberse instalado en la sociedad. Y es que la tendencia en el número de días de lluvia está aumentando, registrándose de media valores de entre un 5 y 10% más de días para cada 10 años, lo que indicaría un crecimiento de entre un 15% y un 30% en el número de días de lluvia durante el periodo de estudio. La cartografía además muestra unos patrones espaciales muy evidentes en cuanto a este incremento, general en toda la cuenca pero mucho más marcado en su sector central y en las zonas de influencia más mediterránea.

Esto nos llevaría así a una variación en ese "cómo llueve" al que antes aludíamos. La continuidad en cuanto al total de precipitaciones, unido al aumento del número de días de lluvia y a la distribución de los porcentajes de los días de máxima intensidad muestran una evolución hacia un marco con precipitaciones extremas, esto es, muchos días de lluvias débiles, y un escaso número de días en el que se descarga cada vez más precipitación con respecto al total anual. Las tendencias de los percentiles 80 y 90, o lo que es lo

mismo, la tendencia a que el 20 y el 10% de las precipitaciones se concentren por encima de los valores actuales, es creciente, de en torno al 3% por década, lo que no hace sino confirmar estas ideas.

Es evidente que estos cambios pueden afectar a la gestión que hacemos del recurso agua o a los efectos que las precipitaciones puedan tener sobre los sistemas naturales. El agua precipitada y la escorrentía son los principales agentes modeladores del paisaje en la Cuenca del Ebro. Este régimen de precipitaciones conlleva una transformación constante en la geomorfología, que se ve afectada por un mayor índice de erosión a su vez provocada por la mayor intensidad en los eventos pluviométricos, algo a tener en cuenta de nuevo con respecto a la gestión del territorio. La erosión o la viabilidad y desarrollo de la vegetación están condicionadas por el agua y así sólo un adecuado conocimiento de cómo funcionan las lluvias puede ayudarnos a resolver problemas de planificación relacionados con esos aspectos. Asimismo, la política de creación de embalses, que se apoya en la tendencia negativa de las precipitaciones quizá no tenga tanto sentido tras los resultados obtenidos, si bien desde este trabajo sólo se refleja el punto de vista meramente meteorológico, sin querer profundizar en el resto de aspectos del que dependen la gestión del agua.

Esta descripción de la pluviometría ha de ir acompañada de un intento de explicación o por lo menos de unas líneas posibles futuras de interpretación para el desarrollo de posteriores trabajos. En nuestras latitudes es bien conocido que la oscilación del Atlántico Norte, la conocida como NAO, tiene una influencia decisiva sobre el comportamiento de la pluviometría. Son numerosos los trabajos que describen esa influencia sobre las sequías, los totales de precipitación, las tendencias, las variaciones estacionales, etc. En el caso de este trabajo, ese acercamiento preliminar a integrar la circulación general de la atmósfera sobre nuestros resultados nos ha permitido confirmar que, sobre todo con respecto al número de días de precipitación total, existe una fuerte correlación durante los meses de invierno, que además es, según la bibliografía, dónde esta correlación debería ser más evidente. Pero como se ha explicado, este no era el objetivo del trabajo, y se ha valorado a modo de información extra, dejando una puerta abierta a estudios posteriores.

## 6. CONCLUSIONES

- El reparto espacial de las precipitaciones en la Cuenca del Ebro en el periodo 1981-2010 es similar al descrito por la literatura para otros periodos normales, marcándose unos claros gradientes positivos desde el centro de la cuenca a la periferia relacionados con la influencia del relieve o la cercanía al mar.
- Primavera y otoño se configuran como las estaciones más lluviosas para el conjunto de la cuenca, sin embargo analizando el porcentaje sobre el total anual, los mapas reflejan bien las distintas influencias
- Desde el punto de vista de su evolución temporal, no se observa una señal clara en cuanto a la tendencia de la precipitación en el conjunto de la cuenca. La cartografía señala descensos en la zona central, correspondiente además con los espacios más secos, e incrementos en la Ibérica y en el Sobrarbe y la Ribagorza. En ambos casos en valores porcentuales inferiores al 3-4%.
- El número total de días de precipitación señala también esos mismos ejes relacionados con los totales pluviométricos. Sin embargo, ese número de días de lluvia se ha incrementado a lo largo del periodo estudiado. Destaca la señal positiva que para toda la zona de estudio muestra la tendencia de esta variable, con amplios sectores en los que se ha cuantificado un incremento superior al 10%/década en el número de días de lluvia, en especial en el eje del Ebro y en las zonas más cercanas al Mediterráneo.
- Análisis preliminares hechos sobre observatorios representativos de distintos ambientes bioclimáticos muestran relación entre la NAO y el número de días de lluvia.
- En relación con la concentración, se observa que es asimismo en la zona más cercana al Mediterráneo donde los 10 máximos anuales agrupan un porcentaje mayor de la precipitación anual, superior al 50-60%. No se observan sin embargo tendencias de cambio en cuanto a esta variable.

## **7. AGRADECIMIENTOS**

Para poder realizar este trabajo hay que tener en cuenta a una serie de personas sin las cuales no habría sido posible:

- en primer lugar, a todos los colaboradores que, durante 30 años, han recogido y siguen haciéndolo, los datos de cada uno de los 150 observatorios utilizados. Sin su paciencia y dedicación esto no podría haberse llevado a cabo;
- por otra parte, a las personas que se han encargado de pasar estos datos a formato digital, lo que ha permitido su posterior tratado y depurado;
- a Roberto Serrano por su tiempo y ayuda con la aplicación del script de R diseñado para el relleno de lagunas,
- a toda la Delegación Territorial de AEMET por el trato ofrecido, por sus instalaciones y por el apoyo de toda su plantilla, especialmente de Ismael Sanambrosio y de Samuel Buisán a los cuales les he robado buena parte de su tiempo durante el verano.
- por último, a la Universidad de Zaragoza y en concreto al Departamento de Geografía y Ordenación del Territorio por su colaboración, especialmente a Miguel Ángel Saz como coordinador principal de este trabajo.

## **8. BIBLIOGRAFÍA**

- Añel, J.A., De la Torre, L., Gimeno, L., Nieto, R. (2005): "Breve revisión a la Oscilación del Atlántico norte y su influencia sobre la Península Ibérica y Canarias" Universidad de Vigo
- Beguería, S., Serrano, R. (2012): "Filling gaps in daily precipitation series" – Sin publicar
- Cuadrat Prats, J.M., Saz Sánchez, M.A., Vicente Serrano, S.M. (2007): "Atlas climático de Aragón". Departamento de Medio Ambiente, Gobierno de Aragón.
- Cuadrat, J.M., Serrano, R., Saz, M.A., Marín, J.M. (2011): "Patrones temporales y espaciales de la precipitación en Aragón desde 1950" Geographicalia, 59-60, pp 85-94.
- De Luis, M., González-Hidalgo, J.C., Rafael Sánchez, J. (1996): "Análisis de la distribución espacial de la concentración diaria de precipitaciones en el territorio de la Comunidad Valenciana" Cuadernos de Geografía, 59, pp 47-62
- Hurrell, J.W. (1995): "Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperature and precipitation". Science, 269, pp 676-679.
- Martín Vide, J., Fernández Belmonte, D. (2001): "El índice NAO y la precipitación mensual en la España peninsular" Investigaciones geográficas, nº 26, pp 41-58
- Nadaraya, E. A. (1964). "On Estimating Regression". Theory of Probability and its Applications
- Trenberth, K.E., P.D. Jones, P. Ambenje, R. Bojariu, D. Easterling, A. Klein Tank, D. Parker, F. Rahimzadeh, J.A. Renwick, M. Rusticucci, B. Soden and P. Zhai, (2007): Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Vicente Serrano, S.M., Saz Sánchez, M.A. (2002): Cartografía de precipitaciones y temperaturas en el Valle Medio del Ebro mediante la utilización de diferentes técnicas estadísticas. Geographicalia, 42, pp 73-92.
- Vicente Serrano, S.M, Lanjeri, S., López Moreno, J.I (2007): "Comparison of different procedures to map reference evapotranspiration using geographical information systems and regression-based techniques". International Journey of Climatology, pp 1103-1118.
- Vicente-Serrano, S.M; Saz Sánchez, M.A; y; Cuadrat, J.M; (2003): "Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature". Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio. Universidad de Zaragoza. Vol. 24; P.161-180
- Watson, G. S. (1964). "Smooth regression analysis". The Indian Journal of Statistics, Series A 26 (4): 359–372

