

# CARACTERIZACIÓN ESPACIO-TEMPORAL DE LA EVOLUCIÓN DE LA PRECIPITACIÓN ANUAL EN LA CUENCA DEL EBRO

Jesús ABAURREA, Jesús ASÍN y Alberto CENTELLES

*Departamento de Métodos Estadísticos. Universidad de Zaragoza.*

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es realizar una caracterización espacio-temporal de la evolución de la precipitación en la cuenca del Ebro. Para ello se construye una base de datos con 29 series con información mensual del periodo 1916-2000. Por estaciones, y posteriormente con las series anuales, se realiza un proceso de homogeneización. Mediante un análisis de conglomerados, complementado con un análisis de las tendencias en la lluvia anual, se efectúa una regionalización de la cuenca. Para cada una de las regiones definidas se construye una serie temporal que describe la evolución de la lluvia en ese territorio. Sobre esas series regionales se realiza un análisis de tendencias.

**Palabras clave:** Precipitación, homogeneización, regionalización, análisis de tendencias, cuenca del Ebro.

## ABSTRACT

*The aim of this work is the spatial-time characterisation of the rainfall evolution in the Ebro river basin. A database for a network of 29 meteorological stations throughout the basin with monthly rainfall information for the period 1916-2000 has been built. The corresponding seasonal and annual series were subjected to a homogenization process. A cluster analysis complemented with a trend analysis of annual rainfall allows us to classify the basin in eight homogeneous areas. Finally, regional time series describing the rainfall evolution in each defined region have been built and analysed to study their trend behaviour.*

**Key words:** Rainfall, homogenization, regional classification, trend analysis, Ebro basin.

## 1. INTRODUCCIÓN

La precipitación es una variable climática con una gran variabilidad tanto espacial como temporal, por lo que la caracterización de su evolución en un territorio requiere la disponibilidad de un número suficiente de series cronológicas que deben cubrir un intervalo temporal amplio.

La creciente preocupación por la incidencia del cambio climático ha contribuido a que los estudios sobre la evolución de la lluvia, a muy diferentes escalas, sean abundantes, ver Houghton *et al.* (Eds.), *Climate Change 2001: The scientific basis*. Para el territorio español peninsular o sobre regiones del mismo han aparecido estudios sobre este tema en los dos volúmenes que recogen las comunicaciones a los congresos I y II de la A.E.C. (RASO y MARTÍN-VIDE, 1999; PÉREZ

CUEVA, LÓPEZ BAEZA y TAMAYO, 2001) y en la monografía sobre detección del cambio climático regional editada por BRUNET y LÓPEZ (2001).

Los trabajos que analizan la cuenca del Ebro se refieren a observatorios aislados o a regiones dentro de la misma y suelen estudiar intervalos temporales más breves que el analizado aquí. Entre ellos citaremos a CREUS (1996) que analiza el intervalo 1911-1990 en cuatro capitales de la cuenca, GARCÍA RUIZ *et al.* (2001) que estudian la precipitación en los valles pirenaicos aragoneses en el marco de un estudio de recursos hídricos y, finalmente, el PHN (2001) que en su volumen tercero hace el análisis de: (a) una serie 1940-1994 que resume la precipitación de la cuenca y (b) las series de cuatro observatorios de la misma con medidas a partir de 1880.

El análisis de tendencia de variables climáticas debe hacerse sobre bases de datos sometidas a un riguroso control de homogeneidad. La probable presencia de inhomogeneidades no climáticas en las series de gran longitud necesarias para estos estudios puede falsear las conclusiones de los mismos. En lo que respecta al control de homogeneidad de datos de precipitación cabe citar los trabajos a escala nacional de ALMARZA *et al.* (1996), GARRIDO *et al.* (1996) y GONZÁLEZ-ROUCO *et al.* (2001). De ámbito regional se pueden consultar trabajos de homogeneización en la monografía editada por BRUNET y LÓPEZ (2001).

El presente estudio, algunos de cuyos resultados fueron avanzados en GARCÍA VERA *et al.* (2002), tiene como objetivo la caracterización espacio-temporal de la evolución de la precipitación anual en la cuenca del Ebro y el análisis de la tendencia observada en ella.

## 2. FASES DEL TRABAJO

1.- Selección de las estaciones meteorológicas y construcción de las series base del estudio. Se seleccionaron las estaciones del Instituto Nacional de Meteorología situadas en la cuenca que posibilitaban la construcción de series de, al menos, 70 años. Se buscó alcanzar una buena distribución espacial y la presencia de puntos de observación en las principales áreas generadoras de recursos (periferia de la cuenca). En el proceso de construcción se analizaron comparativamente los fragmentos de series que podían formar la mejor composición posible (control de homogeneidad, de datos ausentes, etc.) y, una vez formadas las series, se realizó un proceso de detección de datos anómalos y de estimación de los datos perdidos (ver GARCÍA VERA *et al.*, 2002).

2.- Homogeneización de las series construidas. Este proceso se realizó siguiendo el procedimiento propuesto por MOBERG y ALEXANDERSSON (1997), basado en los tests SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) para detectar cambios de nivel y de tendencia lineal.

3.- Organización espacial. El objetivo es definir dentro de la cuenca regiones en las que la evolución temporal de la precipitación haya sido homogénea y diferenciada. La información utilizada de cada observatorio ha sido su serie homogeneizada de lluvia anual. El procedimiento se basa en un análisis de conglomerados, que identifica los observatorios con una evolución semejante, complementado con un análisis de la tendencia observada. Una vez definidas las regiones, se construyeron series que reflejaran la evolución de la lluvia en cada una de ellas. La serie regional se define como un promedio de anomalías (diferencias a la media 1961-90) de las series de logaritmos de precipitación de los observatorios que definen la región.

4.- Análisis de fases y tendencias. La curva de tendencia se extrae de las series regionales mediante un suavizado *lowess* (CLEVELAND, 1979), que utiliza un algoritmo de regresión local con pesos para asociar a cada dato un valor estimado (valor suavizado). En su cálculo intervienen el valor observado en el año así como los valores de años adyacentes, en un número que define el parámetro de ventana asociado al suavizado; el procedimiento de estimación es robusto (poco sensible) a la presencia de datos extremos. La curva suavizada obtenida mediante *lowess* proporciona el nivel medio de lluvia en cada época y muestra la evolución de la precipitación. Sobre dichas curvas se determinan los periodos de crecimiento y decrecimiento y se han estimado las tasas de cambio. Finalmente, se realiza un análisis de la significación estadística de las tendencias observadas en el último periodo (1970-2000 aprox.) utilizando modelos de regresión frente al tiempo.

### 3. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS HOMOGENEIZADA

#### 3.1. Selección de observatorios y construcción de las series

En la Tabla 1 se describen las 29 series temporales construidas y su composición. El número de observaciones ausentes es 793 en un conjunto de, aproximadamente, 32100 datos mensuales.

La mayor parte de las series (24 de las 29) se componen con datos de varias estaciones meteorológicas. Sólo en cuatro (Oña, Borja, Gerri de la Sal y Longares) se aplicaron factores de corrección en el momento de componer las series, para equiparar los niveles medios de los fragmentos a unir. El tipo de factor a aplicar se decidió tras analizar los cocientes entre la precipitación por meses o estaciones en los años completos comunes; el factor se estimó, en casi todos los casos, mediante una media recortada al 5% de los cocientes estacionales. En general se prefirió que las posibles inhomogeneidades debidas a cambios de localización se ajustaran en la fase de homogeneización.

La detección de datos anómalos y la posterior estimación de datos perdidos se efectuó sobre las series mensuales (29x12) siguiendo criterios ya utilizados en anteriores trabajos (ABAURREA *et al.*, 2001). Para un mayor detalle véase GARCÍA VERA *et al.* (2002).

#### 3.2. Homogeneización de las series

El proceso de homogeneización fue aplicado en primer lugar a las series de precipitación estacional (Invierno, DEF; Primavera, MAM; Verano, JJA y Otoño, SON). Posteriormente, las series homogeneizadas se agregaron para formar una serie anual donde cada dato acumula la lluvia de diciembre a noviembre y el conjunto de series anuales fue sometido a un nuevo proceso de homogeneización. El periodo de referencia considerado ha sido el intervalo 1961-90 y el intervalo temporal homogeneizado 1916-2000.

En la homogeneización estacional se corrigieron 69 inhomogeneidades (6 cambios de tendencia y 63 cambios de nivel) en 21 observatorios; en el proceso anual posterior se corrigieron 26 (23 saltos y 3 cambios de tendencia) en 13 observatorios. Cabe señalar que seis de los observatorios (Daroca, S. Esteban de Litera, Castellote, Zaragoza-Aeropuerto, Tivissa y Tortosa) no requirieron corrección alguna.

Tabla 1: Estaciones seleccionadas, datos ausentes y anómalos. 1) Datos ausentes; 2) Periodos continuados sin observación; 3) Datos anómalos eliminados; 4) Datos anómalos no eliminados.

Observatorio actual	Fechas de inicio y final	Composición	1)	2)	3)	4)
Alsasua	10/1913-12/2000	Alsasua 9269 (10/1913-12/2000)	28			1
Borja Ayuntamiento	8/1911-12/2000	Veruela 9308 (8/1911-5/1930) + Borja 9311 (6/1930-8/1944) + Ambel 9309 (7/1945-12/1964) + Borja 9311 (1/1965-12/1983) + Borja Ayuntamiento 9311c (1/1984-12/2000)	39	12/1936-10/1938 8/1944-7/1945	1	2
Calatayud Aguas	8/1926-12/2000	Terrer 9371 (8/1926-12/1975) + Calatayud Aguas 9394u (1/1976-12/2000)	11			1
Candasnos	3/1913-12/2000	Fraga 9924e (3/1913-10/1938) + Candasnos 9578 (1/1940-12/2000)	24	10/1938-1/1940	1	6
Canfranc	1/1910-12/2000	Canfranc Los Arañones 9198 (1/1910-12/2000)	14		1	
Caparroso	12/1919-12/2000	Arguedas 9294 (12/1919-11/1930) + Caparroso 9255 (12/1930-12/2000)	30		1	3
Castellote	1/1927-11/2000	Santolea 9559 (1/1927-3/1990) + Castellote 9561i (4/1990-11/2000)	35			
Cervera	10/1914-12/2000	Tárrega 9720 (10/1914-12/1978) + Cervera 9717 (1/1979-12/2000)	46	11/1936-9/1940	2	6
Daroca	1/1909-12/2000	Daroca 9390 (1/1909-12/2000)	14			
Eriste	1/1904-12/2000	Benasque 9838 (1/1904-12/1976) + Eriste 9840 (1/1977-12/2000)	43	3/1938-2/1940	3	3
Gerri de la Sal	1/1915-12/2000	Capdella 9689 (1/1915-8/1991) + Gerri de la Sal 9686 (9/1991-12/2000)	4		2	1
Graus Residencia	2/1914-12/2000	La Puebla de Castro Presa 9856 (2/1914-3/1940) + Graus Ventas de Santa Lucía 9849 (4/1940-3/1989) + Graus Residencia 9850a (4/1989-12/2000)	17			3
Lérida 1	2/1913-12/2000	Lérida Observatorio 9771 (2/1913-2/1983) + Lérida I 9771c (3/1983-11/1991) + Lérida Observatorio 2 9771b (12/1991-2/1996) + Lérida I 9771c (5/1996-12/2000)	43	1/1938-1/1939 1/1939-1/1940	2	7
Logroño Agoncillo	1/1911-12/2000	Logroño Instituto 9148a (1/1911-12/1933) + Logroño Agrometeorológica 9148a (1/1934-12/1961) + Logroño Agoncillo 9170 (1/1962-12/2000)	4			1
Longares 2	10/1917-12/2000	Fuendetodos 9504 (10/1917-4/1936) + Longares 9426 (5/1936-1/1986) + Longares 2 9426a (2/1986-12/2000)	11		2	3
Monflorite	1/1874-12/2000	Huesca Instituto 9901f (1/1874-12/1948) + Monflorite 9898 (1/1949-12/2000)	23		5	4
Oña	2/1882-12/2000	Oña 9037 (2/1882-12/1931) + Bóveda 9062 (1/1932-4/1935) + Oña 9037 (7/1940-12/1988) + Barcina 9036v (1/1989-12/1992) + Oña 9037 (1/1993-12/2000)	83	4/1935-7/1940 9/1991-10/1992		3
Pamplona Observatorio	4/1880-12/2000	Pamplona Instituto 9262a (4/1880-8/1953) + Pamplona Observatorio 9262 (9/1953-12/2000)	10		14	1
Pons	1/1913-12/2000	Pons 9649 (1/1913-12/1941) + Tora 9647 (1/1942-12/1975) + Pons 9649 (1/1976-12/2000)	25	5/1938-4/1939 7/1939-11/1939	2	2
Pradoluengo	1/1912-12/2000	Belorado 9107 (1/1912-12/1934) + Haro 9121 (1/1935-12/1961) + Pradoluengo 9105 (1/1962-12/2000)	42	12/1935-1/1937	2	2
Pueyo de Jaca	11/1930-12/2000	Panticosa Balneario 9451 (11/1930-12/1974) + Pueyo de Jaca 9452 (1/1975-12/2000)	9			
San Esteban de Litera	2/1912-12/2000	Almunia de San Juan 9868 (2/1912-1/1951) + San Esteban de Litera 9913 (2/1951-12/2000)	20		2	5
Seo de Urgell	3/1911-10/2000	Seo de Urgell 9619 (3/1911-12/1927) + Adrall 9621 (1/1928-12/1964) + Seo de Urgell 9619 (1/1965-12/1992) + Seo de Urgell 9619b (1/1993-10/2000)	57	3/1944-11/1944 6/1999-1/2000 1/2000-4/2000 4/2000-9/2000	4	1
Tivissa	10/1911-12/2000	Tivissa 9971 (10/1911-12/2000)	2		3	7
Tortosa	1/1880-12/2000	Tortosa 9981a (1/1880-12/2000)	6		4	4
Villasuso	7/1911-12/2000	Reinosa 9001 (7/1911-12/1973) + Villasuso 9008 (1/1974-12/2000)	12		2	1
Vitoria Foronda	1/1919-12/2000	Vitoria Instituto 9087a (1/1919-2/1943) + Vitoria Aeropuerto 9087 (3/1943-2/1980) + Vitoria Aeropuerto de Foronda 9091o (3/1980-12/2000)	10		2	1
Yesa	5/1915-12/2000	Sangüesa 9240 (5/1915-5/1936) + Yesa 9223 (3/1940-12/2000)	52	5/1936-3/1940	3	1
Zaragoza Aeropuerto	1/1880-12/2000	Zaragoza Instituto 9434v (1/1880-6/1892) + Zaragoza Facultad de Ciencias 9443d (7/1892-12/1940) + Zaragoza Aeropuerto 9434 (1/1941-12/2000)	77	12/1880-1/1882	3	6

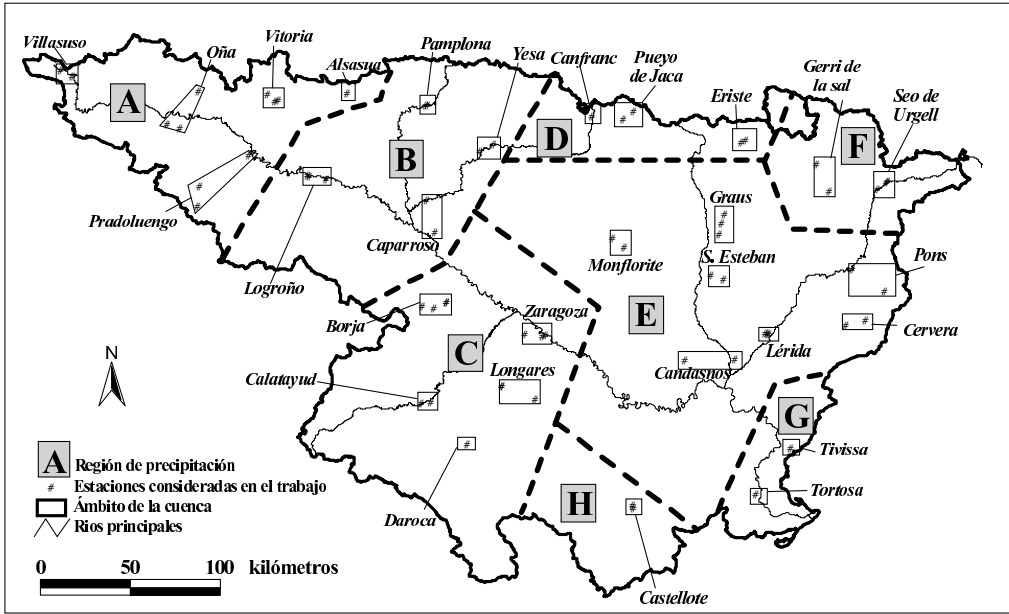


Figura 1: Regiones con evolución homogénea de la precipitación en la cuenca del Ebro

Ninguna información acerca de la historia de las estaciones (metadata), salvo la relativa a la composición de las series para este trabajo, se ha tenido en cuenta a la hora de corregir las inhomogeneidades detectadas.

## 4. REGIONALIZACIÓN

### 4.1. Organización espacial

Las medidas de proximidad utilizadas en el análisis cluster han sido el coeficiente de correlación lineal y una distancia denominada Manhattan que corresponde a la distancia L1 entre dos vectores (las series de lluvia anual estandarizada en este caso).

Los criterios de agrupación que han generado los resultados más consistentes han sido: la distancia media entre grupos, la distancia máxima entre grupos y la distancia media intra-grupos, un criterio similar al primero que tiene en cuenta, además, la distancia entre los elementos dentro de cada conglomerado.

Los resultados de todos los análisis de conglomerados considerados indican la existencia en la cuenca del Ebro de tres áreas diferenciadas: (a) una franja pirenaica, (b) el valle central y oriental y (c) la región noroccidental. Dentro de ellas se distinguen diferentes subzonas (figura 1):

- El sector occidental de la cuenca se ha dividido en dos regiones: A, la más occidental, y B. En esta última, el observatorio de Yesa no se considera en el análisis de tendencia posterior porque muestra en el periodo final un comportamiento diferente al de los otros observatorios.
- En la margen derecha, asociada a la influencia del Sistema Ibérico, definimos la región C.
- La franja pirenaica se divide en dos regiones, D y F, definidas por los observatorios aragoneses y catalanes respectivamente.
- En la margen izquierda se define la región E que ocupa la transición del Pirineo a la depresión del Ebro. En esta región, el observatorio de Pons, dado su comportamiento diferente en el periodo final, no participa en la definición de la serie regional.
- En el área más oriental y meridional se definen las regiones G, con los observatorios de Tivissa y Tortosa, y H, con el observatorio de Castellote, único representante de una región Ibérica oriental.

#### 4.2. Construcción de las series regionales

Una vez identificadas en la cuenca del Ebro áreas geográficas cuyos patrones temporales de lluvia son esencialmente comunes, el análisis de la evolución observada en la precipitación a partir de series regionales resulta más económico en cuanto al esfuerzo y más fiable ya que, por un lado, será menos sensible a posibles inhomogeneidades no detectadas en alguna serie individual y, por otro, porque en áreas con una señal de lluvia homogénea, la serie regional, con menor variabilidad en los datos, realza la señal de lluvia sin alterar el patrón de tendencia existente.

El riesgo de un análisis de tendencias basado en series regionales estriba en:

- (i) Que la serie resumen sea una señal desfigurada, resultado de la composición de perfiles distintos, lo que se ha evitado con la regionalización y eliminando los observatorios con un comportamiento anómalo respecto de su entorno.
- (ii) Que la serie regional no esté bien definida, por estar demasiado influida por alguna de las series individuales participantes en ella.

La construcción de la serie regional se ha hecho asignando el mismo peso a las series que participan en ella, lo que parece correcto dada la semejanza de las señales individuales y puesto que nos resulta complejo calcular una distribución que asigne a cada observatorio un peso proporcional a su representatividad en la región. Por otra parte, las series que se promedian no son las observadas ya que el patrón regional podría quedar dominado por el de las series con mayor pluviometría o con mayor variabilidad.

Tras ensayar diversas alternativas: (a) promediar anomalías de precipitación, (cocientes entre el dato y un valor medio), (b) promediar anomalías (diferencias a la media) estandarizadas y (c) promediar anomalías (diferencias a un valor medio) de los logaritmos de la precipitación anual, se decidió utilizar esta última opción tras comprobar que la variabilidad de las series de logaritmos era, dentro de cada región, homogénea.

## 5. ANÁLISIS DE TENDENCIAS

### 5.1. Análisis descriptivo de las tendencias en las series regionales

A partir de las series regionales y mediante suavizados *lowess* con un parámetro de ventana 0.25 en las series A y C, 0.35 en las G y H y de 0.30 en el resto, se obtienen las curvas suavizadas de la figura 2, que muestran la evolución de la lluvia en cada región.

Analizando estas series suavizadas se han identificado las fases crecientes y decrecientes, de un carácter aproximadamente lineal, que ha experimentado la lluvia. Un resumen numérico de la evolución por regiones aparece en la Tabla 2. En ella se indican los intervalos de las fases crecientes o decrecientes y el coeficiente  $\beta^*$ , que expresa la variación media anual de la respuesta (anomalías de logaritmos), que se ha estimado mediante regresión lineal frente al tiempo de los valores suavizados correspondientes a cada fase. Calculando  $10^{\beta^*}$  se obtiene el factor (tasa) de cambio anual de la lluvia en ese periodo, mayor o menor que 1 según la fase sea creciente o decreciente. En la última columna, mediante  $10^{\beta^*L}$ , siendo  $L$  la longitud de la fase, se obtiene el cambio, en tanto por uno, experimentado por el nivel medio de lluvia entre el inicio y fin de cada periodo.

Como conclusiones más destacables cabe señalar:

- a) Se diferencian dos patrones de evolución, uno con tres ciclos, que se observa en el noroeste y asociado al sistema Ibérico, y otro con dos, en el Pirineo, Somontano y la región oriental.
- b) La región C muestra desde finales de los años 30 un perfil descendente continuado. En la región F, los valles pirenaicos más orientales, la lluvia está disminuyendo desde el comienzo de los años 60. La tendencia creciente que se observa en los 90 en la región D, Pirineo occidental, se corresponde en F con una pendiente negativa menos pronunciada.
- c) En todas las regiones de la cuenca la fase descendente posterior al máximo localizado en los años 60 ó 70, según la región, ha atenuado su descenso o se ha convertido en una fase creciente a partir de algún momento a finales de los 80.

### 5.2. Análisis de la significación estadística en los dos últimos periodos de tendencia monótona

El análisis de ciclos y tendencias en el intervalo 1916-2000 se ha completado con un estudio de la significación estadística de las tendencias en la etapa final. Los objetivos son establecer:

- (i) si en la última fase monótona se están observando cambios significativos en la lluvia, lo que permitirá valorar su evolución a corto plazo, y
- (ii) estudiar la significación de la tendencia decreciente que, de manera generalizada, se observó en la cuenca entre mediados de los 60 (los 70 en las regiones A, B, C y H) y finales de los 80.

Dado que las series regionales no son series de lluvia anual sino promedios de una transformación de las series registradas, su relación señal-ruido se ha modificado con respecto a la que existe en las series originales; en la serie regional hay un patrón equivalente al de las series observadas en la región pero menor variabilidad. Por ello, la detección de una tendencia decreciente, estadísticamente significativa en alguna fase del intervalo 1970-2000, no implica que estemos asistiendo a

una disminución estadísticamente significativa de la cantidad de lluvia en la zona considerada. El análisis regional nos permite identificar las regiones e intervalos donde la significación estadística de los cambios es verosímil; el contraste final (que no se presenta) se ha hecho sobre series de lluvia registrada.

El intervalo temporal analizado en cada caso es el definido por el suavizado, ampliado en un cierto número de años que se añaden al inicio y fin del periodo, sólo al inicio, obviamente, si estamos analizando el tramo final (ver Tabla 3). El número de datos que se añade en cada extremo se obtiene redondeando el producto de la longitud del intervalo en la señal suavizada por el parámetro de ventana aplicado para obtener dicho suavizado.

El motivo de esta ampliación, que supone añadir de uno a cuatro datos en cada extremo según los casos, se debe a que los valores suavizados, a partir de los que se definieron las fases crecientes o decrecientes, están influidos por los datos adyacentes; de modo que una fase comienza (termina) en la serie regional, antes (después) de lo que lo hace en la correspondiente serie suavizada. Como estamos tratando con muestras pequeñas, se ha realizado este pequeño ajuste con el fin de utilizar en la estimación todos los datos en los que se manifieste el carácter del periodo.

En el ajuste de los modelos de regresión se ha controlado la influencia de las observaciones (distancia de Cook, DFITS) y se ha realizado un test estadístico para la detección de datos anómalos (WEISBERG, 1985). Las observaciones consideradas muy influyentes o atípicas con un nivel de significación del 5 % se han eliminado de la muestra de estimación.

Al tratarse de datos temporalmente ordenados se ha contrastado la presencia de autocorrelación en los residuos utilizando el test de Durbin-Watson. Cuando la hipótesis de incorrelación se rechaza, se ha estimado el modelo siguiendo el procedimiento de Cochran-Orcutt con el fin de garantizar una estimación óptima y evitar la influencia de la autocorrelación en el análisis de significación.

La Tabla 3 presenta los resultados de este análisis de tendencias. Se han señalado en **negrita** los descensos o incrementos estadísticamente significativos al 5 % y en  *cursiva* aquéllos que lo son al 10 %. En la columna de incidencias se indican los casos en que se utilizó el procedimiento de Cochran-Orcutt, así como los datos eliminados.

Salvo en las regiones A, B y H, la pendiente de la fase decreciente de los años 60-80 ó 70-80 resulta estadísticamente significativa; su tasa varía entre un 0.8 % anual en la región E y un 3.4 % en la C. Las tasas de decrecimiento en las regiones A y B (1.1 %), y en la H (2.8 %), son de tamaño semejante pero sus p-valores asociados rondan el valor 0.15.

Cinco regiones terminan su trayectoria con una fase creciente; de ellas sólo la correspondiente a la región G es estadísticamente significativa, su tasa de crecimiento es de un 2.3 % anual. En el Pirineo oscense y en la región B la tasa de crecimiento al final es de un 1.5 % aproximadamente y los p-valores asociados 0.15 y 0.23, respectivamente. En cuanto a las regiones con fase final decreciente, la región C, con un p-valor de 0.27, es la que tiene una tasa más pronunciada, -1.4 %.

En todos los casos, salvo en la fase creciente final en la región G, el intervalo de confianza para el parámetro  $\beta$  que expresa la tendencia, incluye la estimación obtenida directamente sobre los datos suavizados.



Tabla 2: Señal de lluvia por regiones. Pendientes en los periodos de tendencia monótona de los suavizados.

	Periodo	$\hat{\beta}^*$	Cambio anual	Cambio periodo		Periodo	$\hat{\beta}^*$	Cambio anual	Cambio periodo
REGIÓN A	1916-1934	6.47 E-03	1.0150	1.3076	REGIÓN E	1916-1928	-1.75 E-03	0.9960	0.9528
	1934-1948	-7.84 E-03	0.9821	0.7767		1928-1938	4.68 E-03	1.0108	1.1138
	1948-1958	7.80 E-03	1.0181	1.1967		1938-1951	-5.83 E-03	0.9867	0.8399
	1958-1967	-2.01 E-03	0.9954	0.9592		1951-1967	5.33 E-03	1.0123	1.2170
	1967-1977	5.21 E-03	1.0120	1.1275		1967-1986	-3.84 E-03	0.9912	0.8453
	1977-1990	-4.72 E-03	0.9892	0.8682		1986-2000	4.69 E-03	1.0109	1.1632
REGIÓN B	1916-1934	7.95 E-03	1.0185	1.3903	REGIÓN F	1916-1926	-2.08 E-04	0.9995	0.9952
	1934-1950	-4.80 E-03	0.9890	0.8379		1927-1935	3.91 E-03	1.0090	1.0747
	1950-1957	3.23 E-03	1.0075	1.0534		1935-1948	-4.90 E-03	0.9888	0.8636
	1960-1975	1.52 E-03	1.0035	1.0539		1948-1962	6.35 E-03	1.0147	1.2272
	1975-1988	-3.13 E-03	0.9928	0.9106		1962-1979	-5.45 E-03	0.9875	0.8078
	1988-2000	3.86 E-03	1.0089	1.1126	1984-2000	-1.12 E-03	0.9974	0.9596	
REGIÓN C	1916-1926	-1.58 E-03	0.9964	0.9643	REGIÓN G	1916-1930	-6.17 E-04	0.9986	0.9803
	1926-1938	5.83 E-03	1.0135	1.1748		1930-1941	4.94 E-03	1.0114	1.1333
	1938-1949	-4.02 E-03	0.9908	0.9032		1941-1963	1.40 E-03	1.0032	1.0735
	1949-1956	2.45 E-03	1.0057	1.0403		1963-1983	-4.51 E-03	0.9897	0.8125
	1956-1964	-2.96 E-03	0.9932	0.9469	1983-2000	4.29 E-03	1.0099	1.1829	
	1964-1973	3.86 E-03	1.0089	1.0833	REGIÓN H	1928-1939	-1.49 E-03	0.9966	0.9630
1973-1982	-7.02 E-03	0.9840	0.8646	1939-1945		-2.82 E-03	0.9935	0.9618	
1982-2000	-2.34 E-03	0.9946	0.9273	1945-1953		1.92 E-03	1.0044	1.0360	
REGIÓN D	1916-1926	9.29 E-04	1.0021	1.0216		1953-1965	-6.92 E-04	0.9984	0.9811
	1926-1934	2.25 E-03	1.0051	1.0423		1965-1974	2.27 E-03	1.0052	1.0482
	1934-1950	-3.99 E-03	0.9909	0.8633	1974-1984	-1.74 E-03	0.9960	0.9607	
	1950-1965	6.37 E-03	1.0148	1.2461	1987-2000	2.66 E-03	1.0061	1.0828	
	1965-1988	-4.27 E-03	0.9902	0.7976					
1988-2000	3.97 E-03	1.0092	1.1159						

## 6. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha caracterizado la evolución de la precipitación en la cuenca del Ebro durante el periodo 1916-2000, tanto en el aspecto temporal, identificando las fases y ciclos observados en ese periodo, como desde el punto de vista espacial, diferenciando áreas geográficas con un patrón temporal particular y homogéneo. El análisis ha identificado los periodos secos y húmedos en cada región y cuantificado las tasas de incremento/decremento de la lluvia en cada fase. Se ha realizado un análisis de la significación estadística de las tendencias en los últimos 30 años, localizando las regiones donde las tasas resultan significativas.

Como resultado de este estudio se desprende que, si se analiza un largo intervalo temporal, no hay evidencia para establecer la existencia de una tendencia decreciente sostenida de la lluvia de la cuenca del Ebro. Sólo la serie de Borja, en la región C, es compatible con la existencia

de una tendencia monótona decreciente a lo largo de este periodo. Esta conclusión acerca de la no existencia de un cambio sistemático en la precipitación anual coincide con la obtenida por ALMARZA *et al.* (1996), que rechazan la existencia de una tendencia monótona en la series de Zaragoza, Tortosa, Pamplona, Logroño y Huesca, y también con la del estudio del PHN 2001, vol. III pp. 122 a 129.

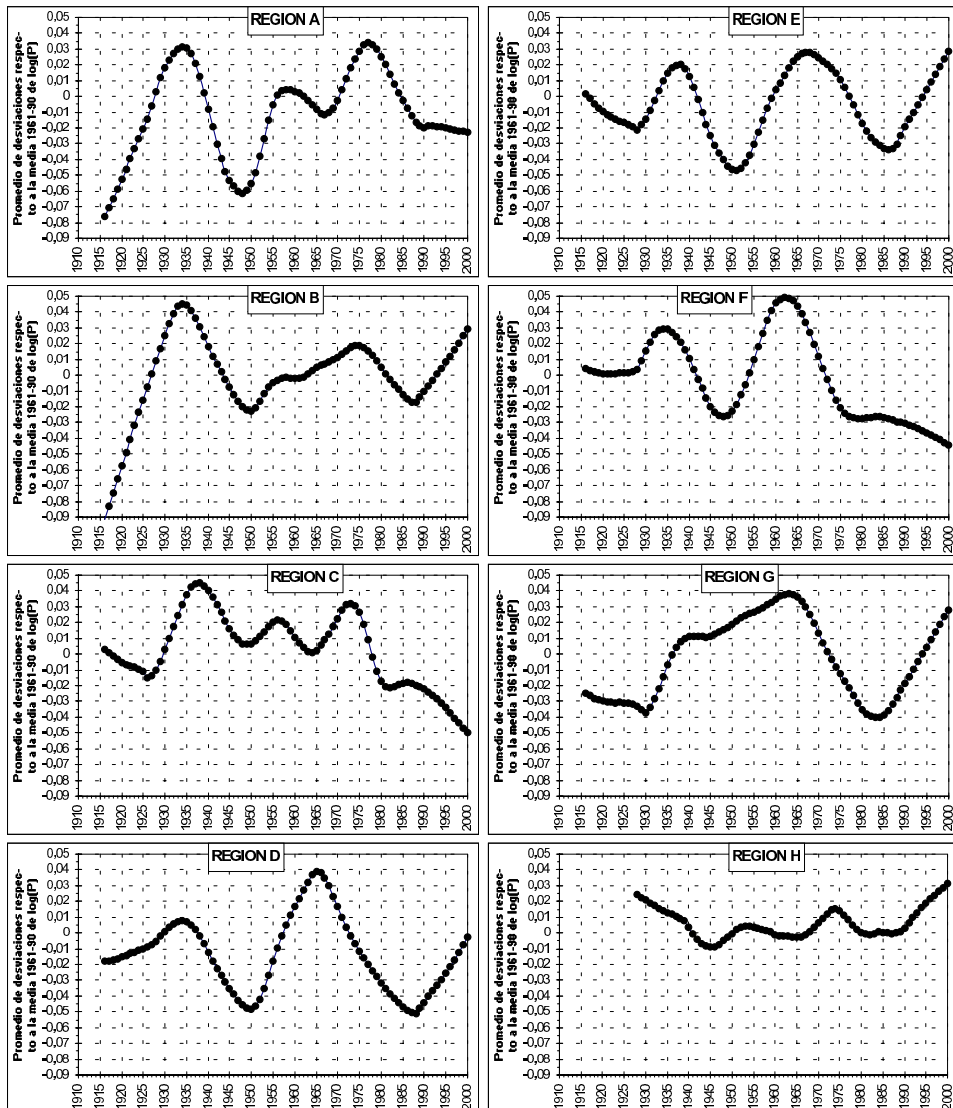


Figura 2: Evolución temporal de los suavizados regionales.

Tabla 3: Análisis de significación de las tendencias en las dos últimas fases monótonas en cada serie regional.

Región	Obtenido en el suavizado		Análisis de las últimas tendencias en las series regionales							
	Periodo utilizado	$\hat{\beta}^*$	Periodo utilizado	$\hat{\beta}$	Error estándar	Intervalo de confianza al 95 %	p-valor	Incidencia	Cambio anual	Cambio periodo
A	1977-1990	-4.72 E-03	1975-1992	-4.90 E-03	0.00325	[-0.0118, 0.0020]	0.151	–	0.9888	0.8255
	1990-2000	-4.05 E-04	1989-2000	-1.35 E-03	0.00562	[-0.0140, 0.0114]	0.816	1989	0.9969	0.9664
B	1975-1988	-3.13 E-03	1973-1990	-5.30 E-03	0.00360	[-0.0127, -0.00211]	0.161	–	0.9879	0.8126
	1988-2000	3.86 E-03	1986-2000	6.43 E-03	0.00507	[-0.0052, 0.0181]	0.227	–	1.0149	1.2303
C <sup>1</sup>	1973-1982	-7.02 E-03	1972-1983	<b>-1.48 E-02</b>	0.00429	<b>[-0.0245, -0.0051]</b>	<b>0.0085</b>	*	<b>0.9665</b>	0.6874
	1986-2000	-2.34 E-03	1984-2000	-6.31 E-03	0.00546	[-0.0180, 0.0054]	0.267	1985	0.9856	0.7926
D	1965-1988	-4.27 E-03	1961-1992	<b>-4.93 E-03</b>	0.00103	<b>[-0.0070, -0.0028]</b>	<b>&lt;0.001</b>	*	<b>0.9887</b>	0.7033
	1988-2000	3.97 E-03	1986-2000	5.90 E-03	0.00384	[-0.0025, 0.0143]	0.149	–	1.0137	1.2095
E	1967-1986	-3.84 E-03	1964-1989	-3.43 E-03	0.00182	[-0.0072, 0.0003]	0.072	*	0.9921	0.8208
	1986-2000	4.69 E-03	1984-2000	3.53 E-03	0.00409	[-0.0052, 0.0123]	0.404	1985, 95	1.0081	1.1389
F	1962-1979	-5.45 E-03	1959-1982	<b>-8.78 E-03</b>	0.0028	<b>[-0.0146, -0.0029]</b>	<b>0.006</b>	1982	<b>0.9800</b>	0.6281
	1984-2000	-1.12 E-03	1981-2000	-1.72 E-03	0.00247	[-0.0069, 0.0035]	0.497	*	0.9960	0.9275
G	1963-1983	-4.51 E-03	1959-1987	<b>-7.22 E-03</b>	0.00335	<b>[-0.0144, -0.00002]</b>	<b>0.040</b>	–	<b>0.9835</b>	0.6278
	1983-2000	4.29 E-03	1980-2000	<b>9.75 E-03</b>	0.00208	<b>[0.0053, 0.0142]</b>	<b>&lt;0.001</b>	1982, 95, 98	<b>1.0227</b>	1.5667
H	1974-1984	-1.74 E-03	1972-1986	-1.26 E-02	0.00834	[-0.0308, 0.0056]	0.155	–	0.9724	0.6661
	1987-2000	2.66 E-03	1984-2000	3.29 E-03	0.00580	[-0.0119, 0.0185]	0.578	–	1.0076	1.1289

<sup>1</sup> En la región C se estudiaron conjuntamente los dos últimos periodos por medio de regresiones polinómicas de orden 2 y 3; en ninguno de los casos se obtuvieron tendencias significativas.

\* Para el análisis de la posible tendencia en estos periodos se utilizó Cochrane-Orcutt.

La lluvia, dentro de un régimen de estabilidad, sufre oscilaciones en las que puede producirse un cambio significativo del nivel medio de precipitación. En la serie de lluvia areal de la cuenca que el PHN dibuja en la página 126, pese a la “no existencia de tendencia significativa” el decrecimiento entre 1970 y 1985 es apreciable. En nuestro trabajo encontramos un cambio estadísticamente significativo en el nivel de lluvia en ese periodo en buena parte de la cuenca, que sin duda ha repercutido en el descenso de las aportaciones del Ebro entre los años 60 y finales de los 80, ver PHN 2001, vol. III, figura 73.

Al comparar nuestros resultados con los de otros investigadores vemos que GARCÍA RUIZ *et al.* (2001), que no ofrecen estimaciones numéricas de su análisis de la precipitación, presentan en la página 69 una gráfica, basada en más de 20 observatorios en el Pirineo aragonés, que muestra gran similitud con nuestra señal suavizada en la región D. En cuanto al trabajo de CREUS (1996), que identifica en la lluvia una fase creciente 1911-40 y una decreciente 1970-90, es posible comparar sus estimaciones del factor de decrecimiento anual en el intervalo 1970-90 en Logroño (0.986), Zaragoza (0.979), Huesca (0.977) y Lérida (0.977) con las que nosotros obtenemos en las regiones correspondientes en el periodo que se indica: B 1973-90 (0.988), C 1972-83 (0.967), C 1984-2000 (0.986) y E 1964-89 (0.992).

Nuestro trabajo muestra que durante la última fase, los años 90, la tendencia decreciente se ha detenido y estamos asistiendo a una recuperación de los niveles medios de lluvia, observándose fases crecientes en algunas zonas (Pirineo Oscense, Somontano, Navarra media, La Rioja), que también detectan GARCÍA RUIZ *et al.* (2001) en el Pirineo aragonés, o una disminución en la tasa de decrecimiento en las regiones donde no se observa un cambio de signo (Pirineo de Lérida,

cabecera del Ebro, región Ibérica central). Esta tendencia positiva no resulta estadísticamente significativa, salvo en la región G, porque el intervalo es demasiado breve para la relación señal-ruido existente en los datos.

Queremos señalar por último que la diferente metodología aplicada en el análisis de homogeneidad y la mayor densidad de estaciones estudiadas ha permitido identificar algunas inhomogeneidades en las series de Logroño, Huesca y Pamplona, asociadas a los cambios de emplazamiento, que no se evidenciaron en el estudio de ALMARZA *et al.* (1996). Al igual que en ese estudio, Zaragoza y Tortosa se comportan como series homogéneas.

## 7. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por la Oficina de Planificación Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro (asistencia técnica 2001-PH-14-I).

## 8. REFERENCIAS

- ABAURREA, J., ASÍN, J., ERDOZAIN, O. y FERNÁNDEZ, E. (2001): Climate variability analysis of temperature series in the medium Ebro river basin. En BRUNET, M. y LÓPEZ, D. (Eds.): *Detecting and modelling regional climate change*, pp. 108-118.
- ALMARZA, C., LÓPEZ, J.A. y FLORES, C. (1996): *Homogeneidad y variabilidad de los registros históricos de precipitación de España*. Madrid. Dirección General del Instituto Nacional de Meteorología, Ministerio de Medio Ambiente.
- BRUNET, M. y LÓPEZ, D. (Eds.) (2001): *Detecting and modelling regional climate change*. Springer-Verlag.
- CLEVELAND, W.S. (1979): Robust locally weighted regression and smoothing scatterplots. *Journal of the American Statistical Association*, 74, pp. 829-836.
- CREUS, J. (1996): Variaciones en la disponibilidad hídrica mensual en el valle del Ebro. En MARZOL, M.V., DORTA, P. y VALLADARES, P. (Eds.): *Clima y agua: la gestión de un recurso*, pp. 79-86, Tabapress, Madrid.
- GARCÍA RUIZ, J.M. *et al.* (2001): *Los recursos hídricos superficiales del Pirineo aragonés y su evolución reciente*. Geofoma ediciones, Logroño.
- GARCÍA VERA, M.A., ABAURREA, J., ASÍN, J. y CENTELLES, A. (2002): Evolución de las precipitaciones en la cuenca del Ebro: caracterización espacial y análisis de tendencias. En CUADRAT, J.M., VICENTE, S.M. y SAZ, M.A. (Eds.): *La información climática como herramienta de gestión ambiental*, 99-108, Universidad de Zaragoza.
- GARRIDO, J., GARCÍA, J.A. y MATEOS, V.L. (1996): Homogeneidad y variabilidad natural de series largas de precipitación. *Anales de Física*, 92, pp. 19-31.
- GONZÁLEZ ROUCO, J.F., JIMÉNEZ, J.L., QUESADA, V. y VALERO, F. (2001): Quality control and homogeneity of precipitation data in the southwest of Europe. *J. of Climate*, 14, pp. 964-978.
- HOUGHTON, J.T. *et al.* (Eds.) (2001): *Climate Change 2001: The scientific basis*. Cambridge University Press.
- MOBERG, A. y ALEXANDERSSON, H. (1997): Homogenization of Swedish temperature data. Part II: Homogenized gridded air temperature compared with a subset of global gridded air temperature since 1861. *Int. J. Climatol.*, 17, pp. 35-54.
- PÉREZ CUEVA, A.J., LÓPEZ BAEZA, E. y TAMAYO, J. (Eds.) (2001): *El tiempo del clima*. Publicaciones de la A.E.C., serie A, nº 2.
- PLAN HIDROLÓGICO NACIONAL (2001): La hipótesis de disminución de las lluvias. En *Análisis de los sistemas hidráulicos: cuenca del Ebro*, volumen III, pp. 122-129. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- RASO, J.M. y MARTÍN-VIDE, J. (Eds.) (1999): *La climatología española en los albores del siglo XXI*. Publicaciones de la A.E.C., serie A, nº 1.
- WEISBERG, S. (1985): *Applied linear regression*. 2ª ed. Wiley.