

RECONSTRUCCIÓN DESDE 1864 DE LA SERIE DE PRECIPITACIÓN ÚTIL DE LAS CUENCAS DEL SURESTE Y LEVANTE

Andrés CHAZARRA BERNABÉ y Carlos ALMARZA MATA

Instituto Nacional de Meteorología

RESUMEN

Se reconstruyen las series de precipitación y temperatura areales de las cuencas del Sureste y Levante desde 1864 aplicando modelos de correlación múltiple paso a paso a los datos de observación, ajustados con los datos desde 1947 en el caso de la precipitación y desde 1990 en el de la temperatura. Se analiza la serie de precipitación útil y se concluye que el recurso hídrico generado en la zona no presenta tendencias significativas; sin embargo, es patente su gran variabilidad interanual, y el coeficiente de variación móvil en periodos consecutivos de treinta años presenta una tendencia al alza, lo que implicaría una mayor alternancia de periodos de alta y baja disponibilidad de agua dulce y, por tanto, un aumento de uno de los factores que condicionan el fenómeno de la desertificación y los problemas en la administración del agua.

Palabras clave: Variabilidad, precipitación útil, estado climático.

ABSTRACT

Both areal precipitation and temperature series, belonging to the Southwest and Levante basins, and beginning in 1864, are rebuilt. The observation data, collected by the main climatological stations, yield the material for the reconstruction by stepwise regression models. These models were fitted with data since 1947 for the precipitation series and with data since 1990 for the temperature series. An analysis of run-off series shows that the hydric resource generated in the study area has no significant trend. However, it is matter-of-fact the outstanding interannual variability. Furthermore, the thirty years moving average series shows a growing trend, which might determine a higher rate of changes between periods of shortage and surplus of available fresh water, responsible at last for the increase of one of the factors involved in the drought phenomenon and consequent problems of water management.

Key words: variability, run-off, climatic state.

1. INTRODUCCIÓN

La formulación que en 1905 planteó F. Brückner del modelo de ciclo hidrológico, la ecuación del balance hídrico, no se diferencia esencialmente de las actuales concepciones. De esta formulación se desprende que el agua dulce potencialmente utilizable por el hombre es la diferencia entre la precipitación y la evaporación real, diferencia que tiene un origen exclusivamente atmosférico. Este recurso natural se conoce como lluvia útil, o precipitación eficaz, y no es otra cosa que el agua disponible para escorrentía tanto superficial como subterránea. Al tener la precipitación útil

un origen atmosférico, ésta es consecuencia del propio clima de la región o de la zona geográfica donde se modeliza el ciclo hídrico, por lo que la variabilidad interanual e intra-anual del recurso hídrico es función de la variabilidad del propio clima.

Desde 1947 el Instituto Nacional de Meteorología viene publicando anualmente en el *Calendario Meteorológico* las precipitaciones medias mensuales y anuales de las grandes cuencas hidrográficas peninsulares, calculadas en función de los datos pluviométricos procedentes de la totalidad de los observatorios de la red climatológica, con lo que se dispone de una serie inicial de lluvias zonales bastante larga. En el caso de las cuencas del Sureste y Levante, la densidad de estaciones, tanto pluviométricas como termométricas, es alta, y supera los valores recomendados por la Organización Meteorológica Mundial (ALMARZA 1995).

Sin embargo, las series largas reconstruidas a partir de 1864 tanto de precipitación como de temperaturas medias, necesarias para la determinación de la lluvia eficaz como diferencia entre la precipitación y la evaporación real, así como el análisis de estas series, no se han abordado hasta ahora de forma general, aunque es bien cierto que en *El Libro Blanco del Agua* sí se trata la precipitación útil, pero solamente desde 1940.

El valor de la precipitación eficaz media en una gran cuenca tiene especial interés en el sector hidráulico pero, además, constituye un índice climático que permite seguir la evolución temporal de una combinación de dos elementos caracterizadores del clima, tal vez los dos más importantes, como son la precipitación y la temperatura.

2. METODOLOGÍA

El estudio de la variabilidad climática a partir de la lluvia útil como índice propuesto, requiere disponer de series lo más largas posibles, lo que hace necesario efectuar una reconstrucción de este índice hasta donde sea factible.

El dato de precipitación media anual de las cuencas del Sureste y de Levante, considerando el conjunto de ambas cuencas como una única región, está calculado desde 1947 y publicado por el Instituto Nacional de Meteorología, con lo que solamente ha sido necesario retrotraerse a partir de este año. Para efectuar la reconstrucción se ha empleado el método que se utiliza de forma habitual para la estimación de las precipitaciones medias mensual y anual de cada gran cuenca hidrográfica peninsular, en función de los datos de precipitación mensual de las estaciones climatológicas principales (ALMARZA *et al.*, 2000), y que consiste en estimar el dato con un modelo de correlación múltiple paso a paso, ajustando los parámetros del algoritmo *predictor* de las precipitaciones medias anuales de las cuencas objeto de estudio en función de las precipitaciones anuales de las estaciones climatológicas principales ubicadas en las cuencas. El algoritmo *predictor* tiene la siguiente forma:

$$P = 104,517 + 0,0395P_A + 0,0357P_M + 0,0257P_V$$

donde P , es la precipitación media anual de las cuencas del Sureste y Levante, y P_A , P_M y P_V son respectivamente las precipitaciones totales anuales de Albacete, Murcia y Valencia. El coeficiente de correlación múltiple obtenido fue de 0,789, significativo a un nivel de confianza del 95 %, con

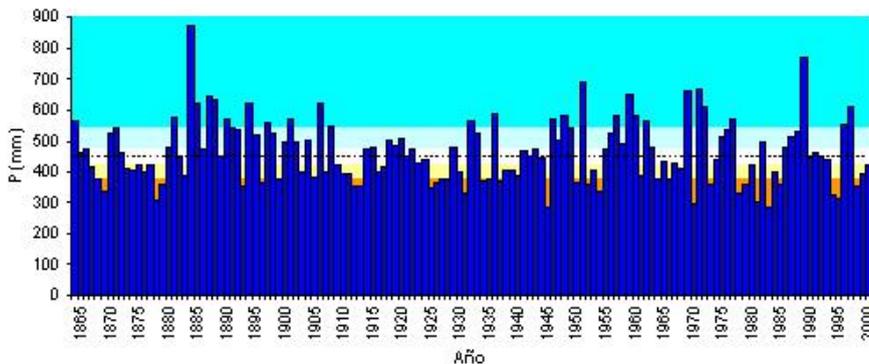


Figura 1: Precipitación media anual de las cuencas Levante y Sureste

lo que los resultados de la reconstrucción son suficientemente representativos. Aunque alguna de las series de observaciones de precipitación de estas estaciones se remontan a años anteriores a 1864, solamente se dispone de datos anuales de todas ellas a la vez a partir del referido año.

Para reconstruir la serie de temperatura media anual de las cuencas se ha considerado un método similar al empleado para la lluvia. En este caso, sin embargo, no se disponía de una serie inicial de temperatura anual media de la zona, por lo que fue necesario calcularla para todo el periodo 1864-2000. Para ello, se trazaron con un sistema de información geográfica los mapas de temperatura media anual para cada uno de los años del periodo 1990-2000, mediante la aplicación de un modelo de regresión múltiple de la temperatura con la altitud y la latitud con interpolación de los residuos o anomalías, siguiendo un método habitualmente empleado para incluir parámetros topográficos en la interpolación (CHAZARRA Y GUTIÉRREZ 2002).

Se utilizaron alrededor de 200 estaciones termométricas, obteniendo un ajuste muy satisfactorio, con una varianza explicada que oscilaba entre el 83 y el 91 % según los años.

A continuación, se calculó con el sistema de información geográfica la temperatura media de las cuencas de Levante y Sureste para cada uno de los años 1990-2000, y se aplicó un modelo de regresión múltiple paso a paso entre las temperaturas medias de la zona y los valores medios anuales registrados en las observatorios principales del área considerada (Castellón, Valencia, Alicante, Murcia, Albacete, Cuenca y Teruel). El modelo consideró como mejor estimación la obtenida a partir de una única estación, la de Murcia, por lo que el algoritmo predictor se reduce a una correlación lineal entre la temperatura media anual de las cuencas y la temperatura media anual de Murcia; pero, por las razones que luego se comentarán, se eligió la serie de Valencia, con la que se obtuvo la relación:

$$T = 0,8477 T_V - 1,1759$$

donde T es la temperatura media anual de las cuencas y T_V la temperatura media anual de Valencia.

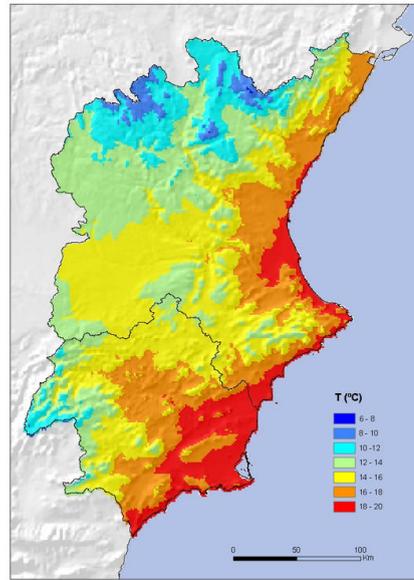
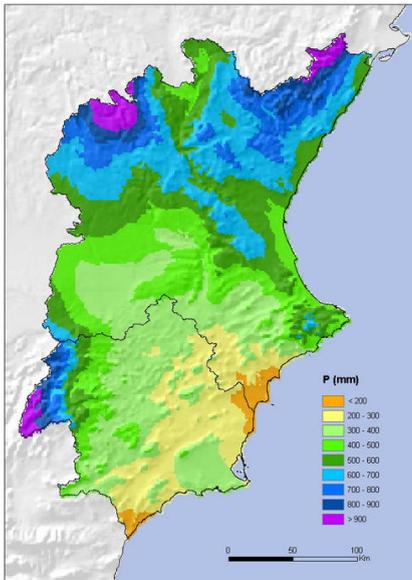


Figura 2: Precipitación media del año 2000

Figura 3: Temperatura media del año 2000

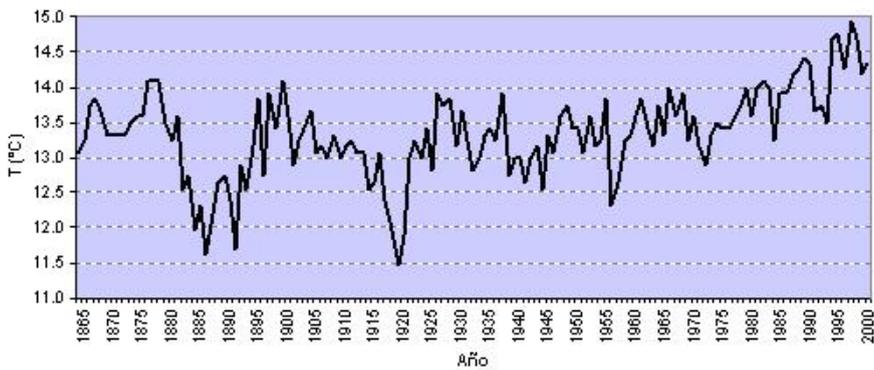


Figura 4: Temperatura media anual de las cuencas Levante y Sureste

El coeficiente de correlación obtenido fue de 0,948, valor significativo a un nivel de confianza del 95 %, por lo que el empleo de esta expresión para la reconstrucción de la serie de temperatura media anual desde de 1864 ofrece una confianza indiscutible.

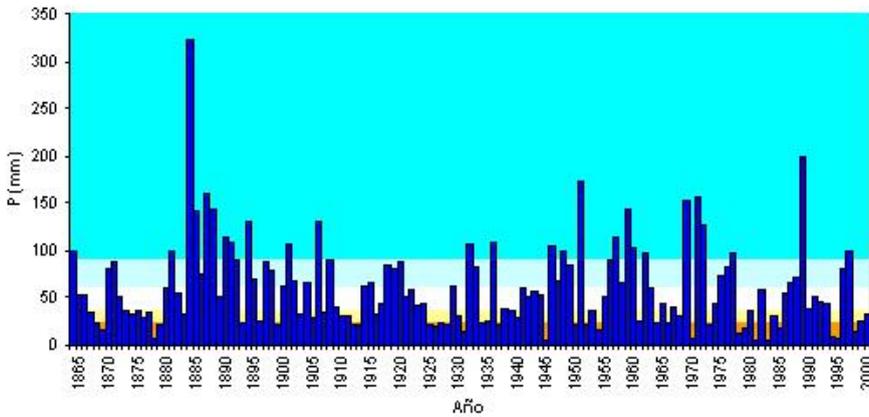


Figura 5: Precipitación útil de las cuencas Levante y Sureste

3. LA LLUVIA ÚTIL

En la introducción se ha comentado el concepto de lluvia útil como diferencia entre la precipitación y la evaporación real, y que no es otra cosa que una expresión simplificada de la ecuación general de balance hídrico, que se fundamenta en que durante el periodo temporal en el que se efectúan los cálculos no se produce una variación de las reservas hídricas de la cuenca y es aplicable a este caso al extenderlo a un intervalo de un año (hipótesis insostenible cuando el balance se efectúa para periodos de tiempo inferiores). Es necesario, en consecuencia, estimar los valores anuales de evaporación real en función de datos climatológicos, que son, por otra parte, los únicos disponibles. La metodología que se ha utilizado para la evaluación de la evaporación real ha sido la propuesta por Turc, que proporciona resultados muy aceptables para periodos de tiempo anuales y en zonas de clima templado. La expresión de Turc tiene la forma:

$$E = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{con,} \quad L = 300 + 25T + 0,05T^3$$

En esta expresión la evaporación E viene expresada en mm y la precipitación media anual P y la temperatura media anual T se deben expresar en mm y en °C, respectivamente.

Los datos de precipitación que se han utilizado han sido las series anuales homogeneizadas de Albacete, Murcia y Valencia publicadas por ALMARZA *et al.* (1996). Para el cálculo de la serie de temperatura media se utilizó la serie de Valencia formada con los datos del observatorio de la Universidad desde 1864 hasta 1937, y desde este año a la actualidad, con los procedentes del observatorio de Viveros.

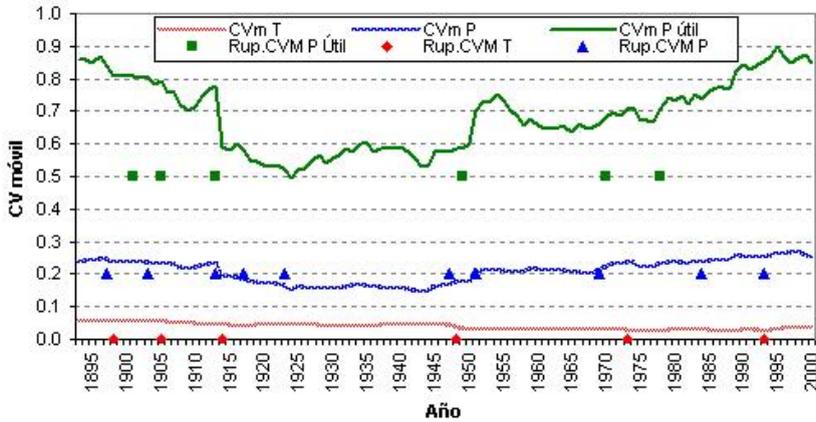


Figura 6: Medias móviles de 30 años de los coeficientes de variación de la temperatura, la precipitación y la lluvia útil y años de ruptura de las series según el test de Pettitt.

A pesar de que el coeficiente de correlación entre la temperatura media anual de las cuencas del Sureste y Levante y los datos del observatorio de Alcantarilla (Murcia) resultó ligeramente superior al obtenido con los datos de Valencia, se prefirió efectuar la reconstrucción con la serie de Valencia, puesto que la reconstrucción de la de Murcia no parecía climáticamente homogénea al tener necesariamente que incluir datos de observatorios tan distintos como los de Murcia Universidad y Alcantarilla.

4. ANÁLISIS DE LAS SERIES RECONSTRUIDAS

La serie reconstruida de precipitación media anual de las cuencas consta de 137 términos, y se extiende entre 1864 y 2000. El valor medio es de 462,5 mm, la mediana de 448,8 mm, y el coeficiente de variación es del 22 %. El mínimo absoluto, de 282 mm, se produjo en el año 1883, y el máximo, de 871,6 mm, corresponde al total anual medio del año 1884. La serie presenta cierta asimetría, su coeficiente de asimetría es positivo y toma el valor de 0,85 lo que implica que es más probable que se presenten valores de precipitación inferiores a la media. Esta serie en su conjunto no presenta tendencias significativas, el valor del estadístico de Mann-Kendall de $-0,94$ indica que la serie es aleatoria y no tiene tendencia significativa a un nivel de confianza del 95 %, sin embargo al ser el valor del estadístico negativo podría sospecharse que la serie en su conjunto aparece con una ligera tendencia negativa, que pudiera interpretarse como una ligera disminución de las precipitaciones. Por otra parte, el test de Pettit no da valores significativos, por lo que no se puede afirmar que existan cambios de tendencia que implicarían rupturas de la homogeneidad. Este resultado está perfectamente de acuerdo con los análisis de las series individuales de los observatorios que han permitido, mediante el modelo de regresión lineal múltiple paso a paso, efectuar la reconstrucción de la serie (ALMARZA et al. 1996).

Tabla 1: Resultados del Test de Pettitt

PRECIPITACIÓN		LLUVIA ÚTIL		TEMPERATURA	
Año	α	Año	α	Año	α
1969	4.42E-09	1913	3.75E-08	1948	4.17E-18
1913	1.84E-08	1949	1.68E-07	1914	1.30E-08
1947	3.58E-07	1984	1.32E-05	1905	2.06E-03
1984	1.27E-05	1970	2.25E-05	1973	3.54E-03
1923	1.36E-04	1901	9.11E-04	1898	1.57E-02
1903	9.11E-04	1992	2.53E-03	1993	0.0491
1993	8.90E-03	1978	1.60E-02		
1951	2.91E-02	1905	1.97E-02		
1917	3.31E-02				
1897	3.31E-02				

La serie reconstruida de temperatura media anual de las cuencas del Sureste y Levante, por el contrario, presenta una clara tendencia creciente: el estadístico de Mann-Kendall toma el valor de 5,3, y las series directa y retrógrada se cruzan en 1981 con un valor común de 2,1. Los cambios de tendencia detectados por el método de Pettitt se producen con niveles de significación inferiores a 0,05 en 1881, 1893, 1959, 1978, y 1993, lo que supone que las series parciales comprendidas entre estos años son aleatorias, y sus funciones de distribución asociadas son diferentes o, lo que es lo mismo, estas series parciales componen estados climáticos diferentes que se distribuyen a su vez al azar. El comportamiento del clima desde el punto de vista térmico presenta un carácter caótico, y la inestabilidad climática es patente (SNEYERS 1997). El cambio de tendencia de 1881, en el que se observa una disminución de la temperatura hasta 1893 en que cambia el sentido de la tendencia, es probablemente consecuencia de la erupción del Krakatoa en 1883 (W.M.O 1998). Desde 1893 hasta 1959, aunque hay periodos de subidas y bajadas térmicas, no son significativos, y es a partir de 1959 cuando de forma general se detecta una tendencia positiva de la temperatura.

El comportamiento de la serie de lluvia útil, reconstruida con la metodología de Turc a partir de 1864, es muy similar al de la precipitación, no se detectan rupturas de la homogeneidad y en consecuencia no presenta cambios de tendencias significativos. La tendencia positiva detectada en la temperatura a partir de 1959 no se refleja en la variabilidad de la lluvia eficaz.

Por otra parte, se ha utilizado el coeficiente de variación para evaluar la variabilidad interanual de estas tres variables tratadas. Se observa que el valor de este parámetro para periodos consecutivos de treinta años no es estable. En el caso de la precipitación, oscila entre el 15 % en los periodos de treinta años que finalizan en 1924, 1942, 1943 y 1944, y el 27 %, en los periodos que finalizan en 1995, 1997 y 1998. Para la lluvia eficaz, el coeficiente varía entre el 49 % en 1924 y el 90 % en 1995. Y en el caso de la temperatura, la variabilidad interanual es sensiblemente estable: el coeficiente de variabilidad se mantiene entre el 3 % y el 6 %.

Es sugestivo pensar que la precipitación, y en consecuencia la lluvia útil, tienen un comportamiento cíclico, al sucederse periodos secos y periodos húmedos con aparente regularidad. E. Brück-

ner a finales del siglo XIX sugirió la existencia de un ciclo de unos 22 años en los que detecta los siguientes periodos húmedos en el noroeste de Europa: 1736-1755, 1771-1780, 1806-1825, 1841-1855, 1871-1885, que alternan con los periodos secos de 1756-1770, 1781-1805, 1826-1840, 1856-1870 (BURROUGHS 1992). Aplicando el test de las rachas a la precipitación y a la lluvia útil, se obtienen respectivamente 55 y 54 rachas, ambas ligeramente por debajo del umbral inferior de 57 rachas que corresponde a un nivel de significación del 5 % para una serie de 137 datos, lo que parece indicar una ligera persistencia en los valores de las series.

En el caso de la lluvia eficaz, la variabilidad interanual responde, como en el caso de la precipitación, a una oscilación de periodo largo que crece de forma prácticamente continua desde 1924 hasta la actualidad, en que se dan valores similares al primer periodo de treinta años que finaliza en 1893. El crecimiento continuo de la variabilidad de la lluvia útil, que se corresponde con el de la precipitación, se interpreta como un aumento de la alternancia de periodos secos y húmedos de cierta importancia que puede incidir aumentando los procesos de desertificación en estas áreas, y en la percepción subjetiva de una disminución de lluvia o de un comportamiento cíclico, como concluía Brückner recogiendo en sus estudios ideas anteriores de Sir Francis Bacon, que en 1625 comentaba la existencia de ciclos alternantes de 35 años entre periodos cálidos y secos y entre húmedos y fríos. En realidad, aunque la lluvia anual no presente tendencia en el periodo largo de 1864 a 2000, lo que sí ha cambiado ha sido el patrón de distribución interanual de la precipitación en estados climáticos consecutivos de treinta años, como así lo pone de manifiesto el comportamiento del coeficiente de variación.

Puesto que las series de coeficientes de variación móviles, tanto de precipitación como de lluvia eficaz, presentan una falta de aleatoriedad manifiesta, es interesante datar los cambios de tendencia de estas series. En la tabla 1 figuran los cambios de tendencia de las series de coeficientes de variación de la precipitación, lluvia útil, y temperatura. El cambio detectado con un nivel de significación más alto en la lluvia útil, se da en 1913 con un nivel de significación de $3,75 \cdot 10^{-8}$, seguido del de 1949 con un nivel de significación de $1,68 \cdot 10^{-7}$. Entre estos dos años no se presentan cambios significativos de tendencia, el valor del coeficiente de variación oscila entre 0,49, el mínimo de la serie, y 0,60; los estados climáticos son relativamente estables respecto a la variabilidad interanual. En el caso de la temperatura y de la precipitación, los cambios de tendencia más significativos se presentan sensiblemente en los mismos años en que se dan en la lluvia eficaz.

5. SECUENCIAS SECAS Y HÚMEDAS

Para finalizar este trabajo, merece la pena comentar los periodos continuados de déficit de precipitación y de lluvia eficaz, que forman parte de la variabilidad interanual de estas variables y que constituyen características del clima de esta región mediterránea. Un procedimiento muy utilizado para detectar secuencias secas o húmedas consiste en contabilizar el número de años consecutivos en los que la precipitación observada ha estado dentro del quintil inferior de la serie. Sin embargo, ocurre frecuentemente que dos secuencias secas o húmedas están separadas por un año normal o ligeramente seco que aparentemente interrumpe un periodo que, en su conjunto, es anormalmente seco o húmedo. Por ello, se ha preferido estudiar el comportamiento de los valores medios móviles de lluvias para periodos de dos, tres y cuatro años.

En las figuras 7 y 8 se representan las medias móviles de cuatro años de la precipitación y de la lluvia eficaz, y se comparan los valores con la mediana de la serie y los quintiles. Destaca como periodo seco más largo el correspondiente a 1881-1887, y el más húmedo el que se presentó desde 1885 hasta 1895.

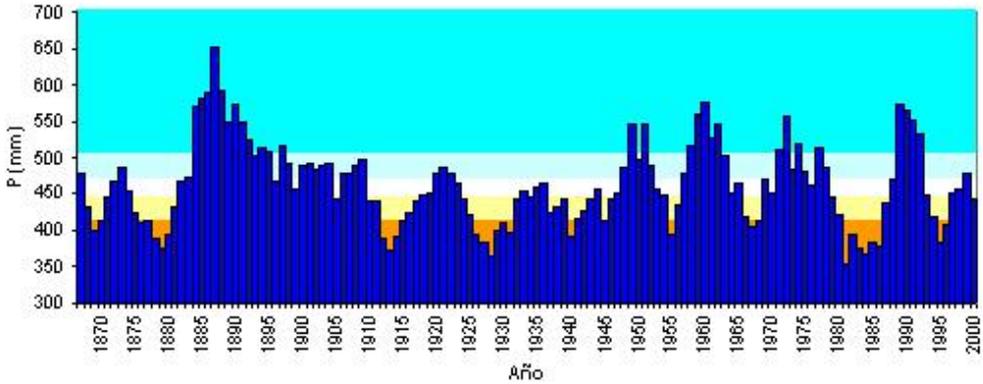


Figura 7: Media móvil de 4 años de la precipitación anual de las cuencas de Levante y Sureste

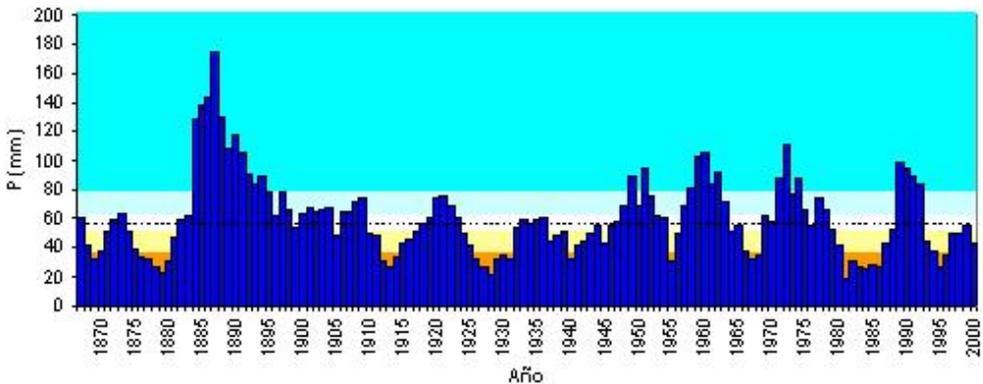


Figura 8: Media móvil de 4 años de la lluvia útil de las cuencas de Levante y Sureste

6. CONCLUSIONES

La serie anual reconstruida de lluvia eficaz de las cuencas del sureste y de levante no presenta tendencias significativas, sin embargo los valores de la serie sí presentan una ligera persistencia.

La variabilidad interanual es elevada, y en la serie de coeficientes de variación móviles para periodos consecutivos de treinta años se dan valores entre el 49 % y el 90 %. Presenta una oscilación de periodo largo, con un mínimo en 1924 y un máximo en la actualidad del mismo orden que el que se dio en el treintenio que finalizó en 1893. Los cambios de tendencia detectados en esta serie son sensiblemente coincidentes con los observados en las series de coeficientes de variación móviles de la precipitación y de la temperatura.

Como consecuencia final, de estas conclusiones se desprende que la administración del recurso hídrico en estas regiones, en las que el crecimiento de la demanda de agua es patente, se encuentra ante un reto difícil de resolver, primero porque el recurso natural disponible es muy limitado, y segundo porque la variabilidad interanual es muy grande.

7. REFERENCIAS

- ALMARZA, C. (1995): Meteorological Network for Hydrological Purposes in Spain. En *Case-book on Hydrological Networks*, publicación nº 623 de la O.M.M, pp. 109-114.
- ALMARZA, C., LÓPEZ, J.A. y FLORES, C. (1996): *Homogeneidad y Variabilidad de los Registros Históricos de Precipitación en España*. Ministerio de Medio Ambiente. I.N.M. serie A nº 143. Madrid, 318 pp.
- ALMARZA, C. (2000): Respuesta al Calentamiento Global de la Serie de Temperatura Media de Madrid. En *2ª Asamblea Hispano-Lusa de Geodesia y Geofísica*, Lagos (Portugal), pp. 527-528.
- ALMARZA, C., CHAZARRA, A. y PERAZA, B. (2000): Estimación de la precipitación media mensual en las grandes cuencas hidrográficas. En *Calendario Meteorológico año 2000*, INM, pp. 257-260.
- BOURROUGHES, W.J. (1992): *Weather cycles: real or imaginary?*. Cambridge University Press., pp. 6-10.
- CHAZARRA, A. y GUTIÉRREZ, E. (2002): Descripción de un Método de Interpolación Espacial de Variables Climatológicas considerando la Influencia de Parámetros Fisiográficos. Aplicación a la Precipitación Mensual, en *3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Valencia 2002.
- SNEYERS, R. (1997): Climate Chaotic Instability. Statistical Determination – Theoretical Backgrounds. *Environmetrics*, 8, pp. 517-532.
- W.M.O. (1998): *W.M.O. Statement on the status of the Global climate in 1998*. Ginebra, Suiza.