

PATRONES TEMPORALES Y ESPACIALES DE LA PRECIPITACIÓN EN ARAGÓN DESDE 1950

**José M. Cuadrat, Roberto Serrano, Miguel Ángel Saz
y José M. Marín**

Departamento de Geografía, Universidad de Zaragoza
jmcuadrat@unizar.es

Resumen: En este trabajo se analizan los patrones espaciales y temporales de la precipitación en Aragón desde 1950 y se analizan las tendencias del periodo 1981-2010 respecto a 1951-1980. Para el análisis se obtuvo una serie regional de precipitaciones entre 1950 y 2010. Se comprueba la existencia de diferentes fases secas y húmedas, además de un descenso pluviométrico generalizado. A escala estacional, existen importantes diferencias, siendo los descensos más acusados en invierno y verano; mientras en otoño existe cierta tendencia al alza.

Palabras clave: Precipitación, tendencias recientes, análisis espacial, Aragón, España.

Abstract: This work analyses the spatial and temporal precipitation patterns in Aragon since 1950, and compare two time periods: 1951-1980 and 1981-2010. The regional series (1950-2010) presents drier and more humid phases and a general decrease of precipitation. On a seasonal scale there are some differences: winter and summer shows a precipitation decreasing, opposite to the one produced in autumn.

Keywords: Precipitation, recent trend, spatial analysis, Aragón, Spain.

1. Introducción

Los actuales modelos de cambio climático sugieren, como escenario global, que el clima experimentará variaciones en las latitudes medias de Europa y en el área mediterránea, con un aumento importante de las temperaturas y significativo descenso de las precipitaciones (Houghton *et al.*, 2001). Resultados similares concluye para España el informe sobre el cambio climático elaborado por el Ministerio de Medio Ambiente español, que destaca el calentamiento general, la reducción de las lluvias anuales y, sobre todo, la importante disminución de los recursos hídricos (Moreno, 2005). En este contexto, un elemento básico de estudio es la precipitación, ya que supone la principal entrada del sistema hidrológico, es responsable de la variabilidad del balance hídrico y tiene profundas implicaciones en el conjunto del ciclo del agua.

Identificar la variación de las precipitaciones debido al cambio del clima es una tarea complicada puesto que las precipitaciones, frente a otros elementos del clima, muestran una importante variabilidad espacial y temporal, sobre todo en las áreas de transición climática como es la península Ibérica. En Aragón, además, este tipo de análisis reviste especial interés debido a la diversidad climática, con predominio de las condiciones semiáridas (Cuadrat, 1999), la elevada variabilidad pluviométrica de esta región (Saz y Vicente-Serrano, 2003), las frecuentes e intensas sequías (Vicente-Serrano, 2004) y la existencia de episodios extremos de elevada magnitud (Beguería *et al.*, 2007).



Figura 1. Mapa de localización de Aragón.

La preocupación por conocer el patrón de cambio de las precipitaciones a escala de análisis regional justifica muchas de las investigaciones realizadas (De Luís et al, 2007; Vicente-Serrano et al, 2007; Cuadrat et al, 2007a; Cuadrat et al, 2007b); sin embargo, es aún complicado extraer conclusiones generales sobre el conjunto de la región aragonesa, por la variedad de escalas espaciales empleadas o por cubrir periodos de tiempo diferentes, siendo complejo realizar una valoración global de la evolución pluviométrica de Aragón. El presente trabajo parte de una amplia y actualizada base de datos pluviométrica y tiene como objetivo profundizar en el conocimiento de las tendencias de las precipitaciones desde 1950 y analizar las anomalías observadas a escala anual y estacional.

2. Metodología

2.1. Base de datos

Se han utilizado 122 series mensuales homogéneas entre los años 1950 y 2010, con datos procedentes de los archivos de la Agencia Estatal de Meteorología, elaboradas para la realización de la cartografía del Atlas Climático de Aragón y ampliadas para la preparación del informe *Escenario climático actual y situación hidrológica en Aragón* encargado por el Gobierno de Aragón ([www.aragon.es/Medio Ambiente](http://www.aragon.es/MedioAmbiente)). Las series fueron sometidas a un riguroso proceso de reconstrucción, control de calidad y test de homogeneidad para minimizar la presencia de errores en la base de datos y garantizar su consistencia.

El proceso de control de calidad se realizó mediante la creación de series de referencia, para lo cual se siguió la metodología de Peterson y Easterling (1994). Se identificaron y eliminaron los datos considerados anómalos, evaluando la coherencia de cada serie temporal, sus extremos, y haciendo una comparativa con las de referencia. Seguidamente se realizó un relleno de lagunas mediante un método estadístico programado en lenguaje R y basado en el percentil que ocupa el dato faltante en sus series de referencia. A continuación se contrastó la homogeneidad de cada serie siguiendo el método de Alexanderson (1986). Este método se basa en el análisis de una serie de valores observados en la serie candidata a homogeneizar y los valores de la serie de referencia calculada con anterioridad. La serie se normaliza para obtener una serie Z-serie a partir de la cual se determinan estadísticamente las inhomogeneidades existentes, así como su magnitud y significación. Para cada uno de los valores de la serie Z-serie se plantea una hipótesis alternativa: la variable aleatoria Z es normal de varianza 1 y media m_1 hasta ese momento, y varianza 1 y media m_2 a

partir del dato posterior. Así se calculan los estadísticos correspondientes (T), que cuando superan un nivel crítico determinan que la serie es inhomogénea en ese punto, procediéndose a su corrección a partir de la multiplicación por un coeficiente o la suma de una constante. Por último, con las series libres de datos anómalos y de inhomogeneidades, se efectuó un proceso de reconstrucción, empleando las series del periodo 1950-2010.

El carácter puntual de la información climática, basada en la ubicación de los observatorios, y la dispersión desigual de los mismos en el territorio, obliga a estimar valores climáticos en aquellos puntos en los que no existe información observada. La realización de las cartografías se realizó mediante modelos de regresión múltiple, que se determina como el método con mejores resultados para un territorio de gran rugosidad topográfica y variabilidad de las precipitaciones como Aragón tal y como se evalúa en diferentes trabajos como Vicente y Saz (2002), Vicente *et al.* (2003), y Saz *et al.* (2010).

El desarrollo metodológico para la realización de la cartografía comenzó con la selección de las variables independientes que se usan para el cálculo de los modelos de regresión. En este caso se utilizó un modelo digital de elevaciones (MDE) de un tamaño de celda de 100 metros y capas digitales de la misma resolución de distancia al Mar Cantábrico y Mar Mediterráneo, latitud (UTMY) y longitud (UTMX), generadas en ArcGIS 9.3 a partir del MDE. Estas variables son las más habituales a la hora de realizar este tipo de modelos de regresión, tal y como se indica en Vicente *et al.* (2003).

A continuación, de cada observatorio se extrajo el valor de las variables independientes, con las que se aplicó una regresión lineal múltiple por pasos sucesivos fijando un nivel de significación de 0.01, y cuyos coeficientes obtenidos servirían para aplicar la siguiente formulación a los datos cartográficos:

$$m(x) = b_0 + b_1P_1 + b_2P_2 + \dots + b_nP_n$$

donde m es el modelo final a obtener, b son los coeficientes de cada variable, siendo b_0 la constante para todo el modelo, y P son las capas raster con la información de las variables independientes.

Las operaciones con los grid y los métodos de interpolación se aplicaron utilizando la extensión de análisis geoestadístico de ArcGIS 9.3. Los cálculos de los modelos se han realizado en SPSS.

2.2. Análisis de tendencias

A partir de la base de datos se comprobaron las tendencias y las anomalías a escala estacional y anual. Las estaciones se definieron de acuerdo a los criterios estándar empleados en los trabajos climáticos: invierno (diciembre, enero y febrero), primavera (marzo, abril y mayo), verano (junio, julio y agosto) y otoño (septiembre, octubre y noviembre). Las anomalías se calcularon como porcentajes de variación de la precipitación del periodo 1981-2010 con respecto a 1951-1980, para tener una mejor aproximación al comportamiento real de la pluviometría en los últimos 60 años. La idoneidad de comparar ambos periodos se justifica en el hecho de que no está contenido el uno en el otro y, por tanto, no se obtienen resultados condicionados por la presencia de los datos con los que se compara.

El estudio de tendencias se aplicó para el conjunto de Aragón a una serie regional obtenida mediante el promedio ponderado de los diferentes observatorios meteorológicos, y de acuerdo con el método planteado por Jones y Hulme (1996), en el que el peso de cada observatorio se obtiene de acuerdo a la superficie que representa, calculada mediante polígonos de Thiessen. El estudio se hizo por medio del test no paramétrico Rho de Spearman, porque presenta mayor consistencia que los test de carácter paramétrico al estar menos afectado por la presencia de valores extremos o por la posible falta de normalidad de las series (Lanzante, 1996).

3. Resultados

3.1. Tendencias en los totales pluviométricos

En la figura 2 se muestran los resultados generales del análisis de tendencia estacionales y anual de precipitación a partir de la serie regional de todo Aragón. Los registros muestran una fase húmeda desde finales de los 50 hasta comienzos de los 60, y desde ese momento se dibuja un cierto perfil descendente y continuo hasta la actualidad, atenuado en parte por la mayor pluviometría de los años 90, pero de nuevo regresiva hasta el presente, con ligeros altibajos.

En conjunto, la tendencia es negativa. El descenso anual se evalúa en 12,7 mm por década, y el dato estacional es también negativo, aunque con valores muy diferentes entre estaciones, como se señala en el cuadro 1. Mientras en primavera y otoño la tendencia es muy poco significativa, la situación es distinta en verano e invierno, con descensos de 5,9 y 5,7 mm por década, respectivamente, lo cual hace suponer que el comportamiento es bastante generalizado en todo Aragón.

Precipitación anual: -12,7 mm/década
 Precipitación de invierno: -6,2 mm/década
 Precipitación de primavera: -0,98 mm/década
 Precipitación de verano: -6,4 mm/década
 Precipitación de otoño: -0,5 mm/década

Cuadro 1. Tendencias de la precipitación anual y estacional.

Este comportamiento se corresponde en buena medida con el observado por De Luís et al. (2007) en su investigación sobre la cuenca del Ebro, o los más amplios realizados por Nieto y Rodríguez-Puebla (2006) y Rodríguez-Puebla y Brunet (2008) sobre la península Ibérica, donde coinciden en señalar para el ámbito aragonés la disminución mayor de las lluvias en los meses de invierno y verano, siendo el periodo otoñal el de descensos menos significativos.

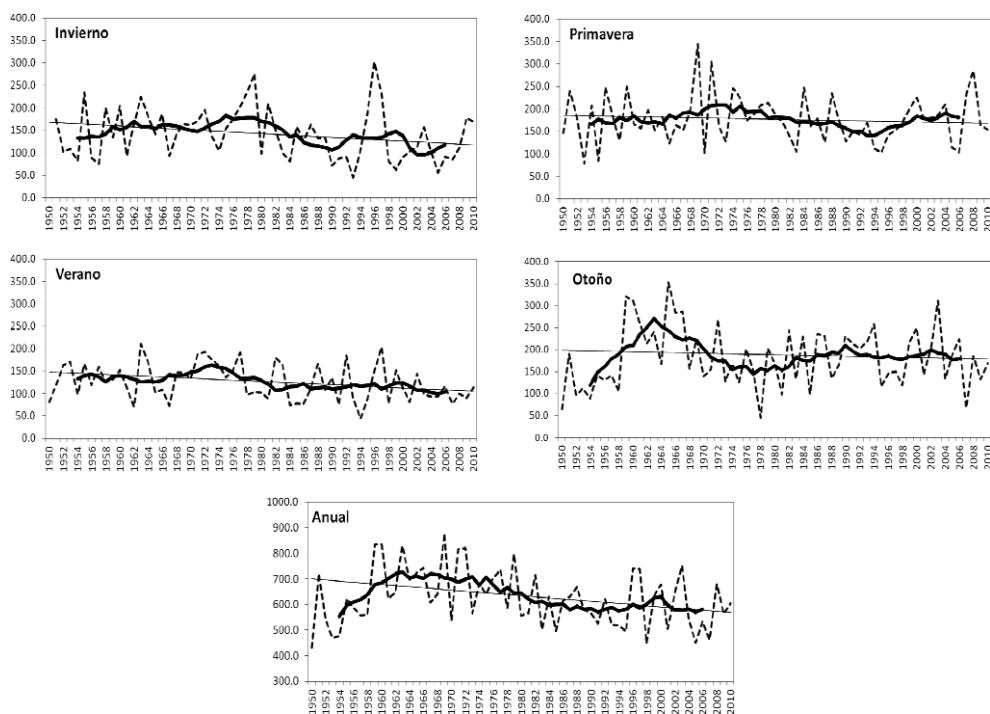


Figura 2. Evolución de las cantidades estacionales y anuales de precipitación, expresada en mm (1951-2010). La línea discontinua representa la precipitación observada y la línea continua la precipitación filtrada con un filtro de 9 años. La línea de tendencia se obtiene mediante el ajuste por mínimos cuadrados a partir de los datos filtrados.

3.2. Patrones temporales y espaciales de las tendencias

La heterogeneidad del territorio aragonés implica un escenario complejo respecto a la evolución de las precipitaciones, lo cual conlleva patrones de comportamiento muy variados (Figura 3). A escala de tiempo anual la tendencia es regresiva en buena parte de Aragón, con diferencias espaciales poco acentuadas. Destacables son algunas zonas del Bajo Aragón, del Somontano oscense y del Pirineo oriental, donde las precipitaciones de 1981-2010 respecto de 1951-1980 han disminuido casi un 25%. En el lado opuesto se sitúan el entorno de Gúdar-Javalambre y el Pirineo occidental donde la precipitación ha tenido débiles modificaciones o cierta variación al alza.

Estacionalmente, los cambios son más evidentes y los contrastes territoriales más marcados. Invierno es la estación con descensos más significativos y generalizados, sobre todo en la mitad Norte, con anomalías próximas al 25% en el Somontano y porcentajes aún superiores hacia el sector oriental. Sólo al sur de Aragón las pérdidas se suavizan, pero el patrón general es claramente regresivo. El descenso se observa también durante la primavera, aunque con valores bastante más atenuados y ligeras variaciones entre las pérdidas que registran las tierras septentrionales aragonesas, ocasionalmente intensa en algunos sectores, y los pequeños incrementos en el centro y sur, siempre inferiores al 25%. En verano la tendencia de la pluviometría es de nuevo ampliamente regresiva, en particular en el centro de la región donde el descenso observado en algunas zonas llega a alcanzar porcentajes del 50%; en el resto del territorio los valores se moderan, pero la disminución es general. En otoño el comportamiento de las lluvias ha sido muy diferente del observado en el resto de las estaciones: el centro de Aragón y, en general, las tierras occidentales de la región han experimentado un notable aumento pluviométrico, próximo en ocasiones al 50%; por el contrario, la tendencia es decreciente hacia las tierras orientales de las provincias de Huesca y Teruel, lo que permite esbozar cierto gradiente de disminución de la precipitación Oeste-Este, mucho más intenso hacia el Bajo Aragón.

4. Discusión y conclusiones

El resultado de la comparación de las precipitaciones de 1981-2010 respecto de 1951-1980 muestra una clara tendencia hacia el descenso de las cantidades totales anuales, con porcentajes de cambio moderados y pocas diferencias territoriales. Concuere este comportamiento con el observado en buena parte de la península Ibérica (Rodríguez Puebla y Brunet, 2008) y en la cuenca del Ebro (De Luís et al, 2007), y a escala de mayor detalle con el analizado en el Pirineo español (Vicente Serrano et al, 2007). Estos estudios coinciden en mostrar en Aragón pérdidas generalizadas, aunque la magnitud de las mismas no siempre es idéntica y existen además, tanto espacial como temporalmente, algunas discrepancias que sin duda están

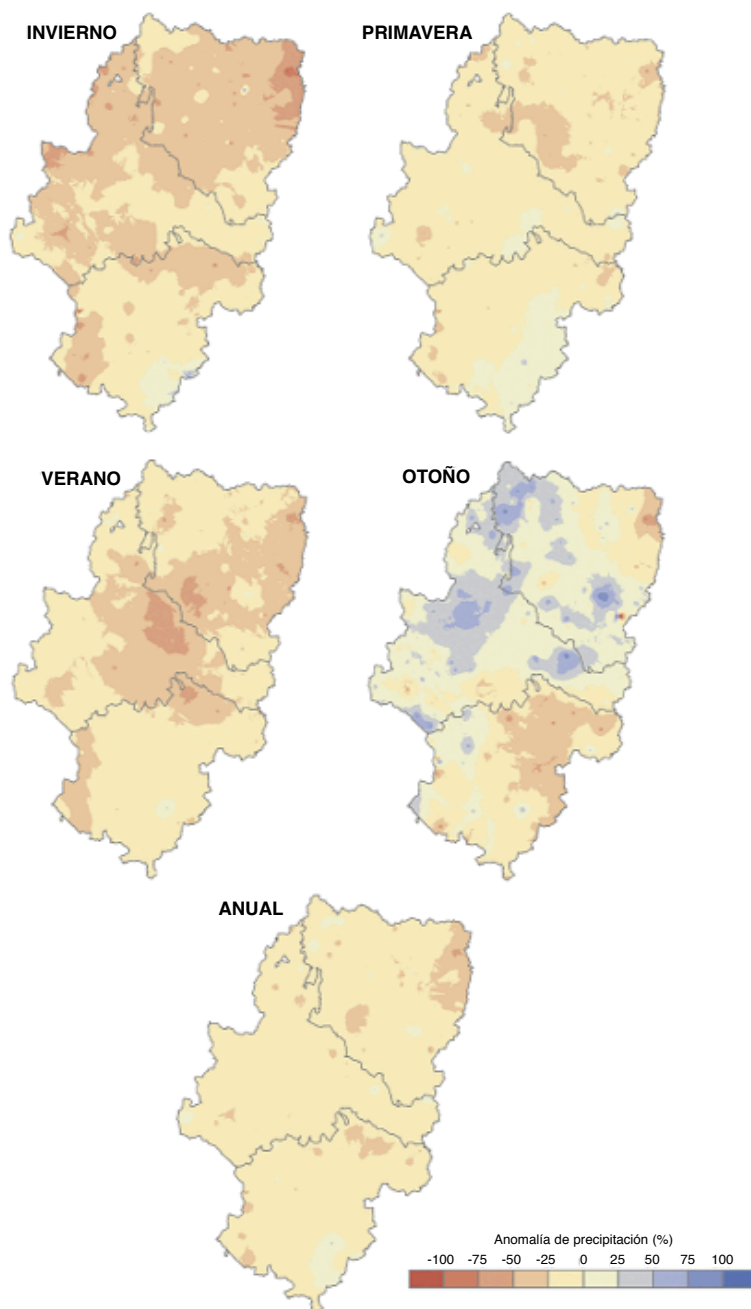


Figura 3. Anomalías de las precipitaciones de 1981-2010 respecto de 1951-1980.

relacionadas con la metodología de cálculo empleada y los diferentes periodos analizados.

La disminución de las lluvias se observa sobre todo en invierno y verano; en primavera el descenso es más moderado, y en otoño en cambio dominan los valores positivos. Este comportamiento se ha relacionado con una pérdida de importancia de los sistemas frontales procedentes del Atlántico, principales responsables de las lluvias invernales, como sugieren Paredes et al (2006) o Nieto y Rodríguez Puebla (2006), y con cambios en verano en los sistemas advectivos mediterráneos y el reforzamiento de las condiciones anticiclónicas, como apuntan Fernández García y Martín Vide (2004). En sentido opuesto, el aumento de los eventos extremos podría explicar ciertos contrastes espaciales y sobre todo los valores más altos de la estación otoñal (Vicente Serrano et al, 2007).

Es muy probable que las posibles modificaciones en los patrones de circulación son las que pueden explicar estas anomalías, pero seguramente no es esta la única justificación y sea preciso considerar también el incremento de la variabilidad, que en estos últimos años está aumentando significativamente en todo Aragón, siguiendo un patrón que se repite en el ámbito mediterráneo, como señalan los informes del IPCC, y que conviene analizar con detalle.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco de los proyectos de investigación MMAMRM 2008-00050083542 del Ministerio de Medio Ambiente y CGL2011-28255, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y FEDER. Y ha contado también con la ayuda del Gobierno de Aragón y el Fondo Social Europeo al grupo de investigación consolidado "Clima, Agua y Cambio Global" de la Universidad de Zaragoza.

Bibliografía

- Alexandersson, H. (1986). A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6: 661-675.
- Beguería, S.; Vicente-Serrano, S.M. y López-Moreno, J.I. (2007). Trend analysis of extreme precipitation probability since 1950 by means of point process methodology: application in North-East Spain. *EMS*. San Lorenzo del Escorial. Madrid.
- Cuadrat, J.M. (1999). El clima de Aragón. CAI-100. Institución "Fernando El Católico". Zaragoza, 110 p.
- Cuadrat, J.M., Saz, M.A. y Vicente-Serrano, S.M. (2007). Atlas Climático de Aragón. Gobierno de Aragón. 229 p.
- Cuadrat, J.M., Saz, M.A., Vicente-Serrano, S. y González-Hidalgo, J.C. (2007a). Water Resources and Precipitation Trends in Aragon. *International Journal of Water Resources Development*, 23: 107-123.

- De Luís, M.; Longares, L.A.; Stepanek, P. y González-Hidalgo, J.C. (2007). Tendencias estacionales de la precipitación en la Cuenca del Ebro. *Geographicalia*, 52: 52-78.
- Fernández-García, F. and Martín-Vide, J. (2004). Tendencias de los patrones de circulación estivaes en Europa occidental en la segunda mitad del siglo XX. Precipitaciones asociadas en la península Ibérica. En García Codron, J.C.; Diego, C.; Fdez. de Arróyabe, P.; Garmendia, C. and Rasilla, D. (Eds.). *El clima entre el mar y la montaña*. AEC, Serie A, 4: 273-282.
- Houghton, J.T.; Ding, Y.; Griggs, D.J.; Noguera, M.; van der Linden, P.J. and Xiaosu, D. (Eds) (2001). *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Cambridge University Press, 944 p.
- Jones, P.D. and Hulme, M. (1996). Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations. *International Journal of Climatology*, 16: 361-377.
- Lanzante, J.R. (1996). Resistant, robust and non-parametric techniques for the analysis of climate data: theory and examples, including applications to historical radiosonde station data. *International Journal of Climatology*, 16: 1197-1226.
- Moreno, J.M. (Coord) (2005). Evaluación preliminar de los impactos en España por efecto del cambio climático. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, 846 p.
- Nieto, S. y Rodríguez-Puebla, C. (2006). Comparison of Precipitation from Observed Data and General Circulation Models over the Iberian Peninsula. *Journal of Climate*, 19: 4254-4275.
- Paredes, D.; Trigo, R.; Garcia-Herrera, R. and Trigo, I. (2006). Understanding precipitation changes in Iberia: Weather typing and storm approaches. *Journal of Hydrometeorology*, 7: 101-113.
- Peterson, T.C. and Easterling, D.R. (1994). Creation of homogeneous composite climatological reference series. *International Journal of Climatology*, 14: 671-679.
- Rodríguez Puebla, C. y Brunet, M. (2008). Variabilidad y cambio climático. En: Cuadrat, J.M. y Martín Vide (Eds). *La climatología española. Pasado presente y futuro*. Pressas Universitarias de Zaragoza y Asociación Española de Climatología. Zaragoza.
- Saz, M.A. and Vicente Serrano, S. (2003). Incertidumbre en la disponibilidad de recursos hídricos superficiales en la cuenca del Ebro: análisis temporal desde una perspectiva plurisecular. *Geographicalia*, 44: 27-55.
- Saz, M.A.; Serrano, R.; De Luis, M. y Longares, L.A. (2010). Comparación de métodos de interpolación y de regresión para la cartografía de temperaturas máximas y mínimas absolutas: El caso de Navarra (Norte de España) en 2010. VII Congreso AEC: *Clima, ciudad y ecosistemas*.
- Vicente Serrano, S.M. y Saz, 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.; Saz, M.A. y Cuadrat, J.M., (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24 pp. 161-180.
- Vicente-Serrano, S.; López-Moreno, J.I. y Beguería, S. (2007). La precipitación en el Pirineo español: diversidad especial en las tendencias y escenarios futuros. *Pirineos*, 162: 43-69.