Tethys, 6, 15–30, 2009 Revista del tiempo y el clima del Mediterráneo occidental www.tethys.cat ISSN-1697-1523 eISSN-1139-3394

DOI:10.3369/tethys.2009.6.02

Revista editada por **ACAM** (Associació Catalana de Meteorologia)



Una revisión de los análisis estadísticos de las precipitaciones diarias y mensuales en Cataluña

X. Lana¹, A. Burgueño², M. D. Martínez³ y C. Serra¹

¹Departamento de Física e Ingeniería Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona ²Departamento de Astronomía y Meteorología, Departamento de Física, Universitat de Barcelona, C. Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona

³Departamento de Física Aplicada, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona Recibido: 14-VII-2008 – Aceptado: 15-XII-2008 – **Versión Traducida**

Correspondencia a: francisco.javier.lana@upc.edu

Resumen

En este trabajo, presentamos una revisión de los estudios de los últimos años sobre las precipitaciones diarias y mensuales en Cataluña. El análisis de las precipitaciones mensuales se realiza a lo largo de la costa oeste del Mediterráneo y en Cataluña, cuantificando aspectos como los de la irregularidad de las cantidades mensuales y la distribución espacial del Índice de Precipitación Estándar. Aplicamos varias estadísticas a las series de precipitaciones diarias como su valor extremo y las distribuciones espaciales intraanuales, la variabilidad de la cantidad de precipitación media y su desviación estándar para cada mes, su distribución por cantidad y tiempo, y las tendencias temporales que afectan a cuatro índices pluviométricos para distintos percentiles e intervalos de clase. Todos estos distintos análisis constituyen la continuidad del estudio científico de las precipitaciones en Cataluña, que empezó hace aproximadamente un siglo.

Palabras clave: precipitación mensual y diaria, distribuciones espaciales y temporales, índices pluviométricos, tendencias temporales, Cataluña

1 Introducción

Los resultados de la primera red de precipitaciones mensuales en Cataluña fueron compilados por Febrer (1930), con medidas de distintas duraciones a partir de 314 pluviómetros que cubrían el período de 1861 a 1925. Los resultados incluían los primeros mapas de precipitaciones medias mensuales. Podemos encontrar una lista completa de las contribuciones preliminares en Albentosa (1980). Con una finalidad parecida, Clavero et al. (1996) publicaron una distribución espacial más detallada de las precipitaciones medias mensuales a partir de cerca de 300 pluviómetros, con al menos 20 años de registros desde 1940 hasta 1980. Teniendo presente la descripción estadística y aprovechando los datos disponibles, los autores de este trabajo han analizado las propiedades espaciales particulares de las cantidades de precipitación mensuales y diarias en Cataluña, en un siglo en el cual se ha demostrado recientemente la detección de la influencia del hombre en las tendencias de precipitación en la Tierra (Zhang et al., 2007). Las investigaciones anteriores en este terreno cubrían varios ámbitos como la contribución de la precipitación convectiva a las cantidades anuales (Guilló y Puigcerver, 1970; Puigcerver y Guilló, 1971; Llasat y Puigcerver, 1997; Llasat, 2001), el análisis dinámico y estadístico de las inundaciones (Llasat y Puigcerver, 1992, 1994; Llasat y Rodríguez, 1992; Ramis et al., 1994; Llasat et al., 1996), la predicción de un sistema mesoescalar convectivo por un modelo numérico anidado (Codina et al., 1997), los análisis climatológicos de las series temporales secohúmedo (Martín-Vide, 1984; Burgueño, 1991), la regionalización de las precipitaciones a través del Análisis de Componentes Principales (Fernández-Mills et al., 1994; Serra et al., 1998), y la distribución Gumbel de las cantidades de precipitación extrema (Casas et al., 2007).

Según Kiktev et al. (2003), para las latitudes medias (30° - 60°N) y el período 1950-1995, la mayor parte de Europa y Asia Oriental se caracterizan por una tendencia positiva en el máximo anual de días consecutivos con una precipitación diaria por debajo de 1.0 mm, con una tendencia negativa en el número de días de lluvia. Este comportamiento general adquiere más relevancia para la zona mediterránea, donde se ha observado un aumento de las precipitaciones ex-

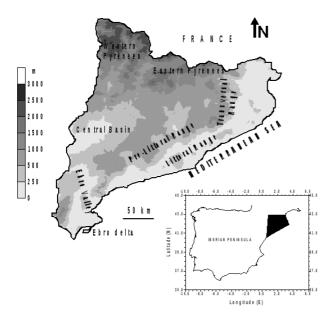


Figura 1. Principales características orográficas de Cataluña y su emplazamiento en la Península Ibérica.

tremas diarias entre 1951-1995, a pesar de una disminución de las cantidades totales (Trigo et al., 2000; Alpert et al., 2002). Así, en la zona mediterránea, la perspectiva es de una mayor frecuencia de épocas de sequía, con impactos asociados a la agricultura, a la explotación de los recursos del agua y también a actividades socio-económicas. En la Península Ibérica, los análisis de las distintas tendencias de la precipitación diaria indican un aumento de precipitaciones débiles en detrimento de una disminución de episodios de precipitación más intensa (Goodess y Jones, 2002; Gallego et al., 2006; Rodrigo y Trigo, 2007). Distintos modelos climáticos regionales, así como modelos globales que tienen en consideración los diferentes escenarios de emisión de gases invernadero aplicados a la región mediterránea, indican un alargamiento de los períodos largos de sequía, debido a la reducción de la cantidad de precipitación durante el s. XXI (Ghan y Shippert, 2006), en especial en verano (Voss et al., 2002; Gibelin y Déqué, 2003; Räisänen et al., 2004; Sánchez et al., 2004; Kundzewicz et al., 2006).

Estos cambios observados en la distribución espacial y temporal de las precipitaciones están conectados a los efectos dinámicos del aumento de gases invernadero y de aerosoles de sulfato en la atmósfera. Así, en la actividad ciclónica extratropical, Geng y Sugi (2003) dedujeron que la densidad ciclónica total disminuirá considerablemente alrededor del año 2050 en las latitudes medias del hemisferio norte durante las épocas de diciembre-enero y febrero (DEF) y junio-julio-agosto (JJA). Además, mientras se prevé una reducción de los ciclones de fuerza débil y media, la densidad de los ciclones fuertes aumentará en más de un 20% en JJA. Estos cambios están ligados a la disminución de la baroclinicidad en la baja troposfera, causada principalmente por una dis-

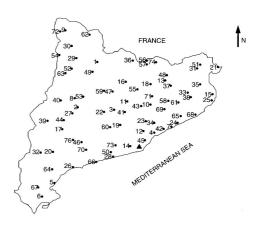
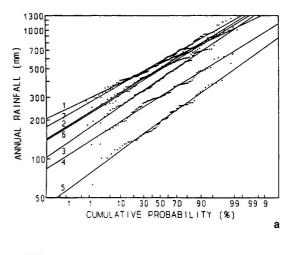


Figura 2. Distribución espacial de los 75 pluviómetros que pertenecen a la Agencia Estatal de Meteorología, incluyendo el Observatorio Fabra, representado por un triángulo sólido.



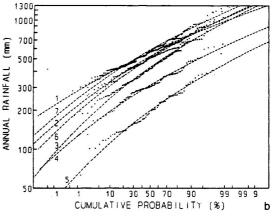


Figura 3. Distribuciones acumuladas de las precipitaciones anuales observadas, en comparación con a) la distribución log-normal, y b) la distribución gamma. Los números 1 a 7 corresponden a los pluviómetros ordenados por latitud decreciente. (Fuente: Lana y Burgueño, 2000a).

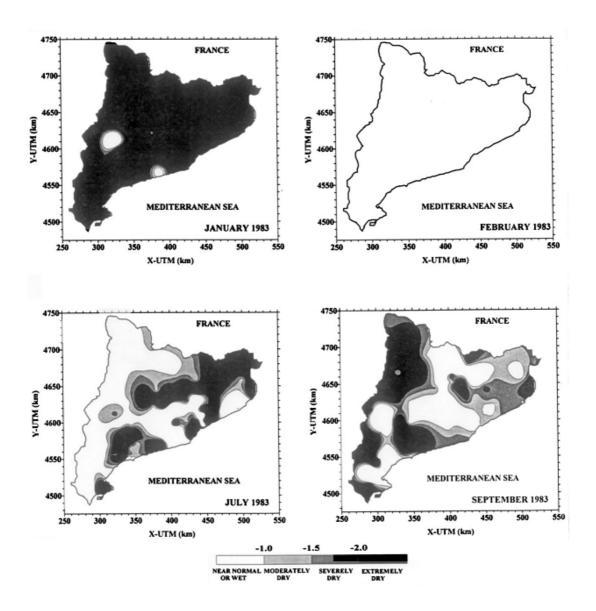


Figura 4. Distribución espacial de los Índices de Precipitación Estandarizados mensuales (SPI, según las siglas inglesas) para enero, febrero, julio y septiembre de 1983. Las partes blancas corresponden a zonas con pluviómetros que alcanzan SPIs anuales mayores que -1.0 (Fuente: Lana et al., 2001)

minución del gradiente de temperatura meridional. Estudios previos de Knippertz et al. (2000) sobre los ciclones en el Atlántico Norte también indicaban una reducción del número de ciclones totales y un aumento de los ciclones fuertes, con un cambio de trayectoria hacia los polos y hacia el este. Este cambio de trayectoria de las tormentas también se encuentra en otros autores (Ulbrich y Christoph, 1999; Pinto et al., 2007). Este comportamiento concuerda con la actividad ciclónica ártica de 1948-2002 (60° - 90°N), que muestra que el número e intensidad de los ciclones que penetran en el Ártico desde latitudes medias han aumentado, lo que sugiere un cambio de las trayectorias de las tormentas hacia el interior del Ártico, especialmente en verano (McCabe et al., 2001; Zhang et al., 2004). La cuenca mediterránea también podría sufrir una reducción de la actividad ciclónica global y

un aumento de ciclones profundos en un escenario climático con el doble de CO₂ (Lionello et al., 2002). Como consecuencia secundaria, el cambio observado hacia el norte de la trayectoria de las tormentas confirma unas condiciones de circulación más estables en Europa, que se manifiestan en una persistencia más elevada de la circulación atmosférica en las últimas décadas, con el consiguiente agravamiento de los impactos en la incidencia y gravedad de los extremos de temperatura (Kyselý y Domonkos, 2006; Kyselý, 2007).

Con estas condiciones de precipitación tan cambiantes, las estadísticas a escala regional son de gran valor, ya que éstas pueden proporcionar un análisis objetivo que ayudará a comprobar futuros escenarios de precipitación. Los contenidos de esta revisión cubren las estadísticas de las cantidades de precipitación mensuales y diarias en Cataluña de-

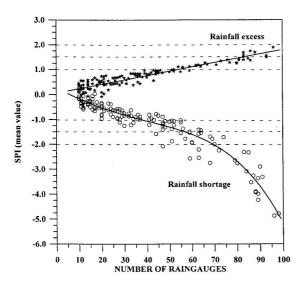


Figura 5. Evolución del SPI espacial medio en relación con el número de pluviómetros en que se presenta escasez o exceso de precipitación. Los círculos y las estrellas representan valores empíricos y las líneas sólidas el mejor ajuste mediante una línea recta y un polinomio, respectivamente. (Fuente: Lana et al., 2001)

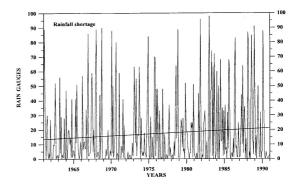
sarrolladas por los autores a lo largo de los últimos 14 años, prestando una especial atención a la distribución espacial, a las distribuciones estadísticas y a las tendencias temporales.

2 Área de estudio, base de datos y clima regional

2.1 Área de estudio

Cataluña tiene una superficie de 32.000 km² y se sitúa al NE de la Península Ibérica, con casi 400 km de costa mediterránea (Figura 1). Como principales características orográficas, vale la pena mencionar los Pirineos y los Prepirineos, que mitigan los efectos de las advecciones del norte en el resto de la región; las sierras Litoral y Pre-litoral, que protegen la Cuenca Central de las advecciones orientales y, a su vez, amplían sus efectos en los territorios Litoral y Pre-litoral; y la Cuenca Central, sujeta a los efectos de pasos frontales y advecciones occidentales, mitigadas por la lejanía de la costa atlántica. En los Pirineos, debe distinguirse entre el régimen de los Pirineos orientales, furtemente influidos por la proximidad del mar Mediterráneo, y la cara norte de los Pirineos occidentales, con claros signos de influencia atlántica.

El régimen mediterráneo está gobernado principalmente por la influencia de los vientos del oeste en invierno y el anticiclón subtropical en verano. La proximidad del mar y de tierras de alto relieve produce una gran variedad regional de tiempo y climas. En el Mediterráneo occidental, una gran mayoría de depresiones se originan en la misma región. Se trata de depresiones de tipo sahariano y genovés (Barry y



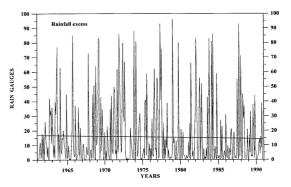


Figura 6. Evolución del número de pluviómetros detectados cada mes con SPIs menores de -1.0 (escasez de precipitación) y mayores de 1.0 (exceso de precipitación). Las líneas rectas representan las tendencias lineales a lo largo de un período de registro de 30 años. (Fuente: Lana et al., 2001).

Chorley, 2003; Jansà et al., 2001). A diferencia del centro y la costa sudoeste de la Península Ibérica, con precipitaciones invernales principalmente justificadas por la Oscilación del Atlántico Norte, la Península Ibérica oriental mantiene una correlación negativa con la Oscilación del Mediterráneo occidental (Martín-Vide y López-Bustins, 2006).

2.2 Bases de datos

Las precipitaciones mensuales a lo largo de las costas españolas del Mediterráneo y del Atlántico cercano, así como la cantidades de precipitación mensuales y diarias registradas en Cataluña se consiguieron gracias a la Agencia Estatal de Meteorología, el antiguo Instituto Nacional de Meteorología. La duración y el tamaño de las bases de datos han cambiado a lo largo de los años debido a distintos tipos de estudios realizados. Mientras que en Lana y Burgueño (2000a) la duración media de datos de siete pluviómetros iba más allá de un siglo, en Lana y Burgueño (1998) los datos se obtenían a partir de 74 pluviómetros, con duraciones que iban de 30 a 76 años; en Lana et al. (2001), a partir de 99 pluviómetros para los años 1961 a 1990; y en Burgueño et al. (2005), a partir de 75 pluviómetros que cubrían el período 1950-2000 (Figura 2). Para esta última base de datos, Lana et al. (2004) y Burgueño et al. (2005) han analizado, cuantificado y dis-

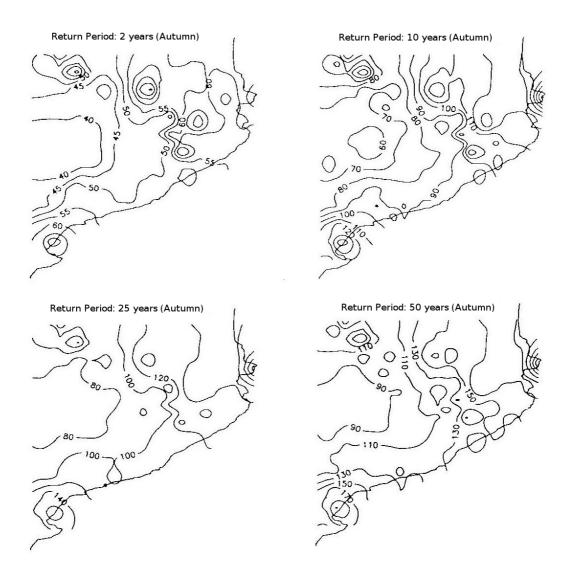


Figura 7. Distribución espacial de la precipitación máxima diaria (mm), correspondiente al otoño, para períodos de retorno de 2, 10, 25 y 50 años. (Fuente: Lana et al., 1995)

cutido la homogeneidad de cada registro de pluviómetro y una cierta falta de datos de algunos pluviómetros. Los datos que faltan en algunos pluviómetros llegan a períodos de 10 años, normalmente distribuidos en períodos cercanos a 1 año, más que en vacíos cortos. Los datos diarios que faltan se podían haber estimado con métodos y datos estadísticos correspondientes a los pluviómetros contiguos. Sin embargo, la fuerte variabilidad espacial del régimen pluviométrico diario en Cataluña (Lana et al., 2004) aconseja no sustituir los datos ausentes. A pesar del bajo número de series de datos en los Pirineos occidentales, la continuidad de los registros de los pluviómetros restantes es buena.

2.3 Clima regional

La proximidad de un mar caliente y la lejanía del Océano Atlántico, junto a una orografía compleja producen un escenario especial para la distribución espacial de las can-

tidades de precipitación, en la cual las advecciones del este y del sur son las que contribuyen de un modo más importante en primavera y sobre todo en otoño. Afectan sobre todo a las regiones litorales y pre-litorales, pero a veces se extienden más hacia el interior.

El efecto Föhn en la Península Ibérica bajo las advecciones del oeste y en los Pirineos bajo las circulaciones del norte y del noroeste explicarían las precipitaciones nulas o escasas bajo estas situaciones sinópticas en algunas zonas de Cataluña, excepto para la cara norte de los Pirineos Occidentales. Por otro lado, cuando un núcleo de baja presión atraviesa Cataluña, las cantidades de precipitación son relevantes. Además, a veces estos sistemas se reactivan cuando llegan al Mar Mediterráneo y pueden generar advecciones orientales.

Largos períodos de sequía normalmente tienen lugar en las estaciones cálidas y frías debido a la persistencia

Tabla 1. Lista de los pluviómetros del Mediterráneo y el Atlántico con su latitud, longitud, período de registro, años disponibles, media anual de las precipitaciones registradas, m, su desviación estándar, s, número de años para conseguir valores estacionarios, ns, y coeficiente de variación, CV. (Fuente: Lana y Burgueño, 2000a)

Estación	Latitud	Longitud	Período de	Años	\overline{m}	s	ns	CV
			registro		(mm)	(mm)	(años)	(%)
Barcelona	41°23'N	2°10'E	1860-1987	128	573.0	150.5	100	26.3
Tortosa	40°49'N	0°29'E	1906-1994	89	542.3	177.2	65	32.7
Valencia	39°29'N	0°21'W	1864-1994	129	452.0	178.1	65	39.4
Alicante	38°22'N	$0^{\circ}30$ 'W	1909-1994	86	324.6	108.3	60	33.4
Almería	36°50'N	2°29'W	1913-1994	75	212.2	85.9	50	40.5
Málaga	36°39'N	4°29'W	1906-1994	80	532.4	186.0	65	34.9
San Fernando	36°28'N	5°45'W	1839-1994	151	608.7	195.8	80	32.2

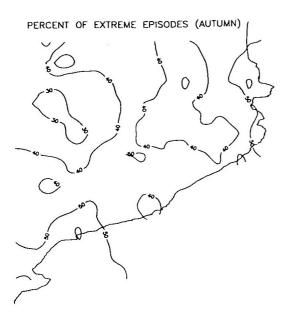


Figura 8. Distribución espacial del porcentaje de los extremos anuales ocurridos en otoño. (Fuente: Lana et al., 1995)

del anticiclón que a menudo afecta a toda la región. A lo largo de las estaciones cálidas, la entrada de aire húmedo del Mediterráneo junto a masas de aire frío en las capas altas de la troposfera pueden interrumpir las sequías del verano en cordilleras como los Pirineos y los Pre-pirineos con fenómenos convectivos.

3 Precipitaciones mensuales

Irregularidades pluviométricas para la costa mediterránea española

Para estudiar la irregularidad del régimen pluviométrico a lo largo de las costas del Mediterráneo español y del Océano Atlántico (Lana y Burgueño, 2000a), se utilizaron siete series largas de precipitación mensuales (Tabla 1), dos

de las cuales en la costa catalana. Se utilizaron tres funciones estadísticas (gamma, log-normal y una combinación de las distribuciones de Poisson y gamma) y diagramas momentoratio para simular las distribuciones empíricas mensuales y anuales de las cantidades de precipitación, comprobando cada distribución mediante el test Kolmogorov-Smirnov. Cabe destacar que mientras que la mayoría de casos mensuales requerían la distribución gamma, el comportamiento pluviométrico de los meses de verano quedaba bien descrito por la distribución Poisson-gamma. Por lo tanto, las cantidades de precipitación mensuales no están distribuidas de modo idéntico a lo largo del año para cada pluviómetro. Tanto la distribución log-normal como la gamma modelan satisfactoriamente las cantidades empíricas anuales (Figura 3). En segundo lugar, se calcularon las tendencias temporales deducidas para cantidades anuales y estacionales y se evaluó su significación estadística. El hecho más notable es que, aunque algunas tendencias lineales se acercan a 1 mm año⁻¹, sus niveles de importancia exceden el valor umbral asumido y, excepto la estación invernal para Barcelona, no se las consideró significativas desde un punto de vista estadístico. Finalmente, volviendo a utilizar cantidades mensuales y anuales, se calcularon tres índices de irregularidades temporales para cada serie pluviométrica. Como resultado, aumentó la discrepancia temporal de los modelos de precipitación de la región mediterránea. Además de la irregularidad temporal, se observó un cambio con la latitud tanto de los parámetros de las distribuciones estadísticas, como de los índices de irregularidad temporal de los pluviómetros analizados. Los dos pluviómetros situados más al sur constituyen un caso especial en comparación con las estaciones restantes, ya que también reciben la influencia del Atlántico debido a su proximidad con este océano.

También recibió una atención especial un análisis espectral de anomalías de precipitación (Lana y Burgueño, 2000b) para las series de cantidades mensuales de Barcelona (1860-1987), aprovechando la duración de sus datos.

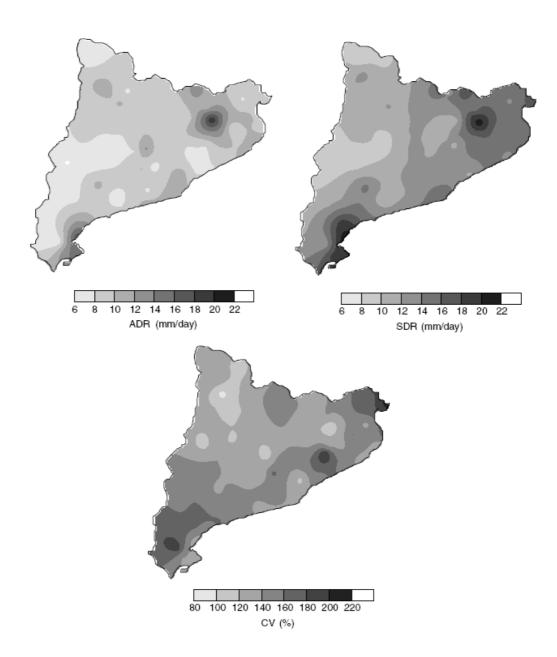


Figura 9. Precipitación media diaria (ADR, según las siglas inglesas), desviación estándar (SDR, según las siglas inglesas) y coeficientes de variación (CV) evaluados teniendo en cuenta todo el período de registro de cada pluviómetro. (Fuente: Lana et al., 2004)

3.2 Escasez y exceso de precipitación mensual según el Índice de Precipitación Estándar

Con una base de datos obtenida a partir de 99 pluviómetros con totales mensuales acumulados desde 1961 a 1990, se analizaron los comportamientos temporales y espaciales de la escasez y el exceso de precipitación (Lana et al., 2001). La distribución de las cantidades mensuales para cada pluviómetro se simuló mediante las distribuciones gamma o Poisson-gamma. Después, con una transformación equiprobable, se sustituyeron las cantidades mensuales descritas por estas distribuciones por valores dados por el Índice de Precipitación Estándar, SPI, que sigue una distribución normal estandarizada y proporciona una escala pluviométrica única (Figura 4). Luego, se aplicó el análisis de componentes principales, PCA (según las siglas inglesas), a la serie de SPIs mensuales. Teniendo en cuenta los coeficientes de ponderación, RFL (según las siglas inglesas), correlacionando los pluviómetros y componentes principales, PC (según las siglas inglesas), se consiguió una doble regionalización de 99 pluviómetros, distinguiendo entre episodios de escasez y exceso de precipitación. También se estableció una clasificación temporal de los episodios de escasez y exceso de precipitación, considerando en este caso el *Factor Score*, FS, obtenidos después de un PCA de variables basado en SPIs mensuales.

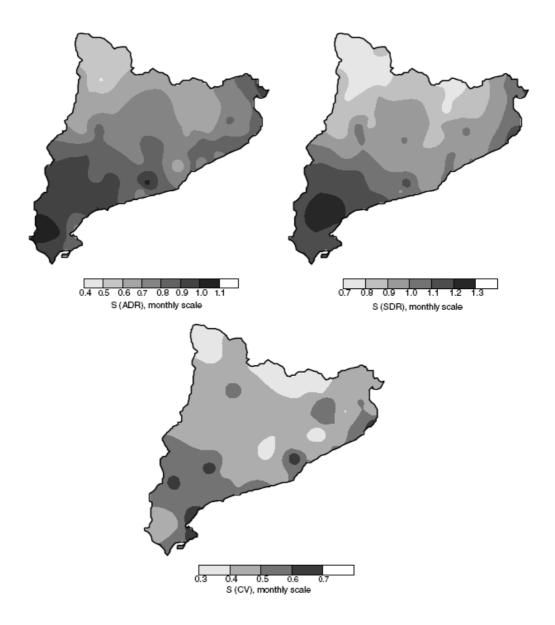


Figura 10. Distribución espacial de la irregularidad temporal para las series mensuales de ADR, SDR y CV (según las siglas inglesas). (Fuente: Lana et al., 2004)

La regionalización espacial conseguida se convirtió en una representación aproximada de los distintos territorios topográficos (Pirineos, Pre-pirineos, cuenca central, sierras Litoral y Pre-litoral y costa mediterránea), destacándose así la diversidad climática de Cataluña. La clusterización temporal sugería un comportamiento bastante complejo de los episodios de escasez y exceso de precipitación. Asimismo, la distribución espacial de estos clusters temporales era muy dispersa, de modo que la escasez y el exceso mensuales a veces afectan a toda Cataluña y a veces sólo a una pequeña área. Además de los resultados obtenidos gracias al PCA y a los algoritmos de clusterización, cabe destacar que la gravedad de los episodios aumentó notablemente sólo para

la escasez de las precipitaciones (Figura 5). Hay que añadir que un análisis del número de pluviómetros afectados por la escasez y el exceso mensuales mostró un hecho interesante: mientras que el número de pluviómetros asociados a la escasez tenía una tendencia creciente, se detectó una tendencia decreciente destacable para el exceso en el período 1961-1990 (Figura 6).

4 Precipitación diaria

4.1 Precipitación máxima diaria

La distribución espacial de la precipitación máxima diaria esperada se investigó para varios períodos de retorno



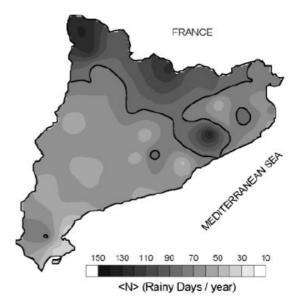
Figura 11. Distribución espacial de los 12 clusters obtenidos después de la aplicación del algoritmo de clusterización AL en los FSCs resultantes, obtenidos gracias a los PCS aplicados a 12 ADRs medios mensuales y a 12 SDRs para los 75 pluviómetros considerados. (Fuente: Lana et al., 2004)

(Lana et al., 1995). El proceso se aplicó a las cuatro estaciones del año y para todo el año asumiendo la clásica teoría de Gumbel de los extremos (distribución de Gumbel I), que se confirmó con el ajuste razonable entre extremos modelados y empíricos. El análisis indicaba una combinación de distintos factores que controlaban la distribución de cantidades extremas diarias en Cataluña, como la orografía compleja, la proximidad del Mar Mediterráneo, la importante actividad convectiva y la circulación dominante de superficie

Los registros pertenecían a 74 pluviómetros que cubrían toda la zona de estudio, con diferentes períodos de observación. Las estaciones se seleccionaron a partir de 350 pluviómetros, respetándose dos condiciones. Por un lado, sus datos estacionales y extremos no deben tener una tendencia temporal significativa. Por el otro, el número de extremos disponibles tiene que ser superior a 30. La duración de los datos observacionales resultantes va de 30 a 76 años.

La Figura 7 muestra el comportamiento de los máximos de precipitación diaria, con diferentes períodos de retorno, correspondiente al otoño (septiembre, octubre y noviembre), y la Figura 8 la ocurrencia, en porcentaje, de los extremos anuales en esta estación. La característica más significativa es el predominio de acontecimientos extremos registrados durante esta estación. Tal como podemos constatar, los mayores máximos diarios se observan en los extremos norte y sur del litoral. Recientemente, se ha obtenido un análisis más detallado (Casas et al., 2007) utilizando 145 pluviómetros, lo que ha permitido la estimación objetiva de la precipitación máxima diaria con una resolución espacial de 1 km².

Las medidas de precipitación de los distintos pluviómetros, junto a un pluviógrafo Jardí y un pluviógrafo de



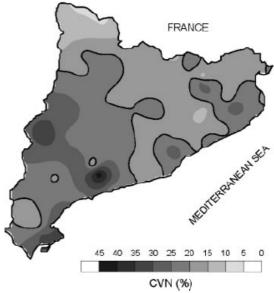


Figura 12. Distribución espacial del número medio de días de lluvia por año y de su coeficiente de variación. Las isolíneas perfiladas corresponden a 80 días de lluvia por año y un 20% de CVN. (Fuente: Burgueño et al., 2005)

sifón, instalados en el Observatorio Fabra y en distintos emplazamientos de Barcelona respectivamente, han permitido obtener las cantidades extremas reunidas para una amplia gama de duraciones, desde 1 día hasta 730 días consecutivos. Tal como esperábamos, los resultados obtenidos satisfacen una ley potencial entre la duración y las cantidades extremas reunidas, que se encuentran por debajo de los valores obtenidos para el Reino Unido (Burgueño et al., 1998).

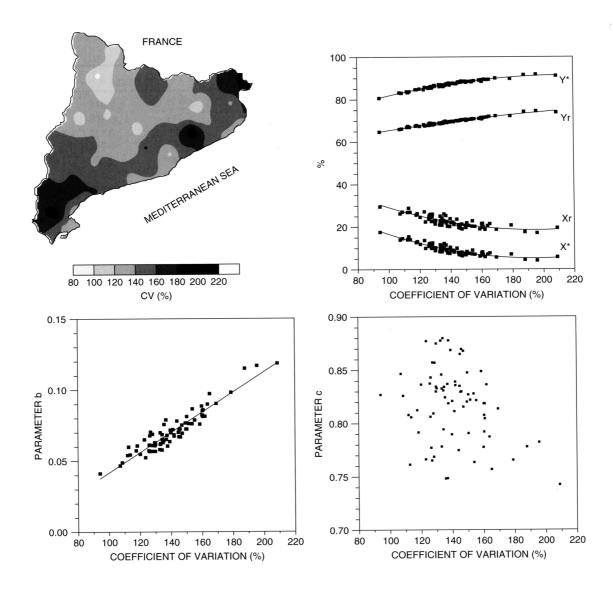


Figura 13. Dependencia de los parámetros X_r , Y_r , X^* , Y^* , b y c del CV de las cantidades de precipitación diaria. La dispersión geográfica de los CVs queda descrita en el mapa adjunto. (Fuente: Burgueño et al., 2005)

4.2 Variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones diarias

Los patrones espaciales y temporales del régimen de precipitaciones diarias de Cataluña registrados para el período 1950-2000 se analizaron desde distintos puntos de vista, incluyendo la irregularidad de las series temporales en términos de entropía, el test Mann-Kendall para las tendencias temporales, un PCA, un enlace medio, AL (según las siglas inglesas), un algoritmo de clusterización y, finalmente, un análisis del espectro de potencia, que incluía una comparación con las hipótesis de ruido blanco y de ruido rojo Markoviano, (Lana et al., 2004). Los análisis se basaban en las variables de tres meses derivadas de las cantidades registradas por días: la precipitación media diaria, ADR (según las siglas inglesas), y la desviación estándar, SDR (según

las siglas inglesas), de la precipitación diaria para cada mes, junto al correspondiente coeficiente de variación, CV. La Figura 9 muestra la distribución espacial de estos tres estadísticos cuando se aplican a todo el período de registro de cada pluviómetro. El índice de irregularidad, S:

$$S = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} \left| \log \left(\frac{X_{i+1}}{X_i} \right) \right|$$
 (1)

manifestó la variabilidad temporal de una serie temporal de N valores de X. La variabilidad espacial de S se caracterizó por valores relevantes en todos los casos y gradientes desde el norte hasta el sur y hasta la costa mediterránea (Figura 10).

La interpretación de los *factor scores* derivados del PCA y de los clusters obtenidos a partir del algoritmo AL también describieron la compleja distribución espacial del régimen de

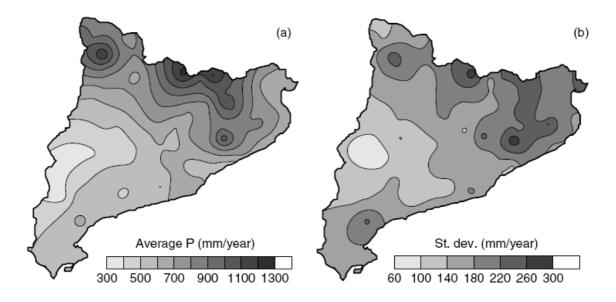


Figura 14. Distribución espacial de a) el promedio y b) la desviación estándar del índice P (mm año⁻¹). (Fuente: Martínez et al., 2007)

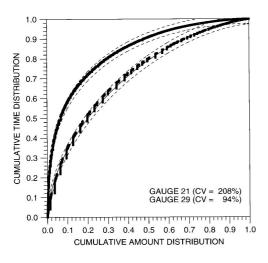


Figura 15. Dos ejemplos de las NRCs para dos pluviómetros asociados a los CVs más grandes y más pequeños de las cantidades de precipitación diarias, acompañados por las bandas de 95% de confianza del test Kolmogorov-Smirnov. (Fuente: Burgueño et al., 2005)

precipitaciones diarias, ya que los efectos de los patrones de la circulación atmosférica de los regímenes de precipitación vienen condicionados por la compleja orografía de Cataluña y su proximidad al Mar Mediterráneo. La Figura 11 muestra la distribución espacial de los distintos clusters, así como indicaciones de las dos áreas principales mediante una línea punteada. La mayor contiene sobre todo los clusters 1 y 2, mientras que el resto de clusters están repartidos cerca del litoral. Los coeficientes de ponderación asociados al



Figura 16. Los 11 clusters de pluviómetros después de la aplicación del algoritmo AL a los FSCs derivados después de aplicar el PCA a 17 variables (cuatro índices pluviométricos para los distintos percentiles e intervalos de clase). (Fuente: Martínez et al., 2007)

PCA también sugirieron una distinción entre las estaciones cálida, fría y templada. Finalmente, cabe destacar que las series mensuales iban normalmente acompañadas por ruido de fondo blanco y, en pocos casos, por comportamiento de Markov y algunas periodicidades significativas, que en general eran de menos de 10 meses y cambiaban de un clúster a otro.

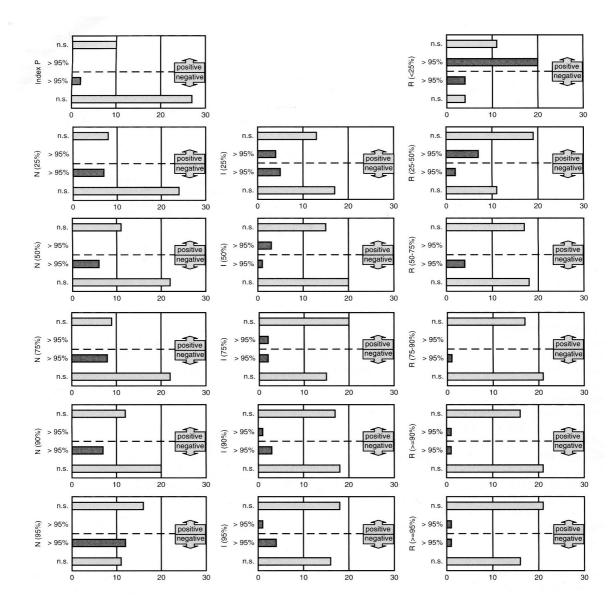


Figura 17. Histogramas del número de tendencias positivas y negativas, significativas y no significativas, para todos los índices y percentiles seleccionados. (Fuente: Martínez et al., 2007)

4.3 Distribuciones estadísticas del régimen de precipitaciones diarias

Una red relativamente densa de 75 pluviómetros proporcionó una base de datos de precipitaciones diarias desde el año 1950 hasta el año 2000, que permitió corroborar otros análisis del régimen pluviométrico de Cataluña relativos a las precipitaciones medias diarias, su desviación estándar y su coeficiente de variación (Burgueño et al., 2005). Anteriormente, se había aplicado una investigación similar y más detallada a las series de datos del Observatorio Fabra, entre los años 1917-1999 (Burgueño et al., 2004).

El número medio anual, <N>, de días de lluvia se muestra en la Figura 12, junto a su coeficiente de variación, CVN. La primera característica notable es el amplio margen obtenido para <N>, de 30 hasta 140 días de lluvia anuales, y la relativamente estrecha banda de valores de CVN, de 5 a 45%, considerablemente más baja que las derivadas para los CVs de las cantidades de precipitación diaria Lana et al. (2004). Otro hecho destacable es la clara tendencia a la reducción (aumento) en <N> (CVN) de norte a sur, con algunos gradientes sorprendentes de <N> en áreas de los Pirineos y de la Sierra Transversal, y de CVN cerca de la costa mediterránea. El número anual de días de lluvia no tenía tendencia regional significativa, aunque 23 de los 75 pluviómetros tuviesen tendencias significativas.

Las distribuciones de las cantidades diarias, X, fueron correctamente modelizadas por una distribución exponencial, mientras que las distribuciones temporales, Y, acepta-

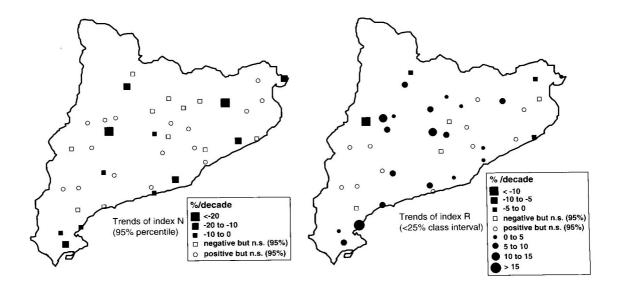


Figura 18. Tendencias temporales del índice N (percentil 95) e índice R (intervalo de clase <25%), ofrecidas en porcentajes de los valores medios por década. (Fuente: Martínez et al., 2007)

ban generalmente el modelo Weibull. Algunos pluviómetros no siguieron ninguno de los dos modelos, 25 sólo siguieron un modelo y 42 pluviómetros se ajustaron a los dos modelos. El parámetro de la distribución exponencial adoptó un gradiente relevante de este a oeste, que indicaba la influencia de la advección mediterránea en las cantidades de precipitación medias.

Las curvas de precipitación normalizadas, NRC (según las siglas inglesas), se obtuvieron expresando X en función de Y, independientemente de éxitos anteriores en la simulación de la distribución. Los parámetros X_r , Y_r , X^* , Y^* , correspondientes a las coordenadas de los puntos de NRC con pendiente igual a la unidad, y a los puntos con coordenadas (0.5, Y^*) y (X^* , 0.5), se determinaron y relacionaron con el CV de las cantidades de precipitación diaria (Figura 13). Las NRCs pueden ajustarse a la ley:

$$X = Y \exp\left[-b(1-Y)^c\right] \tag{2}$$

así como una distribución beta. La serie de NRCs deducida corresponde a coeficientes de variación de cantidades diarias que oscilan entre 94 y 208% (Figura 15). Los parámetros del ajuste empírico y de la distribución beta se mantuvieron dependientes del coeficiente de variación de las cantidades de precipitación diarias, y las NRCs obtenidos no difirieron notablemente, por ejemplo, respecto a los pluviómetros emplazados en la India, en la estación del monzón.

Una minuciosa revisión de las coordenadas $(1-X_r, 1-Y_r)$, derivadas de las NRCs, puso de manifiesto que una fracción muy grande de cantidades de precipitación se explica por un número bastante bajo de episodios diarios con totales notables que excedían las precipitaciones diarias medias. De este modo, el carácter

desigual del régimen pluviométrico diario de Cataluña quedó claramente demostrado.

4.4 Régimen de precipitaciones diarias derivado a partir de cuatro índices de precipitación

Para analizar con profundidad la descripción del complejo comportamiento del régimen de precipitaciones diarias en Cataluña se utilizaron las cantidades de precipitaciones anuales, P, el número de días de lluvia por año, N, la intensidad media diaria en un año, I, y la relevancia, R, de la contribución de un intervalo de clase de precipitación a la cantidad anual como índices pluviométricos (Martínez et al., 2007). Estos mismos índices de precipitación habían sido aplicados anteriormente a las series de datos del Observatorio Fabra (1917-1999) a escala estacional y anual (Lana et al., 2003), mientras que también se habían estudiado sus periodicidades e irregularidades (Lana et al., 2005).

Para llevar a cabo este análisis, se tuvieron en cuenta las cantidades diarias de precipitación de 75 pluviómetros para el período 1950-2000. Se analizaron los índices N e I distinguiendo cinco percentiles (el 25, el 50, el 75, el 90 y el 95) de las cantidades de precipitación diarias. Se evaluó el índice R teniendo en cuenta los intervalos de clase <25%, 25 - 50%, 50 - 75%, 75 - 90%, $\ge 90\%$ y $\ge 95\%$. Todos estos índices fueron descritos por sus valores anuales medios, sus desviaciones estándar (ver Figura 14 como ejemplo) y las irregularidades temporales consecutivas (Ecuación 1). A parte de la compleja orografía de la región, en la diversidad de los patrones espaciales de los índices se detectaron los efectos de la influencia del régimen mediterráneo y de la lejanía a la costa atlántica. La influencia del régimen atlántico también se detectó en algunos lugares de los Piri-

neos, especialmente en aquellos que estaban orientados hacia el norte. Todas estas características se describieron a través de un PCA, que se aplicó a los valores medios anuales de los índices pluviométricos y al proceso de clusterización posterior (Figura 16). Además, las tendencias temporales de los índices anuales se analizaron para una serie seleccionada de 39 pluviómetros con una continuidad de registro óptima. Las tendencias se derivaron de la regresión linear y se establecieron las significaciones estadísticas locales a un nivel de confianza del 95% utilizando el test Mann-Kendall. Se investigaron las tendencias regionales significativas mediante simulaciones de Monte Carlo (Figura 17). Cabe señalar que se detectaron tendencias regionales significativas en el número de días de lluvia para percentiles de hasta 75, resultando negativas todas las tendencias locales. Las tendencias regionales significativas fueron también detectadas en la intensidad diaria, para cualquier nivel umbral, con tendencias locales positivas y negativas. El índice de relevancia R presentó tendencias regionales significativas para los tres primeros intervalos de clase, con predominio de las tendencias locales positivas en los dos primeros, indicando así una contribución creciente de episodios diarios débiles y moderados a las cantidades anuales (Figura 18).

5 Conclusiones

Varios estudios ponen de manifiesto el complejo comportamiento de las precipitaciones diarias en Cataluña, resultado de la orografía, los patrones de circulación atmosférica y la proximidad del Mar Mediterráneo. Tal como hemos mencionado en la Sección 2, las cantidades de precipitación dependen fuertemente de la ciclogénesis mediterránea en primavera y, especialmente, en otoño, y de los fenómenos convectivos en verano. Los pasos frontales desde el Atlántico no son tan importantes, excepto para la cara norte de los Pirineos. Por consiguiente, las anomalías en estos patrones de circulación podrían implicar cambios relevantes en las cantidades de precipitación.

Las cantidades mensuales registradas en siete emplazamientos de la costa mediterránea occidental y de la cercana costa atlántica se han descrito con éxito con las distribuciones gamma y Poisson gamma, mientras que las cantidades anuales precisan tanto las distribuciones gamma como las log-normal. Para Cataluña estrictamente, las cantidades mensuales han sido sustituidas por valores del SPI, que siguen una distribución normal estandarizada, y el comportamiento espacial de los episodios de escasez y exceso han sido descritos a través del PCA y los algoritmos de clusterización. Como resultado colateral, el número de pluviómetros afectados por una escasez mensual muestra una tendencia positiva en el período de medida.

La precipitación máxima diaria ha sido analizada con la distribución Gumbel I. El otoño es la estación del año con mayor porcentaje de extremos anuales, alcanzando el 50% en los extremos norte y sur de la costa catalana. Los ADR y SDR mensuales han sido sometidos a los procedimientos PCA y al posterior AL. La clusterización resultante permite diferenciar la costa mediterránea y la Cataluña nororiental

del resto de la región. Cuando se tienen en cuenta todos los pluviómetros, las tendencias regionales significativas para los ADR, SDR y CV mensuales tienen que descartarse. Se obtiene un resultado similar para el número anual de días de lluvia. La cantidad empírica y las distribuciones temporales de las cantidades diarias se han simulado a través de las distribuciones exponenciales y de Weibull, estando ambas funcionalmente relacionadas. En general, el régimen pluviométrico atribuye una fracción muy grande de cantidades de precipitación a un número bastante bajo de episodios diarios, tal como es característico del clima mediterráneo. El análisis de tendencia se ha extendido a cuatro índices, llamados P, N, I y R, del proceso de precipitación. Cabe mencionar que todas las tendencias locales significativas derivadas para el número anual de días de lluvia son negativas, sea cual sea el percentil. Esta característica es especialmente notable cuando se tiene en cuenta el número de días muy húmedos (percentil 95), ya que su contribución a las cantidades anuales es muy relevante. Estas tendencias locales negativas, la mayoría distribuidas por toda la región, son una clara influencia mediterránea. Por lo tanto, el número decreciente de abundantes episodios diarios en áreas de influencia mediterránea debería ser un cambio perceptible en el régimen pluviométrico.

Agradecimientos. Los autores agradecen a la Agencia Estatal de Meteorología, antes Instituto Nacional de Meteorología, y al Observatorio Fabra (*Reial Academia de Ciències i Arts*, Barcelona) su cuidadosa aportación de series de datos pluviométricos. También damos las gracias a la ACAM por el Premio Fontserè 2007 relacionado con esta línea de trabajo.

Referencias

Albentosa, L. M., 1980: Bibliografía de Climatología y Meteorología de Cataluña, Rev Geogr, XIV, 127–158.

Alpert, P., Ben-Gai, T., Baharad, A., Benjamini, Y., Yekutieli, D., Colacino, M., Diodato, L., Ramis, C., Homar, V., Romero, R., Michaelides, S., y Manes, A., 2002: The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values, Geophys Res Lett, 29, DOI: 10.1029/2001GL013 554.

Barry, R. G. y Chorley, R. J., 2003: Atmosphere, Weather and Climate, Eighth Ed., Routledge, London, pp. 421.

Burgueño, A., Fernández Mills, G., y Lana, X., 1998: *Precipitacions extremes absolutes a Catalunya*, Tethys, 1, 11–16.

Burgueño, A., Serra, C., y Lana, X., 2004: Monthly and annual statistical distribution of daily rainfall at the Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) for the years 1917-1999, Theor Appl Climatol, 77, 57–75.

Burgueño, A., Martínez, M. D., Lana, X., y Serra, C., 2005: Statistical distributions of the daily rainfall regime in Catalonia (Northeastern Spain) for the years 1950-2000, Int J Climatol, 25, 1381– 1403.

Burgueño, J., 1991: Caracterització bàsica de la irregularitat de les precipitacions a Catalunya, Notes Geogr Fis, 20-21, 25-32.

Casas, M. C., Herrero, M., Ninyerola, M., Pons, X., Rodríguez, R., Rius, A., y no, A. R., 2007: *Analysis and objective mapping of extreme daily rainfall in Catalonia*, Int J Climatol, **27**, 399–409.

Clavero, P., Martín-Vide, J., y Raso, J. M., 1996: Atlas Climàtic de Catalunya, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 42 pp.

- Codina, B., Aran, M., Young, S., y Redaño, A., 1997: Prediction of a mesoscale convective system over Catalonia (Northeastern Spain) with a nested numerical model, Meteorol Atmos Phys, 62, 9–22.
- Febrer, J., 1930: Atlas pluviomètric de Catalunya, Memòries Patxot, Barcelona, vol. I, 523 pp.
- Fernández-Mills, G., Lana, X., y Serra, C., 1994: Catalonian precipitation patterns: principal component analysis and automated regionalization, Theor Appl Climatol, 49, 201–212.
- Gallego, M. C., García, J. A., Vaquero, J. M., y Mateos, V. L., 2006: Changes in frequency and intensity of daily precipitation over the Iberian Peninsula, J Geophys Res, 111, DOI: 10.1029/2006JD007 280.
- Geng, Q. y Sugi, M., 2003: Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulphate aerosols. Study with a a high-resolution AGCM, J Climate, 16, 2262–2274.
- Ghan, S. J. y Shippert, T., 2006: Physically based global downscaling: climate change projections for a full century, J Climate, 19, 1589–1604.
- Gibelin, A. y Déqué, M., 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global resolution model, Clim Dyn, 20, 327–339.
- Goodess, C. M. y Jones, P. D., 2002: Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall, Int J Climatol, 22, 1593–1615.
- Guilló, A. M. y Puigcerver, M., 1970: Sobre las contribuciones relativas de las precipitaciones local y generalizada a la precipitación total en Cataluña, Revista Geofísica, XXIX, 205–216.
- Jansà, A., Genovés, A., Picornell, M. A., Campins, J., Riosalido, R., y Carretero, O., 2001: Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach, Meteorol Appl, 8, 43– 56.
- Kiktev, D., Sexton, D. M. H., Alexander, L., y Folland, C. K., 2003: Comparison of modelled and observed trends in indices of daily climate extremes, J Climate, 16, 3560–3571.
- Knippertz, P., Ulbrich, U., y Speth, P., 2000: Changing cyclones and surface winds speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment, Clim Res, 15, 109–122.
- Kundzewicz, Z. W., Radziejewski, M., y Pinskwar, I., 2006: Precipitation extremes in the changing climate of Europe, Clim Res, 31, 51–58.
- Kyselý, J., 2007: Implications of enhanced persistence of atmospheric circulation for the occurrence and severity of temperature extremes, Int J Climatol, 27, 689–695.
- Kyselý, J. y Domonkos, P., 2006: Recent increase in persistence of atmospheric circulation over Europe: comparison with long-term variations since 1881, Int J Climatol, 26, 461–483.
- Lana, X. y Burgueño, A., 1998: Daily dry-wet behaviour in Catalonia (NE Spain) from the viewpoint of Markov chains, Int J Climatol, 18, 793–815.
- Lana, X. y Burgueño, A., 2000a: Some statistical characteristics of monthly and annual pluviometric irregularity for the Spanish Mediterranean Coast, Theor Appl Climatol, 65, 79–97.
- Lana, X. y Burgueño, A., 2000b: Statistical distributions and spectral analysis of rainfall anomalies for Barcelona (NE Spain), Theor Appl Climatol, 66, 211–227.
- Lana, X., Fernández Mills, G., y Burgueño, A., 1995: Daily precipitation maxima in Catalonia (North-East Spain): Expected values and their spatial distribution, Int J Climatol, 15, 341–354.
- Lana, X., Serra, C., y Burgueño, A., 2001: Patterns of monthly

- rainfall shortage and excess in terms of the standardized precipitation index for Catalonia (NE Spain), Int J Climatol, 21, 1669–1691.
- Lana, X., Serra, C., y Burgueño, A., 2003: Trends affecting pluviometric indices at the Fabra Observatory (Barcelona, NE Spain) from 1917 to 1999, Int J Climatol, 23, 315–332.
- Lana, X., Martínez, M. D., Serra, C., y Burgueño, A., 2004: Spatial and temporal variability of the daily rainfall regime in Catalonia (Norteastern Spain), 1950-2000, Int J Climatol, 24, 613–641.
- Lana, X., Martínez, M. D., Serra, C., y Burgueño, A., 2005: Periodicities and irregularities of indices describing the daily pluviometric regime of the Fabra Observatory (NE Spain) for the years 1917-1999, Theor Appl Climatol, 82, 183–198.
- Lionello, G. N., Dalan, F., y Elvini, E., 2002: Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO₂ climate scenarios, Clim Res, 22, 147–159.
- Llasat, M. C., 2001: An objective classification of rainfall events on the basis of their convective features: application to rainfall intensity in the Northeast of Spain, Int J Climatol, 21, 1385–1400.
- Llasat, M. C. y Puigcerver, M., 1992: Pluies extrêmes en Catalogne, Hydrologie Continentale, 7, 99–115.
- Llasat, M. C. y Puigcerver, M., 1994: Meteorological factors associated with floods in North-Eastern part of the Iberian Peninsula, Nat Hazards, 9, 81–93.
- Llasat, M. C. y Puigcerver, M., 1997: *Total rainfall and convective rainfall in Catalonia, Spain*, Int J Climatol, **17**, 1683–1695.
- Llasat, M. C. y Rodríguez, R., 1992: Extreme rainfall events in Catalonia. The case of 12 November 1988, Nat Hazards, 5, 133–151
- Llasat, M. C., Ramis, C., y Barrantes, J., 1996: The meteorology of high-intensity rainfall events over the West Mediterranean region, Remote Sensing Reviews, 14, 51–90.
- Martín-Vide, J., 1984: Análisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica, Revista Geofísica, 40, 101–106.
- Martín-Vide, J. y López-Bustins, J. A., 2006: *The western Mediter-ranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula*, Int J Climatol, **26**, 1455–1475.
- Martínez, M. D., Lana, X., Burgueño, A., y Serra, C., 2007: Spatial and temporal daily rainfall regime in Catalonia (NE Spain) derived from four precipitation indices, years 1950-2000, Int J Climatol, 27, 123–138.
- McCabe, G. J., Clark, M. P., y Serreze, M. C., 2001: Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity, J Climate, 14, 2763–2768.
- Pinto, J. G., Ulbrich, U., Leckebusch, G. C., Spangehl, T., Reyers, M., y Zacharias, S., 2007: Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM, Clim Dyn, 29, 195–210.
- Puigcerver, M. y Guilló, A. M., 1971: Contribución al estudio de la precipitación organizada en Cataluña, Revista Geofísica, XXXI, 117–142.
- Räisänen, J., Hansson, U., Ullerstig, A., Doscher, R., Graham, L. P., Jones, C., Meier, H. E. M., P., P. S., y Willén, U., 2004: European climate in the late twenty-first century: regional simulations with two driving global models and two forcing scenarios, Clim Dyn, 22, 13–31.
- Ramis, C., Llasat, M. C., Genovés, A., y Jansà, A., 1994: *The October-1987 flood in Catalonia: synoptic and mesoscale mechanisns*, Met Apps, 1, 337–350.
- Rodrigo, F. S. y Trigo, R. M., 2007: Trends in daily rainfall in the

- Iberian Peninsula from 1951 to 2002, Int J Climatol, 27, 513–529.
- Sánchez, E., Gallardo, C., Gaertner, M. A., Arribas, A., y Castro, M., 2004: Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: a first approach, Global and Planetary Change, 44, 163–180.
- Serra, C., Fernández-Mills, G., Periago, M. C., y Lana, X., 1998: *Surface synoptic circulation and daily precipitation in Catalonia*, Theor Appl Climatol, **59**, 29–49.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., y Bigg, G. R., 2000: Decline in Mediterranean rainfall caused by weakening of Mediterranean cyclones, Geophys Res Lett, 27, 2913–2916.
- Ulbrich, U. y Christoph, M., 1999: A shift of the NAO and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing, Clim Dyn, 15, 551–559.
- Voss, R., May, W., y Roeckner, E., 2002: Enhanced resolution modelling study on anthropogenic climate change: changes in extremes of the hydrological cycle, Int J Climatol, 22, 755–777.
- Zhang, X., Walsh, J. E., Zhang, J., U.S., U. S. B., y Ikeda, M., 2004: Climatology and Interannual variability of Arctic Cyclone Activity: 1948-2002, J Climate, 17, 2300–2317.
- Zhang, X., Zwiers, F. W., Hegerl, G. C., Lambert, F. H., Gillet, N. P., Solomon, S., Stott, P. A., y Nozawa, T., 2007: *Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends*, Nature, 448, 461–468.