



# Una revisió de les analisis estadístiques de les precipitacions diàries i mensuals a Catalunya

X. Lana<sup>1</sup>, A. Burgueño<sup>2</sup>, M. D. Martínez<sup>3</sup> i C. Serra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departament Física i Enginyeria Nuclear, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal 647, 08028 Barcelona

<sup>2</sup>Departament d'Astronomia i Meteorologia, Departament de Física, Universitat de Barcelona, C. Martí i Franquès 1, 08028  
Barcelona

<sup>3</sup>Departament de Física Aplicada, Universitat Politècnica de Catalunya, Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona

Rebut: 14-VII-2008 – Acceptat: 15-XII-2008 – Versió Traduïda

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

## Resum

En aquest treball, presentem una revisió dels estudis dels últims anys sobre les precipitacions diàries i mensuals a Catalunya. L'anàlisi de les precipitacions mensuals es realitza al llarg de la costa oest del Mediterrani i a Catalunya, tot quantificant aspectes com els de la irregularitat de les quantitats mensuals i la distribució espacial de l'Índex de Precipitació Estàndard. Apliquem diverses estadístiques a les sèries de precipitacions diàries com el seu valor extrem i les distribucions espacials intraanuals, la variabilitat de la quantitat de precipitació mitjana i la seva desviació estàndard per a cada mes, la seva distribució per quantitat i temps, i les tendències temporals que afecten quatre índexs pluviomètrics per a diferents percentils i intervals de classe. Totes aquestes diferents analisis constitueixen la continuïtat de l'estudi científic de les precipitacions a Catalunya, que va començar fa aproximadament un segle.

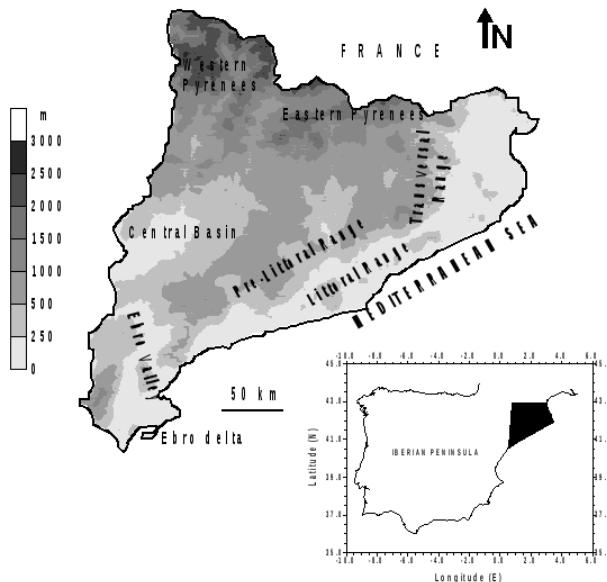
**Paraules clau:** precipitació mensual i diària, distribucions espacials i temporals, índexs pluviomètrics, tendències temporals, Catalunya

## 1 Introducció

Els resultats de la primera xarxa de precipitacions mensuals a Catalunya van ser compilats per Febrer (1930), amb mesures de diferents duracions a partir de 314 pluviòmetres que cobrien el període de 1861 a 1925. Els resultats incloïen els primers mapes de precipitacions mitjanes mensuals. Podem trobar una llista completa de les contribucions preliminars a Albertosa (1980). Amb un objectiu semblant, Clavero et al. (1996) van publicar una distribució espacial més detallada de les precipitacions mitjanes mensuals a partir de prop de 300 pluviòmetres, amb almenys 20 anys de registres des de 1940 fins a 1980. Tenint present la descripció estadística i aprofitant les dades disponibles, els autors d'aquest treball han analitzat les propietats espacials particulars de les quantitats de precipitació mensuals i diàries a Catalunya, en un segle en el qual s'ha demostrat recentment la detecció de la influència de l'home en les tendències de precipitació a la Terra (Zhang et al., 2007). Les recerques anteriors en aquest terreny cobreixen diversos àmbits com la contribució de la precipitació convectiva a les quantitats

anuals (Guilló i Puigcerver, 1970; Puigcerver i Guilló, 1971; Llasat i Puigcerver, 1997; Llasat, 2001), l'anàlisi dinàmica i estadística de les inundacions (Llasat i Puigcerver, 1992, 1994; Llasat i Rodríguez, 1992; Ramis et al., 1994; Llasat et al., 1996), la predicció d'un sistema mesoescalar convectiu per un model numèric niuat (Codina et al., 1997), les analisis climatològiques de les sèries temporals sec-humit (Martín-Vide, 1984; Burgueño, 1991) la regionalització de les precipitacions a través de l'Anàlisi de Components Principals (Fernández-Mills et al., 1994; Serra et al., 1998), i la distribució Gumbel de les quantitats de precipitació extrema (Casas et al., 2007).

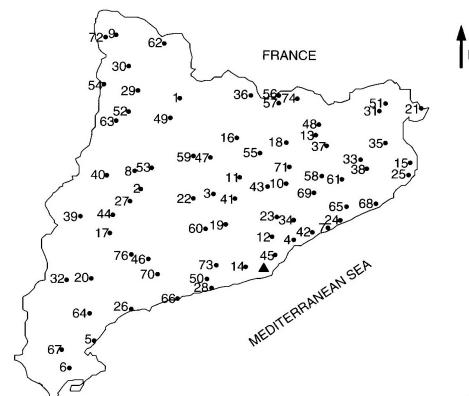
Segons Kiktev et al. (2003), per a les latituds mitjanes ( $30^{\circ}$  -  $60^{\circ}$ N) i el període 1950-1995, la major part d'Europa i Àsia Oriental es caracteritzen per una tendència positiva en el màxim anual de dies consecutius amb una precipitació diària per sota de 1.0 mm, amb una tendència negativa en el nombre de dies de pluja. Aquest comportament general es fa més rellevant per a l'àrea mediterrània, on s'ha observat un augment de les precipitacions extremes diàries durant 1951-1995, malgrat una disminució de les



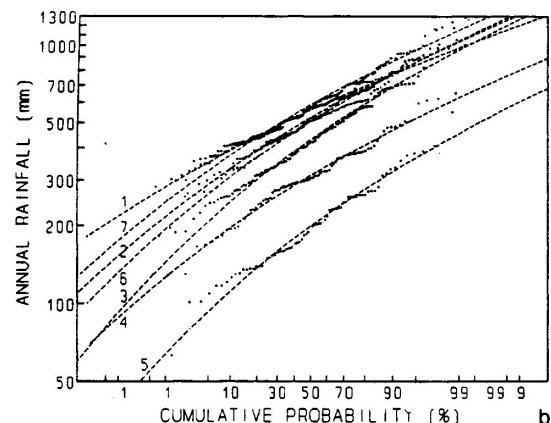
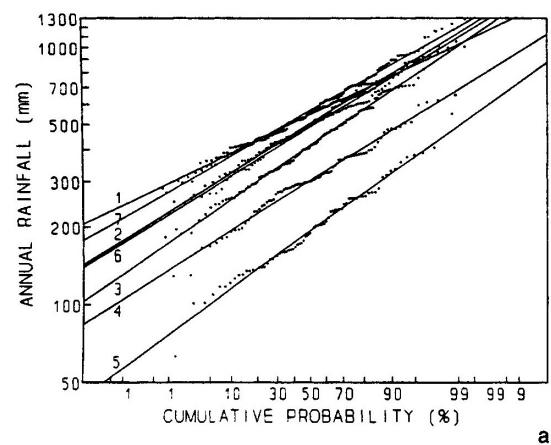
**Figura 1.** Principals característiques orogràfiques de Catalunya i el seu emplaçament a la Península Ibèrica.

quantitats totals (Trigo et al., 2000; Alpert et al., 2002). Així, a l'àrea mediterrània, la perspectiva és d'una major freqüència d'èpoques de sequera, amb impactes associats a l'agricultura, a l'explotació dels recursos de l'aigua i també a activitats socio-econòmiques. A la Península Ibèrica, les analisis de les diferents tendències de la precipitació diària indiquen un augment d'episodis de precipitacions dèbils en detriment d'una disminució d'episodis de precipitació més intensa (Goodess i Jones, 2002; Gallego et al., 2006; Rodrigo i Trigo, 2007). Diferents models climàtics regionals, així com models globals que tenen en consideració els diferents escenaris d'emissió de gasos hivernacle aplicats a la regió mediterrània, indiquen un allargament dels períodes llargs de sequera, a causa de la reducció de la quantitat de precipitació durant el s. XXI (Ghan i Shippert, 2006), en especial a l'estiu (Voss et al., 2002; Gibelin i Déqué, 2003; Räisänen et al., 2004; Sánchez et al., 2004; Kundzewicz et al., 2006).

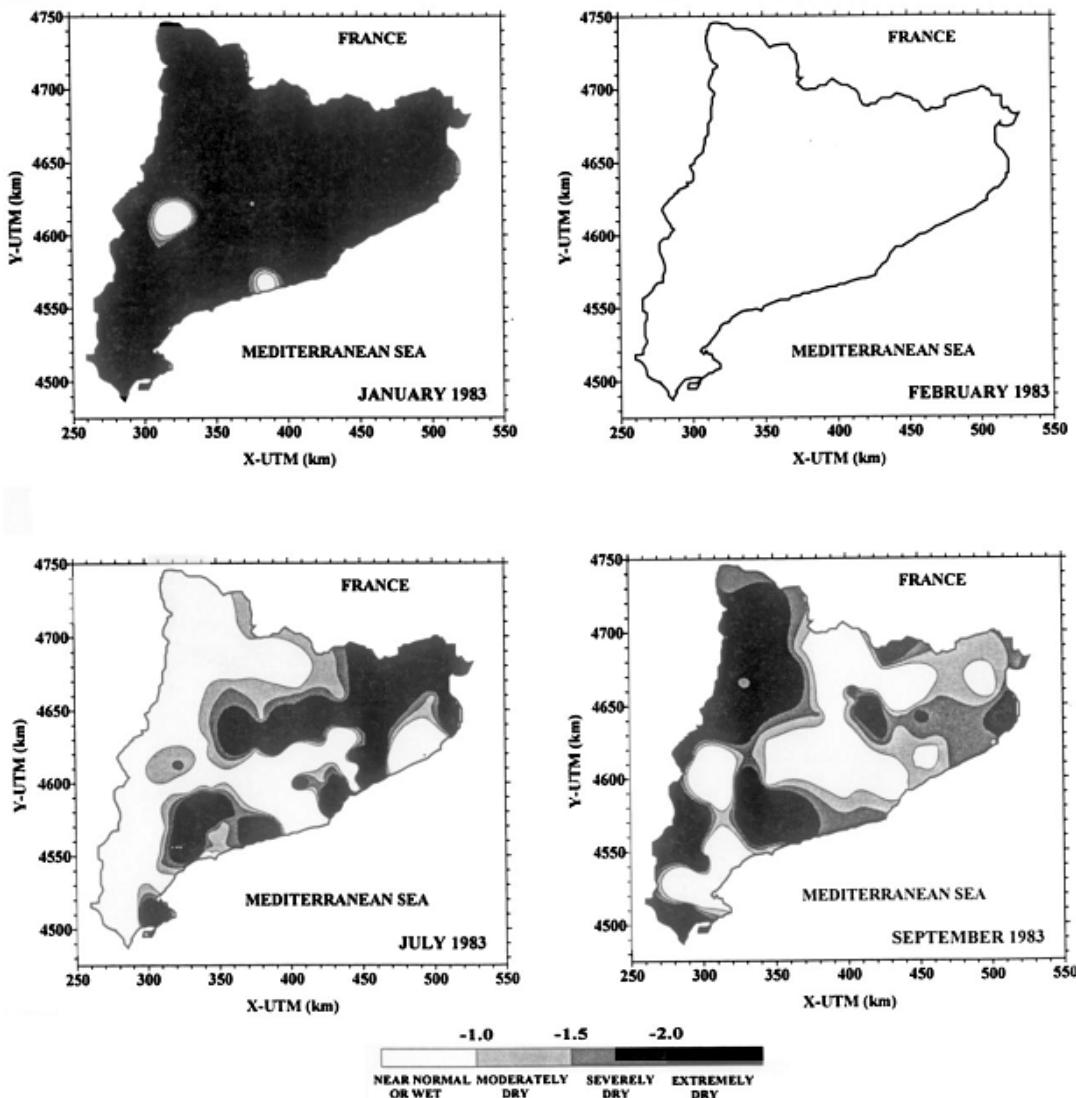
Aquests canvis observats en la distribució espacial i temporal de les precipitacions estan connectats als efectes dinàmics de l'augment de gasos hivernacle i d'aerosols de sulfat a l'atmosfera. Així, a l'activitat ciclònica extratropical, Geng i Sugi (2003) van deduir que la densitat ciclònica total disminuirà considerablement als volts de l'any 2050 a les latituds mitjanes de l'hemisferi nord durant les èpoques de desembre-gener-febrer (DGF) i juny-juliol-agost (JJA). A més, mentre es preveu una reducció dels ciclons de força feble i mitjana, la densitat dels ciclons forts augmentarà en més d'un 20% a JJA. Aquests canvis estan lligats a la disminució de la baroclinicitat a la baixa troposfera, causada principalment per una disminució del gradient de temperatura meridional. Estudis previs de Knippertz et al. (2000) sobre els ciclons a l'Atlàntic Nord també indicaven una re-



**Figura 2.** Distribució espacial dels 75 pluviòmetres que pertanyen a l'Agència Estatal de Meteorologia, incloent l'Observatori Fabra, representat per un triangle sólid.



**Figura 3.** Distribucions acumulades de les precipitacions anuals observades, en comparació amb a) la distribució log-normal, i b) la distribució gamma. Els números 1 a 7 corresponen als pluviòmetres ordenats amb latitud decreixent. (Font: Lana i Burgueño, 2000a)

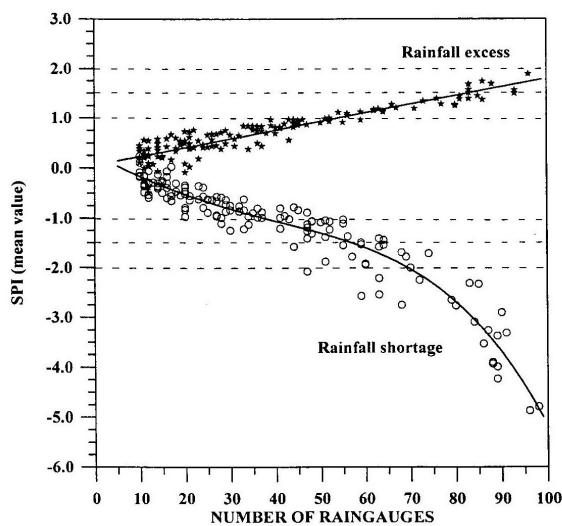


**Figura 4.** Distribució espacial dels Índexs de Precipitació Estandarditzats mensuals (SPI, segons les sigles angleses) per a gener, febrer, juliol i setembre de 1983. Les àrees blanques corresponen a zones amb pluviòmetres que assoleixen SPIs anuals més grans que -1.0. (Font: Lana et al., 2001)

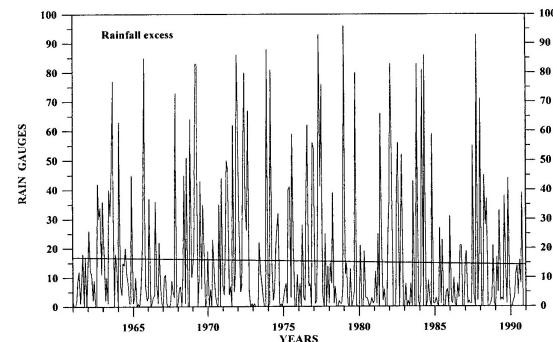
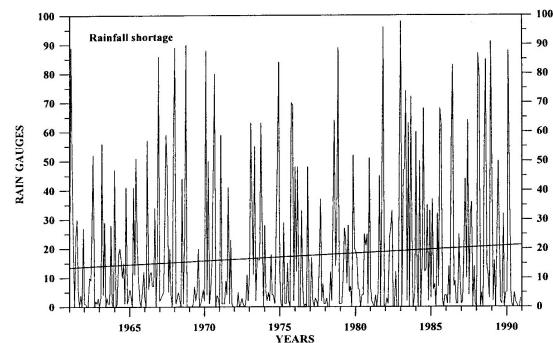
ducció del nombre de ciclons totals i un augment dels ciclons forts, amb un canvi de trajectòria cap als pols i cap a l'est. Aquest canvi de trajectòria de les tempestes també es troba en altres autors (Ulbrich i Christoph, 1999; Pinto et al., 2007). Aquest comportament concorda amb l'activitat ciclònica àrtica de 1948-2002 ( $60^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ N), que mostra que el nombre i intensitat dels ciclons que penetren a l'Àrtic des de latituds mitjanes han augmentat, cosa que suggereix un canvi de les trajectòries de les tempestes cap a l'interior de l'Àrtic, especialment a l'estiu (McCabe et al., 2001; Zhang et al., 2004). La conca mediterrània també podria patir una reducció de l'activitat ciclònica global i un augment de ciclons profunds en un escenari climàtic amb el doble de  $\text{CO}_2$  (Lionello et al., 2002). Com a conseqüència secundària, el canvi observat cap al nord de la trajectòria de les tempestes

confirma unes condicions de circulació més estables a Europa, que es manifesten en una persistència més elevada de la circulació atmosfèrica a les darreres dècades, amb el conseqüent agreujament dels impactes en la incidència i gravetat dels extrems de temperatura (Kyselý i Domonkos, 2006; Kyselý, 2007).

Amb aquestes condicions de precipitació tan canviants, les estadístiques a escala regional són de gran valor, ja que aquestes poden proporcionar una anàlisi objectiva que ajudarà a comprovar futurs escenaris de precipitació. Els continguts d'aquesta revisió cobreixen les estadístiques de les quantitats de precipitació mensuals i diàries a Catalunya desenvolupades pels autors al llarg dels darrers 14 anys, parant una atenció especial a la distribució espacial, a les distribucions estadístiques i a les tendències temporals.



**Figura 5.** Evolució del SPI espacial mitjà en relació amb el nombre de pluviòmetres en els que es presenta escassetat o excés de precipitació. Els cercles i les estrelles representen valors empírics i les línies sòlides el millor ajustament mitjançant una línia recta i un polinomi, respectivament. (Font: Lana et al., 2001)



**Figura 6.** Evolució del nombre de pluviòmetres detectats cada mes amb SPIs menors de -1.0 (escassetat de precipitació) i majors de 1.0 (excés de precipitació). Les línies rectes representen les tendències lineals al llarg d'un període de registre de 30 anys. (Font: Lana et al., 2001)

## 2 Àrea d'estudi, bases de dades i clima regional

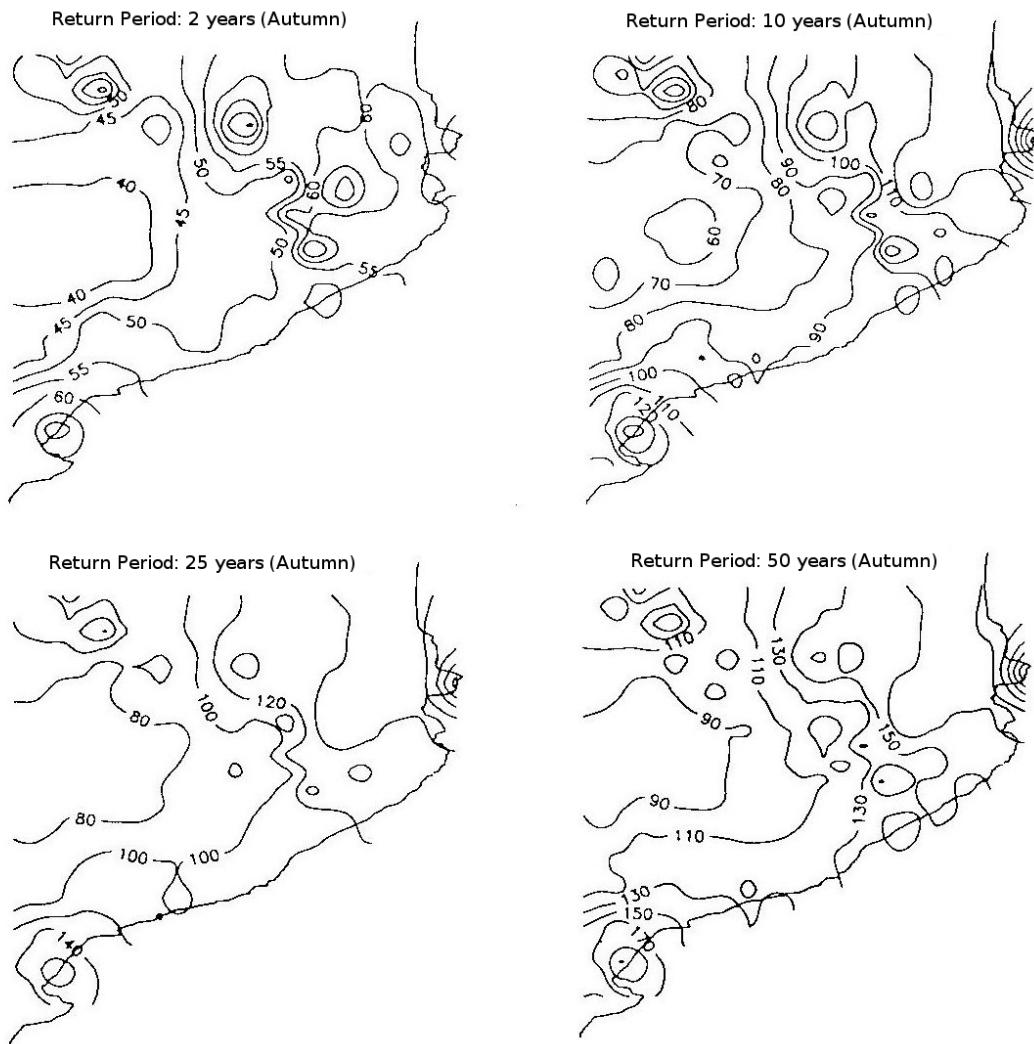
### 2.1 Àrea d'estudi

Catalunya té una superfície de 32.000 km<sup>2</sup> i se situa al NE de la Península Ibèrica, amb gairebé 400 km de costa mediterrània (Figura 1). Com a principals característiques orogràfiques, esmentar els Pirineus i els Pre-pirineus, que mitiguen els efectes de les adveccions del nord a la resta de la regió; les serralades Litoral i Pre-litoral, que protegeixen la conca central de les adveccions orientals i, a la vega, n'amplien llurs efectes als territoris Litoral i Pre-litoral; i la conca central, subjecta als efectes de passos frontals i adveccions occidentals, mitigades per la Ilunyania de la costa atlàntica. En els Pirineus, s'ha de distingir entre el règim dels Pirineus orientals, fortament influït per la proximitat del Mar Mediterrani, i la cara nord dels Pirineus occidentals, amb clars signes d'influència atlàntica.

El règim mediterrani està governat principalment per la influència dels vents de l'oest a l'hivern i l'anticicló subtropical a l'estiu. La proximitat del mar i de terres de relleu alt produeix una gran varietat regional de temps i climes. Al Mediterrani occidental, una gran majoria de depressions s'originen a la mateixa regió. Es tracta de les depressions de tipus saharià i genovès (Barry i Chorley, 2003; Jansà et al., 2001). A diferència del centre i la costa sud-oest de la Península Ibèrica, amb precipitacions hivernals principalment justificades per l'Oscil·lació de l'Atlàntic Nord, la Península Ibèrica oriental manté una correlació negativa amb l'Oscil·lació del Mediterrani occidental (Martín-Vide i López-Bustins, 2006).

### 2.2 Bases de dades

Les precipitacions mensuals al llarg de les costes espanyoles del Mediterrani i de l'Atlàntic proper, així com les quantitats de precipitació mensuals i diàries registrades a Catalunya es van obtenir gràcies a l'Agència Estatal de Meteorologia, l'antic *Instituto Nacional de Meteorología*. La durada i la grandària de les bases de dades han canviat al llarg dels anys a causa dels diferents tipus d'estudis realitzats. Mentre a Lana i Burgueño (2000a) la durada mitjana de dades de set pluviòmetres anava més enllà d'un segle, a Lana i Burgueño (1998) les dades s'obtenien a partir de 74 pluviòmetres, amb durades que anaven de 30 a 76 anys; a Lana et al. (2001), a partir de 99 pluviòmetres per als anys 1961 a 1990; i a Burgueño et al. (2005), a partir de 75 pluviòmetres que cobrien el període 1950-2000 (Figura 2). Per a aquesta darrera base de dades, Lana et al. (2004) i Burgueño et al. (2005) han analitzat, quantificat i discutit l'homogeneïtat de cada registre de pluviòmetre i una certa manca de dades d'alguns pluviòmetres. Les dades que manquen a alguns pluviòmetres arriben a períodes de 10 anys, normalment distribuïts en períodes propers a 1 any, més que no pas en buits curts. Les dades diàries que manquen es podien haver estimat amb mètodes i dades estadístiques corresponents als pluviòmetres contigus. Tanmateix, la forta



**Figura 7.** Distribució espacial de la precipitació màxima diària (mm), corresponent a la tardor, per a períodes de retorn de 2, 10, 25 i 50 anys. (Font: Lana et al., 1995)

variabilitat espacial del règim pluviomètric diari a Catalunya (Lana et al., 2004) aconsella no substituir les dades absents. Malgrat el baix nombre de sèries de dades als Pirineus occidentals, la continuïtat dels registres dels pluviòmetres restants és bona.

### 2.3 Clima regional

La proximitat d'un mar calent i la llunyania de l'Oceà Atlàntic, juntament amb una orografia complexa produeixen un escenari especial per a la distribució espacial de les quantitats de precipitació, en la qual les adveccions de l'est i del sud són les que hi contribueixen d'una manera més important a la primavera i sobretot a la tardor. Afecten sobretot les regions litorals i pre-litorals, però de vegades s'estenen més cap a l'interior.

L'efecte Föhn a la Península Ibèrica sota les adveccions de l'oest i als Pirineus sota les circulacions del nord i del nord-oest explicarien les precipitacions nul·les o escasses sota aquestes situacions sinòptiques a algunes zones de Catalunya, excepte per a la cara nord dels Pirineus Occidentals. D'altra banda, quan un nucli de baixa pressió travessa Catalunya, les quantitats de precipitació són rellevants. A més, de vegades aquests sistemes es reactiven quan arriben al Mar Mediterrani i poden generar adveccions orientals.

Llargs períodes de sequera normalment tenen lloc a les estacions càlides i fredes a causa de la persistència de l'anticicló que sovint afecta tota la regió. Al llarg de les estacions càlides, l'entrada d'aire humit del Mediterrani juntament amb masses d'aire fred a les capes altes de la troposfera poden interrompre les secheres de l'estiu a serralades com els Pirineus i els Pre-pirineus amb fenòmens convectius.

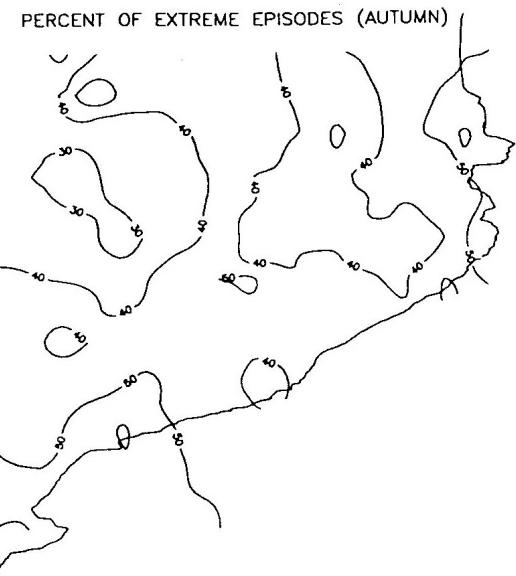
**Taula 1.** Llista dels pluviòmetres de la Mediterrània i l'Atlàctic amb llur latitud, longitud, període de registre, anys disponibles, mitjana anual de les precipitacions registrades,  $m$ , la seva desviació estàndard,  $s$ , nombre d'anys per a aconseguir valors estacionaris,  $ns$ , i coeficient de variació,  $CV$ . (Font: Lana i Burgueño, 2000a)

Estació	Latitud	Longitud	Període de registre	Anys	$m$ (mm)	$s$ (mm)	$ns$ (anys)	$CV$ (%)
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
València	39°29'N	0°21'W	1864-1994	129	452.0	178.1	65	39.4
Alicante	38°22'N	0°30'W	1909-1994	86	324.6	108.3	60	33.4
Almeria	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

### 3 Precipitacions mensuals

#### 3.1 Irregularitats pluviomètriques per a la costa mediterrània espanyola

Per a estudiar la irregularitat del règim pluviomètric al llarg de les costes del Mediterrani espanyol i de l'Oceà Atlàtic (Lana i Burgueño, 2000a), es van fer servir set sèries llargues de precipitació mensuals (Taula 1), dues de les quals a la costa catalana. Es van utilitzar tres funcions estadístiques (gamma, log-normal i una combinació de les distribucions de Poisson i gamma) i diagrames moment-ràtio per simular les distribucions empíriques mensuals i anuals de les quantitats de precipitació, comprovant cada distribució mitjançant el test Kolmogorov-Smirnov. Cal destacar que mentre la majoria de casos mensuals requerien la distribució gamma, el comportament pluviomètric dels mesos d'estiu quedava ben descrit per la distribució Poisson-gamma. Per tant, les quantitats de precipitació mensuals no estan distribuïdes de manera idèntica al llarg de l'any per a cada pluviòmetre. Tant la distribució log-normal com la gamma modelen satisfactoriament les quantitats empíriques anuals (Figura 3). En segon lloc, es van calcular les tendències temporals deduïdes per a quantitats anuals i estacionals i es va avaluar llur significació estadística. El fet més remarcable és que, tot i que algunes tendències lineals s'acosten a 1 mm any $^{-1}$ , llurs nivells de significació excedeixen el valor llindar assumit i, tret de l'estació hivernal per Barcelona, no se les va considerar significatives des d'un punt de vista estadístic. Finalment, tornant a utilitzar quantitats mensuals i anuals, es van calcular tres índexs d'irregularitat temporal per a cada sèrie pluviomètrica. Com a resultat, va augmentar la discrepància temporal dels models de precipitació de la regió mediterrània. A més de la irregularitat temporal, es va observar un canvi amb la latitud tant pels paràmetres de les distribucions estadístiques, com pels índexs d'irregularitat temporal dels pluviòmetres analitzats. Els dos pluviòmetres situats més al sud constitueixen un cas especial en comparació amb les estacions restants, ja que també reben la influència de l'Atlàtic a causa de llur proximitat amb aquest oceà.

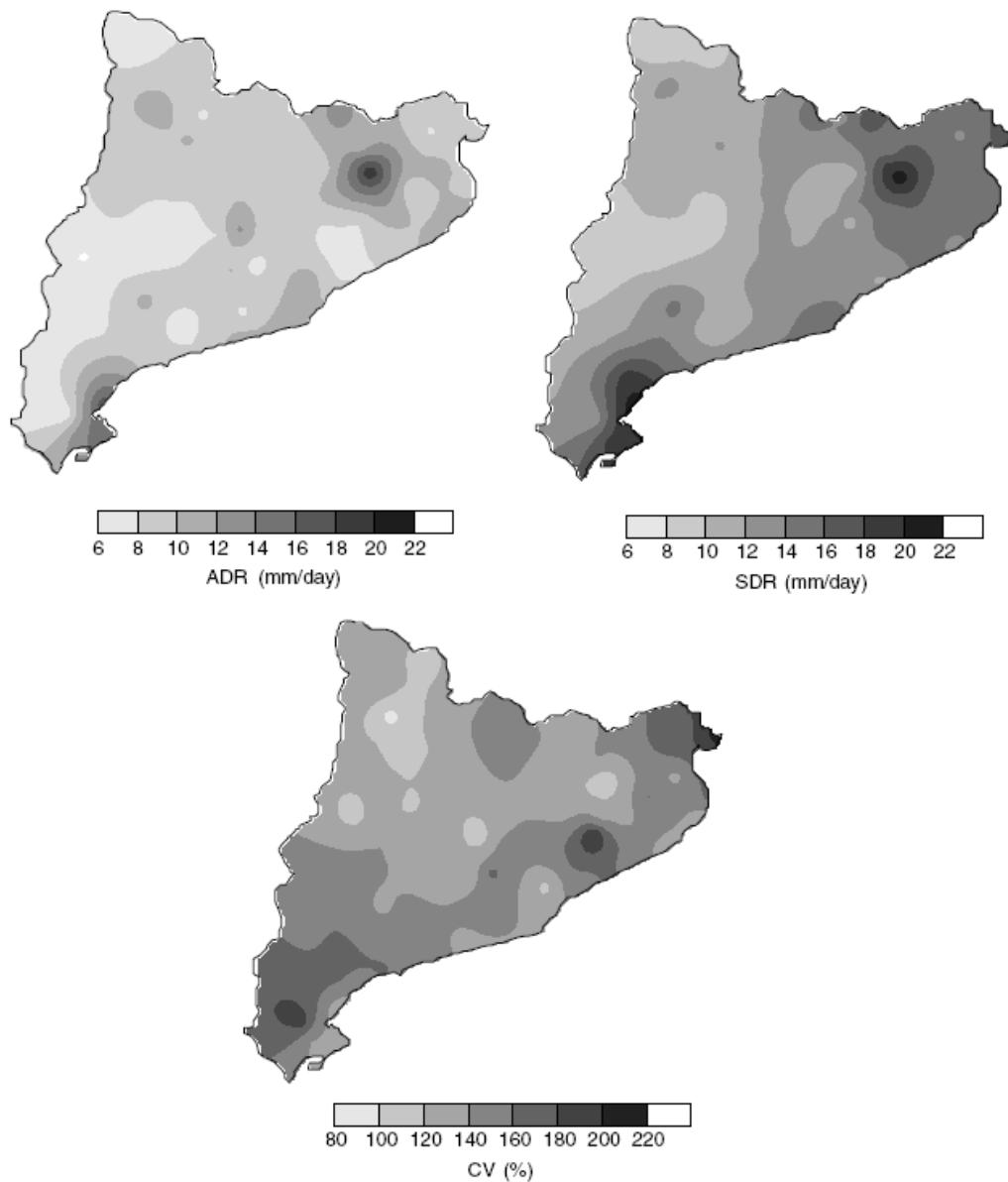


**Figura 8.** Distribució espacial del percentatge dels extrems anuals esdevinguts a la tardor. (Font: Lana et al., 1995)

També va rebre una atenció especial una anàlisi espectral d'anomalies de precipitació (Lana i Burgueño, 2000b) per a les sèries de quantitats mensuals de Barcelona (1860-1987), aprofitant la durada de les seves dades.

#### 3.2 Escassetat i excés de precipitació mensual segons l'Índex de Precipitació Estàndard

Amb una base de dades obtinguda a partir de 99 pluviòmetres amb totals mensuals acumulats des de 1961 a 1990, es van analitzar els comportaments temporals i espacials de l'escassetat i l'excés de precipitació (Lana et al., 2001). La distribució de les quantitats mensuals per a cada pluviòmetre es va simular mitjançant les distribucions gamma o Poisson-gamma. Seguidament, amb una transformació equiprobable,

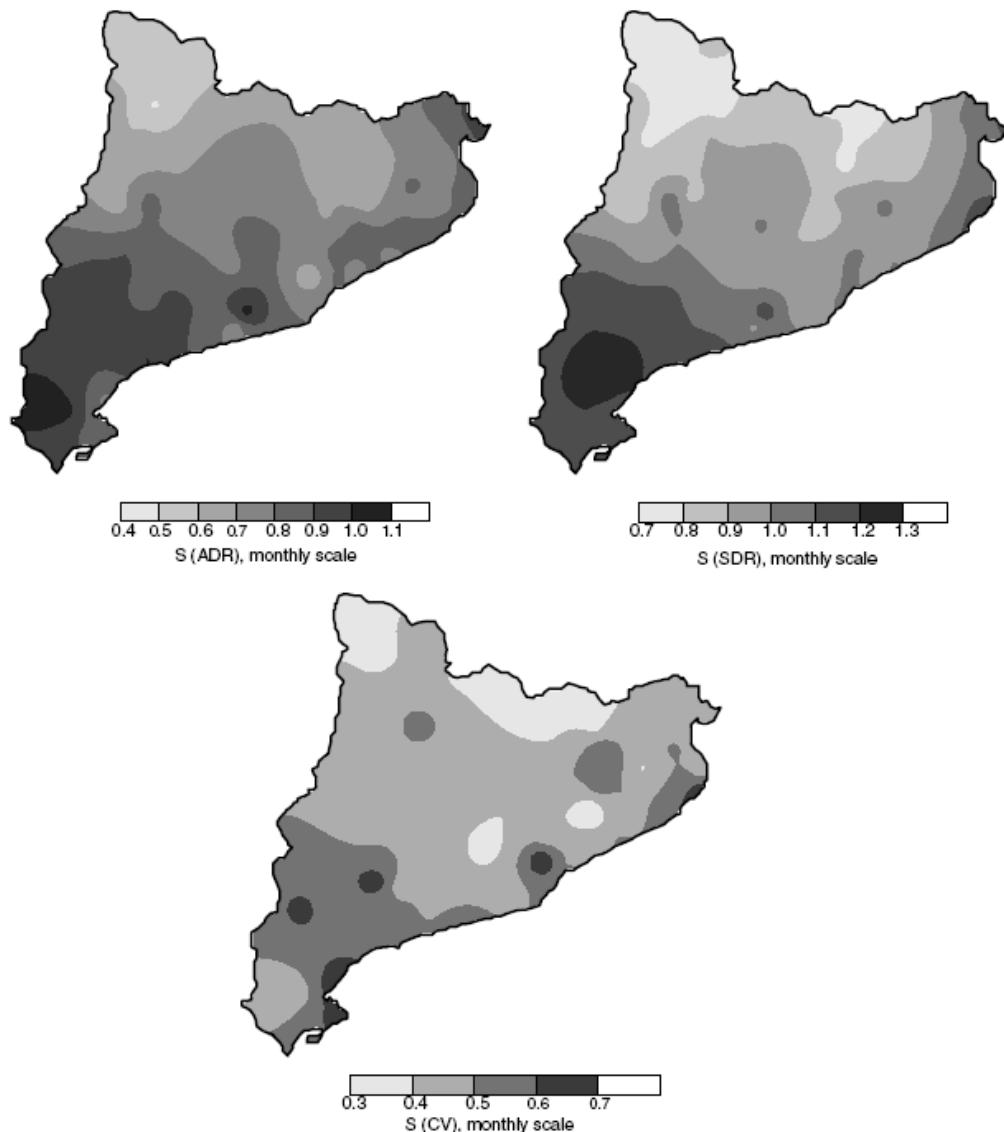


**Figura 9.** Precipitació mitjana diària (ADR, segons les sigles angleses), desviació estàndard (SDR, segons les sigles angleses) i coeficients de variació (CV) evaluats tenint en compte tot el període de registre de cada pluviòmetre. (Font: Lana et al., 2004)

es van substituir les quantitats mensuals descrites per aquestes distribucions per valors donats per l'Índex de Precipitació Estàndard, SPI (segons les sigles angleses), que segueix una distribució normal estandarditzada i proporciona una escala pluviomètrica única (Figura 4). Després, es va aplicar l'anàlisi de components principals, PCA (segons les sigles angleses), a la sèrie de SPIs mensuals. Tenint en compte els coeficients de ponderació, RFL (segons les sigles angleses), correlacionant pluviòmetres i components principals, PC (segons les sigles angleses), es va aconseguir una doble regionalització de 99 pluviòmetres, distingint entre episodis d'escassetat i excés de precipitació. També es va establir una classificació temporal dels episodis d'escassetat i excés de

precipitació, considerant en aquest cas el *Factor Score*, FS, obtinguts després d'un PCA de variables basat en SPIs mensuals.

La regionalització espacial aconseguida es va convertir en una representació aproximada dels diferents territoris topogràfics (Pirineus, Pre-pirineus, conca central, serralades Litoral i Pre-litoral i costa mediterrània), destacant-se així la diversitat climàtica de Catalunya. La clusterització temporal suggeria un comportament força complex dels episodis d'escassetat i excés de precipitació. Així mateix, la distribució espacial d'aquests clústers temporals era molt dispersa, de tal manera que l'escassetat i l'excés mensuals de vegades afecten tota Catalunya i de vegades



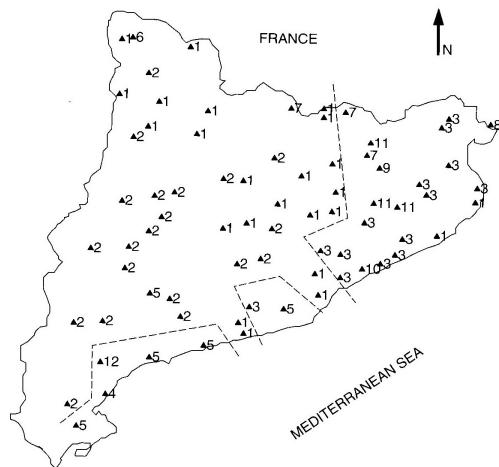
**Figura 10.** Distribució espacial de la irregularitat temporal per a les sèries mensuals de ADR, SDR i CV (segons les sigles angleses). (Font: Lana et al., 2004)

només una petita àrea. A més dels resultats obtinguts gràcies al PCA i als algoritmes de clusterització, cal destacar que la gravetat dels episodis va augmentar notablement només per a l'escassetat de les precipitacions (Figura 5). Hem d'afegir que una anàlisi del nombre de pluviòmetres afectats per l'escassetat i l'excés mensuals va mostrar un fet interessant: mentre que el nombre de pluviòmetres associats a l'escassetat tenia una tendència creixent, es va detectar una tendència decreixent destacable per a l'excés en el període 1961-1990 (Figura 6).

## 4 Precipitació diària

### 4.1 Precipitació màxima diària

La distribució espacial de la precipitació màxima diària esperada es va investigar per a diversos períodes de retorn (Lana et al., 1995). El procés es va aplicar a les quatre estacions de l'any i per a tot l'any assumint la clàssica teoria de Gumbel dels extrems (distribució de Gumbel I), que es va confirmar amb l'ajust raonable entre extrems modelitzats i empírics. L'anàlisi indicava una combinació de diversos factors que controlaven la distribució de quantitats extremes diàries a Catalunya, com l'orografia complexa, la proximitat del Mar Mediterrani,



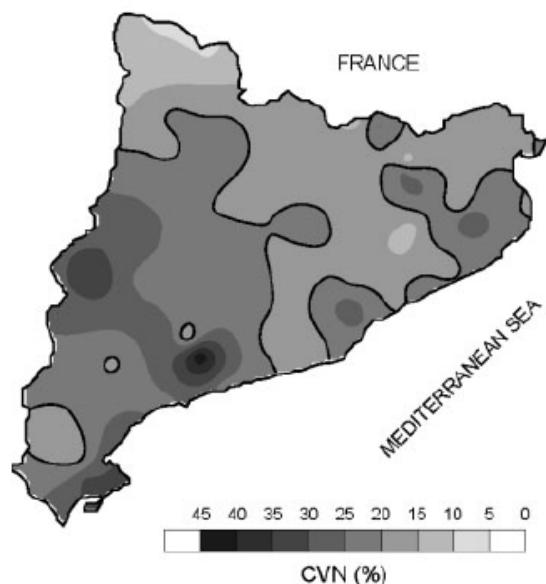
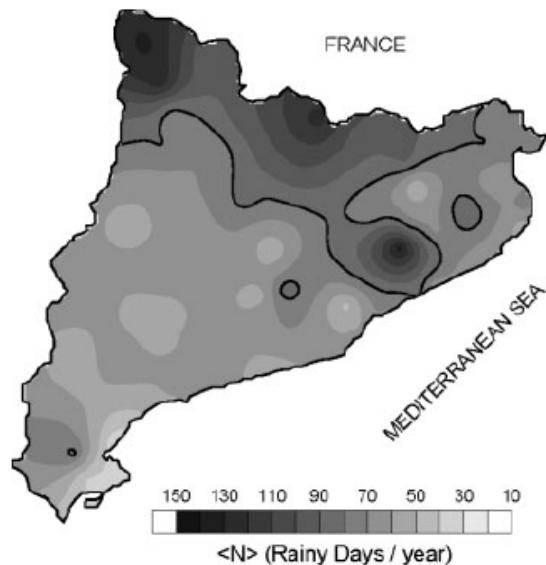
**Figura 11.** Distribució espacial dels 12 clústers obtinguts després de l'aplicació de l'algorisme de clusterització AL als FSCs resultants, obtinguts gràcies als PCS aplicats a 12 ADRs mitjans mensuals i a 12 SDRs per als 75 pluviòmetres considerats. (Font: Lana et al., 2004)

la important activitat convectiva i la circulació dominant de superfície.

Els registres pertanyien a 74 pluviòmetres que cobrien tota la zona d'estudi, amb diferents períodes d'observació. Les estacions es van seleccionar a partir de 350 pluviòmetres, tot respectant dues condicions. D'una banda, llurs dades estacionals i extremes no han de tenir una tendència temporal significativa. De l'altra, el nombre d'extremes disponibles ha de ser superior a 30. La durada de les dades observacionals que en resulta va de 30 a 76 anys.

La Figura 7 mostra el comportament dels màxims de precipitació diària, amb diferents períodes de retorn, corresponent a la tardor (setembre, octubre i novembre), i la Figura 8 l'ocurrència, en percentatge, dels extrems anuals en aquesta estació. La característica més significativa és el predomini d'esdeveniments extremes registrats durant aquesta estació. Tal com podem constatar, els màxims diaris més grans s'observen a les dues bandes més extremes del litoral. Recentment, s'ha obtingut una anàlisi més detallada (Casas et al., 2007) utilitzant 145 pluviòmetres, cosa que ha permès l'estimació objectiva de la precipitació màxima diària amb una resolució espacial d'1 km<sup>2</sup>.

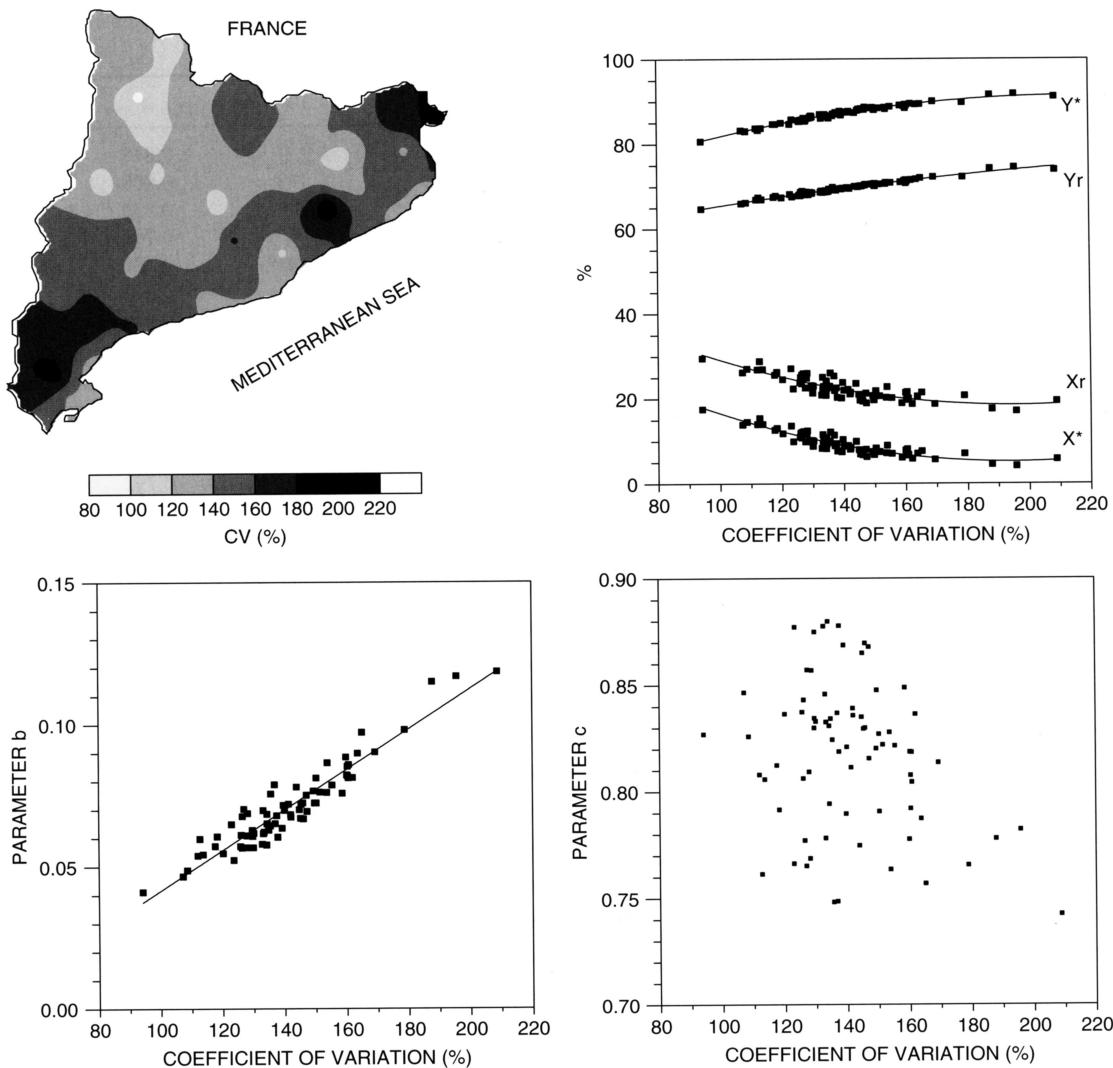
Les mesures de precipitació dels diferents pluviòmetres, juntament amb un pluviògraf Jardí i un pluviògraf de sifó, instal·lats a l'Observatori Fabra i a diferents emplaçaments de Barcelona respectivament, han permès obtenir les quantitats extremes reunides per a una àmplia gamma de duracions, des d'1 dia fins a 730 dies consecutius. Tal com esperavem, els resultats obtinguts satisfan una llei potencial entre la duració i les quantitats extremes reunides, que es troben per sota dels valors obtinguts per al Regne Unit (Burgueño et al., 1998).



**Figura 12.** Distribució espacial del nombre mitjà de dies de pluja per any i del seu coeficient de variació. Les isolínies perfilades corresponen a 80 dies de pluja per any i un 20% de CVN. (Font: Burgueño et al., 2005)

#### 4.2 Variabilitat espacial i temporal de les precipitacions diàries

Els patrons espacials i temporals del règim de precipitacions diàries de Catalunya registrats per al període 1950-2000 es van analitzar des de diferents punts de vista, incloent la irregularitat de les sèries temporals en termes d'entropia, el test Mann-Kendall per a les tendències temporals, un PCA, un enllaç mitjà, AL (segons les sigles angleses), un algoritme de clusterització i, finalment, una anàlisi de l'espectre de potència, que incloïa una comparació amb les hipòtesis de soroll blanc i de soroll vermell Markovià (Lana et al.,



**Figura 13.** Dependència dels paràmetres  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $X^*$ ,  $Y^*$ ,  $b$  i  $c$  del CV de les quantitats de precipitació diària. La dispersió geogràfica dels CVs queda descrita al mapa adjunt. (Font: Burgueño et al., 2005)

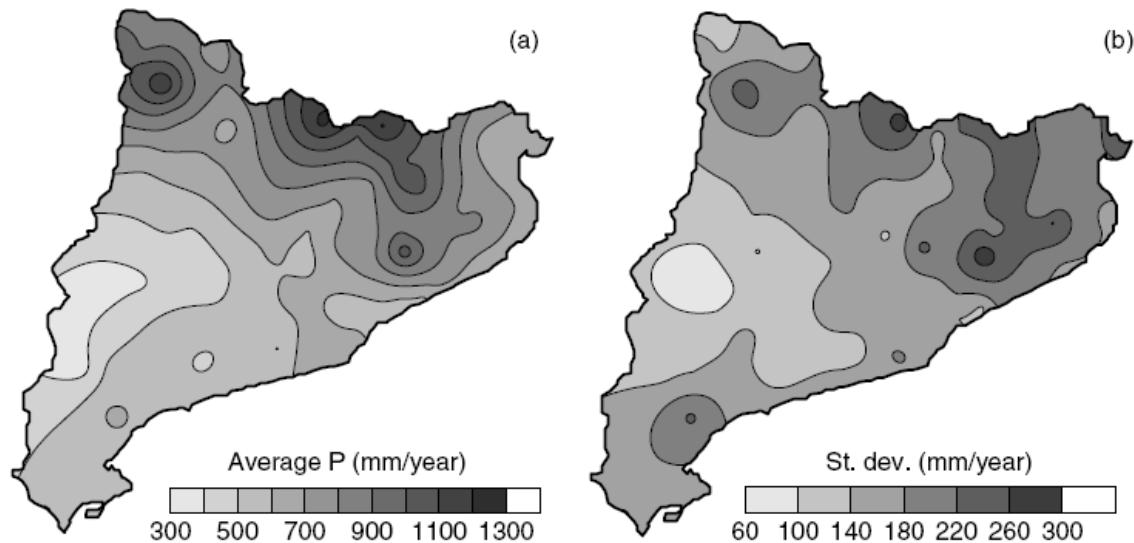
2004). Les analisis es basaven en les variables de tres mesos derivades de les quantitats registrades per dies: la precipitació mitjana diària, ADR (segons les sigles angleses), i la desviació estàndard, SDR (segons les sigles angleses), de la precipitació diària per a cada mes, juntament amb el corresponent coeficient de variació, CV. La Figura 9 mostra la distribució espacial d'aquests tres estadístics quan s'apliquen a tot el període de registre de cada pluviòmetre. L'índex d'irregularitat,  $S$ :

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

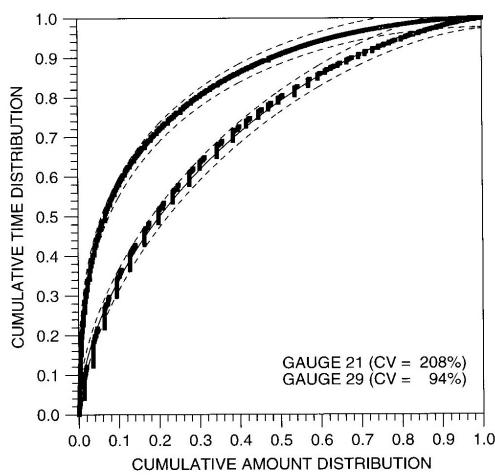
va manifestar la variabilitat temporal d'una sèrie temporal de  $N$  valors de  $X$ . La variabilitat espacial de  $S$  es caracteritzà per valors rellevants en tots els casos i gradients

des del nord fins al sud i fins a la costa mediterrània (Figura 10).

La interpretació dels *factor scores* derivats del PCA i dels clústers obtinguts a partir de l'algoritme AL també van descriure la complexa distribució espacial del règim de precipitacions diàries, ja que els efectes dels patrons de la circulació atmosfèrica dels règims de precipitació vénen condicionats per la complexa orografia de Catalunya i la seva proximitat al Mar Mediterrani. La Figura 11 mostra la distribució espacial dels diferents clústers, així com indicacions de les dues àrees principals mitjançant una línia puntejada. La més gran conté sobretot els clústers 1 i 2, mentre que la resta de clústers estan repartits a prop del litoral. Els coeficients de ponderació associats al PCA també van suggerir una distinció entre les estacions càlida, freda i temperada. Finalment, cal destacar que les sèries mensuals anaven nor-



**Figura 14.** Distribució espacial de a) la mitjana i b) la desviació estàndard de l'índex  $P$  ( $\text{mm any}^{-1}$ ). (Font: Martínez et al., 2007)

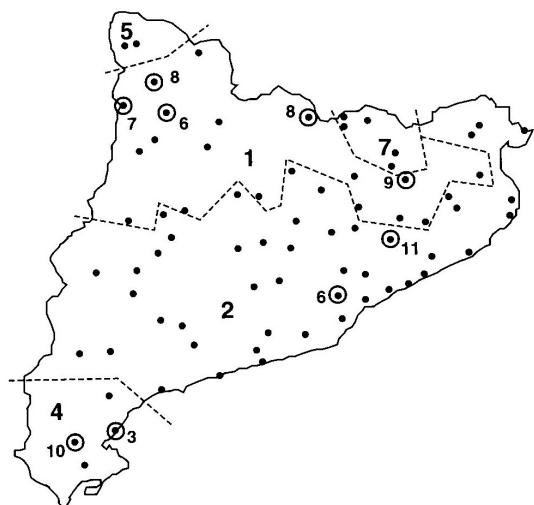


**Figura 15.** Dos exemples de les NRCs per a dos pluviòmetres associats amb els CVs més grans i més petits de les quantitats de precipitació diàries, acompanyats per les bandes de 95% de confiança del test Kolmogorov-Smirnov. (Font: Burgueño et al., 2005)

malment acompanyades per soroll de fons blanc i, en pocs casos, per comportament de Markov i algunes periodicitats significatives, que en general eren de menys de 10 mesos i canviaven d'un clúster a un altre.

#### 4.3 Distribucions estadístiques del règim de precipitacions diàries

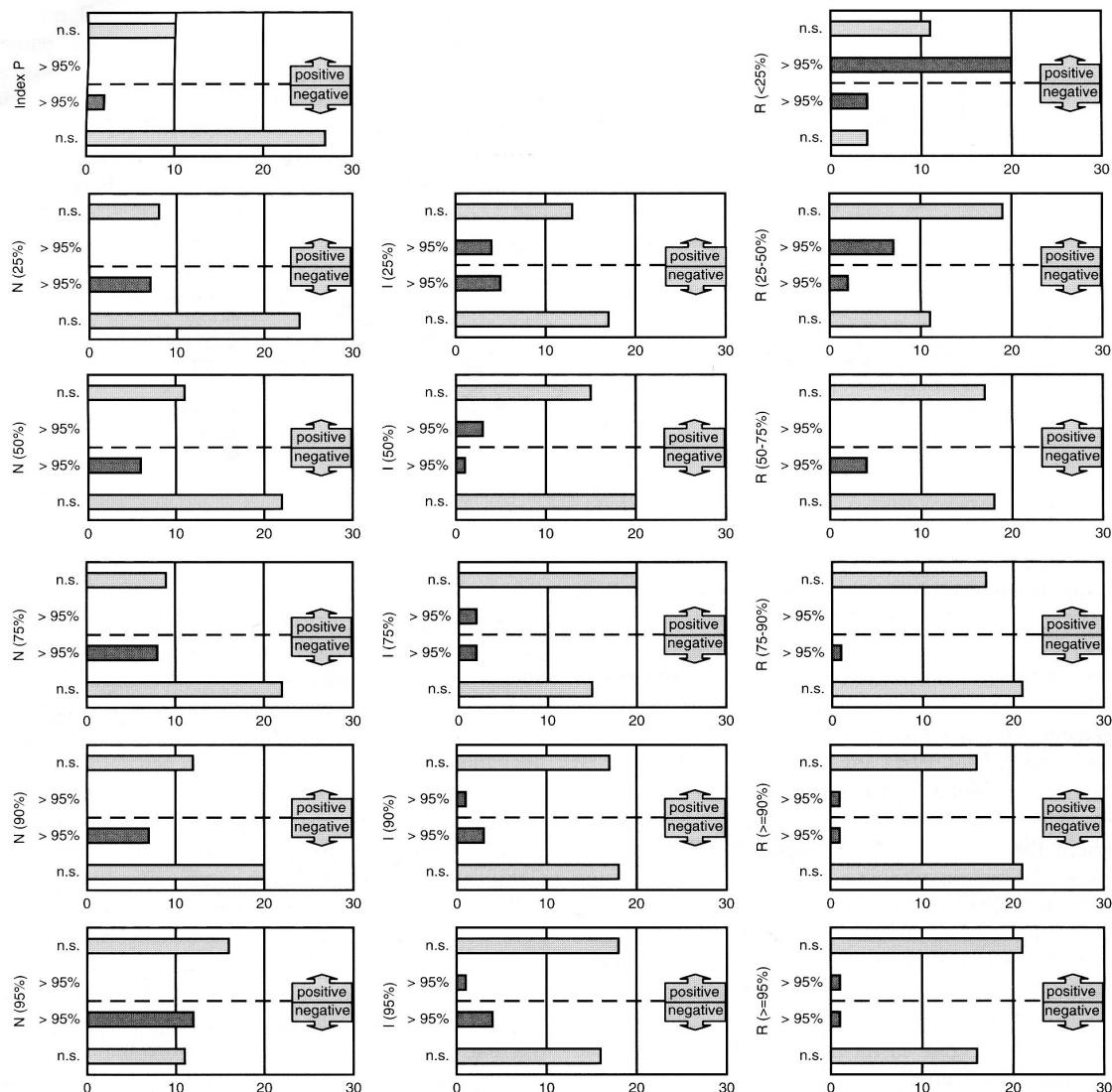
Una xarxa relativament densa de 75 pluviòmetres proporcionà una base de dades de precipitacions diàries des de



**Figura 16.** Els 11 clústers de pluviòmetres després de l'aplicació de l'algoritme AL als FSCs derivats després d'aplicar el PCA a 17 variables (quatre índexs pluviomètrics per a les diferents percentils i intervals de classe). (Font: Martínez et al., 2007)

l'any 1950 fins a l'any 2000, que va permetre corroborar altres anàlisis del règim pluviomètric de Catalunya relatives a les precipitacions mitjanes diàries, llur desviació estàndard i llur coeficient de variació (Burgueño et al., 2005). Anteriorment, s'havia aplicat una recerca similar i més detallada a les sèries de dades de l'Observatori Fabra, entre els anys 1917-1999 (Burgueño et al., 2004).

El nombre anual mitjà,  $\langle N \rangle$ , de dies de pluja es mostra a la Figura 12, juntament amb el seu coeficient de variació,



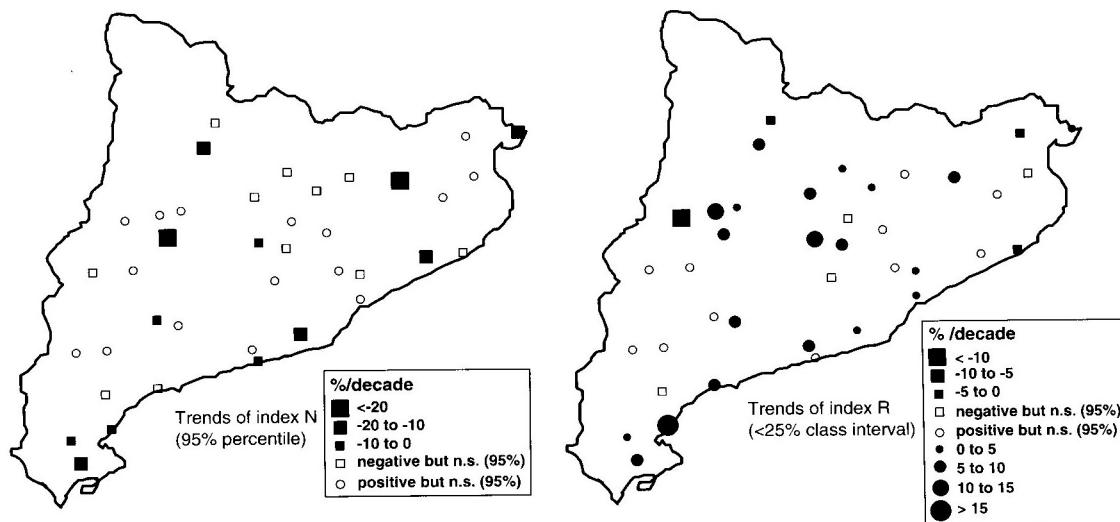
**Figura 17.** Histogrames del nombre de tendències temporals positives i negatives, significatives i no significatives, per als diferents índexs i percentils seleccionats. (Font: Martínez et al., 2007)

CVN. La primera característica notable és l'ample marge obtingut per a  $\langle N \rangle$ , de 30 fins 140 dies de pluja anuals, i la relativament estreta banda de valors de CVN, de 5 a 45%, considerablement més baixa que les derivades per als CVs de les quantitats de precipitació diària Lana et al. (2004). Un altre fet destacable és la clara tendència a la reducció (augment) en  $\langle N \rangle$  (CVN) de nord a sud, amb alguns gradients sorprenents de  $\langle N \rangle$  en àrees dels Pirineus i de la Serralada Transversal, i de CVN prop de la costa mediterrània. El nombre anual de dies de pluja no tenia tendència regional significativa, tot i que 23 dels 75 pluviòmetres tenien tendències significatives.

Les distribucions de les quantitats diàries,  $X$ , van ser ben modelitzades per una distribució exponencial, mentre

que les distribucions temporals,  $Y$ , acceptaven generalment el model Weibull. Alguns pluviòmetres no van seguir cap dels dos models, 25 només van seguir un model i 42 pluviòmetres es van ajustar als dos models. El paràmetre de la distribució exponencial va adoptar un gradient rellevant d'est a oest, que indicava la influència de l'advecció mediterrània en les quantitats de precipitació mitjanes.

Les corbes de precipitació normalitzades, NRC (segons les sigles angleses), es van obtenir expressant  $X$  en funció de  $Y$ , independentment d'èxits anteriors en la simulació de la distribució. Els paràmetres  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $X^*$ ,  $Y^*$ , corresponents a les coordenades dels punts de NRC amb pendent igual a la unitat, i als punts amb coordenades  $(0.5, Y^*)$  i  $(X^*, 0.5)$ , es van determinar i relacionar amb el CV de les quantitats de



**Figura 18.** Tendències temporals de l'índex  $N$  (percentil 95) i índex  $R$  (interval de classe <25%), donades en percentatges dels valors mitjans per dècada. (Font: Martínez et al., 2007)

precipitació diària (Figura 13). Les NRCs es poden ajustar a la llei:

$$X = Y \exp [-b(1 - Y)^c] \quad (2)$$

així com a una distribució beta. La sèrie de NRCs deduïda correspon a coeficients de variació de quantitats diàries que oscil·len entre 94 i 208% (Figura 15). Els paràmetres de l'ajustament empíric i de la distribució beta van mantenir-se dependents del coeficient de variació de les quantitats de precipitació diàries, i les NRCs obtinguts no van diferir notablement, per exemple, respecte als pluviòmetres emplaçats a la Índia, a l'estació del monsó.

Una minuciosa revisió de les coordenades  $(1-X_r, 1-Y_r)$ , derivades dels NRCs, va posar de manifest que una fracció molt gran de quantitats de precipitació s'explica per un nombre bastant baix d'episodis diaris amb totals notables que excedeixen les precipitacions diàries mitjanes. D'aquesta manera, el caràcter desigual del règim pluviomètric diari de Catalunya va quedar clarament demostrat.

#### 4.4 Règim de precipitacions diàries derivat a partir de quatre índexs de precipitació

Per tal d'analitzar amb profunditat la descripció del complex comportament del règim de precipitacions diàries a Catalunya es van fer servir les quantitats de precipitacions anuals,  $P$ , el nombre de dies de pluja per any,  $N$ , la intensitat mitjana diària en un any,  $I$ , i la rellevància,  $R$ , de la contribució d'un interval de classe de precipitació a la quantitat anual com a índexs pluviomètrics (Martínez et al., 2007). Aquests mateixos índexs de precipitació havien estat aplicats anteriorment a les sèries de dades de l'Observatori Fabra

(1917-1999) a escala estacional i anual (Lana et al., 2003), mentre que també se n'havien estudiat les periodicitats i irregularitats (Lana et al., 2005).

Per a portar a terme aquesta anàlisi, es van tenir en compte les quantitats diàries de precipitació de 75 pluviòmetres per al període 1950-2000. Es van analitzar els índexs  $N$  i  $I$  distingint cinc percentils (el 25, el 50, el 75, el 90 i el 95) de les quantitats de precipitació diàries. L'índex  $R$  es va avaluar tenint en compte els intervals de classe <25%, 25 - 50%, 50 - 75%, 75 - 90%, ≥90% i ≥95%. Tots aquests índexs van ser descrits per llurs valors anuals mitjans, llurs desviacions estàndard (veure Figura 14 com a exemple) i les irregularitats temporals consecutives (Equació 1). A part de la complexa orografia de la regió, en la diversitat dels patrons espacials dels índexs es van detectar els efectes de la influència del règim mediterrani i de la llunyania a la costa atlàntica. La influència del règim atlàtic també es va detectar en alguns llocs dels Pirineus, especialment en aquells que estaven orientats cap al nord. Totes aquestes característiques es van descriure a través d'un PCA, que es va aplicar als valors mitjans anuals dels índexs pluviomètrics i al procés de clusterització posterior (Figura 16). A més, les tendències temporals dels índexs anuals es van analitzar per a una sèrie seleccionada de 39 pluviòmetres amb una continuïtat de registre òptima. Les tendències es van derivar de la regressió linear i es van establir les significacions estadístiques locals a un nivell de confiança del 95% utilitzant el test Mann-Kendall. Es van investigar les tendències regionals significatives mitjançant simulacions de Monte Carlo (Figura 17). Cal esmentar que es van detectar tendències regionals significatives en el nombre de dies de pluja per a percentils de fins a 75, resultant negatives totes les tendències locals. Les tendències regionals significatives també varen

ser detectades en la intensitat diària, per a qualsevol nivell llindar, amb tendències locals positives i negatives. L'índex de rellevància  $R$  va presentar tendències regionals significatives per als tres primers intervals de classe, amb predomini de les tendències locals positives en els dos primers, indicant així una contribució creixent d'episodis diaris dèbils i moderats a les quantitats anuals (Figura 18).

## 5 Conclusions

Diversos estudis posen de manifest el complex comportament de les precipitacions diàries a Catalunya, resultat de l'orografia, els patrons de circulació atmosfèrica i la proximitat del Mar Mediterrani. Tal com hem esmentat a la Secció 2, les quantitats de precipitació depenen fortament de la ciclogènesi mediterrània a la primavera i, especialment, a la tardor, i dels fenòmens convectius a l'estiu. Els passos frontals des de l'Atlàntic no són tan importants, excepte per la cara nord dels Pirineus. En conseqüència, les anomalies en aquests patrons de circulació podrien implicar canvis relevantes en les quantitats de precipitació.

Les quantitats mensuals registrades a set emplaçaments de la costa mediterrània occidental i de la propera costa atlàntica s'han descrit amb èxit amb les distribucions gamma i Poisson gamma, mentre que les quantitats anuals precsen tant les distribucions gamma com les log-normal. Per a Catalunya estrictament, les quantitats mensuals han estat substituïdes per valors del SPI, que segueixen una distribució normal estandarditzada, i el comportament espacial dels episodis d'escassetat i excés han estat descrits a través del PCA i els algoritmes de clusterització. Com a resultat col-lateral, el nombre de pluviòmetres afectats per una escassetat mensual mostra una tendència positiva en el període de mesura.

La precipitació màxima diària ha estat analitzada amb la distribució Gumbel I. La tardor és l'estació de l'any amb major percentatge d'extrems anuals, arribant a 50% als extrems nord i sud de la costa catalana. Els ADR i SDR mensuals han estat sotmesos als procediments PCA i al posterior AL. La clusterització resultant permet diferenciar la costa mediterrània i la Catalunya nord-oriental de la resta de la regió. Quan es tenen en consideració tots els pluviòmetres, les tendències regionals significatives per als ADR, SDR i CV mensuals s'han de descartar. S'obté un resultat similar per al nombre anual de dies de pluja. La quantitat empírica i les distribucions temporals de les quantitats diàries s'han simulat a través de les distribucions exponencials i de Weibull, estant totes dues funcionalment relacionades. En general, el règim pluviomètric atribueix una fracció molt gran de quantitats de precipitació a un nombre bastant baix d'episodis diaris, tal com és característic del clima mediterrani. L'anàlisi de tendència s'ha estès a quatre índexs, anomenats  $P$ ,  $N$ ,  $I$  i  $R$ , del procés de precipitació. Cal esmentar que totes les tendències locals significatives derivades per al nombre anual de dies de pluja són negatives, sigui quin sigui el percentil. Aquesta característica és especialment notable quan es té en compte el nombre de dies molt humits (percentil 95), ja que llur contribució a les quantitats anuals és molt rellevant. Aquestes tendències locals negatives, la majoria distribuïdes per tota la regió, són una clara influència mediterrània. Per

tant, el nombre decreixent d'abundants episodis diaris en àrees d'influència mediterrània hauria de ser un canvi perceptible en el règim pluviomètric.

**Agraïments.** Els autors agraiexen a l'Agència Estatal de Meteorologia, abans *Instituto Nacional de Meteorología*, i a l'Observatori Fabra (Reial Acadèmia de Ciències i Arts, Barcelona) llur acurada aportació de sèries de dades pluviomètriques. També donem les gràcies a l'ACAM pel Premi Fontserè 2007 relacionat amb aquesta línia de treball.

## Referències

- Albertosa, 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., i Manes, A., 2002: *The paradoxical increase of Mediterranean extreme daily rainfall in spite of decrease in total values*, Geophys Res Lett, **29**, DOI: 10.1029/2001GL013554.
- Barry, R. G. i Chorley, R. J., 2003: *Atmosphere, Weather and Climate*, Eighth Ed., Routledge, London, pp. 421.
- Burgueño, A., Fernández Mills, G., i Lana, X., 1998: *Precipitacions extremes absolutes a Catalunya*, Tethys, **1**, 11–16.
- Burgueño, A., Serra, C., i 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., i 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., i 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., i Raso, J. M., 1996: *Atlas Climàtic de Catalunya*, Institut Cartogràfic de Catalunya, Barcelona, 42 pp.
- Codina, B., Aran, M., Young, S., i 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., i 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., i Mateos, V. L., 2006: *Changes in frequency and intensity of daily precipitation over the Iberian Peninsula*, J Geophys Res, **111**, DOI: 10.1029/2006JD007280.
- Geng, Q. i Sugi, M., 2003: *Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulphate aerosols. Study with a high-resolution AGCM*, J Climate, **16**, 2262–2274.
- Ghan, S. J. i Shippert, T., 2006: *Physically based global downscaling: climate change projections for a full century*, J Climate, **19**, 1589–1604.

- Gibelin, A. i Déqué, M., 2003: *Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global resolution model*, Clim Dyn, **20**, 327–339.
- Goodess, C. M. i Jones, P. D., 2002: *Links between circulation and changes in the characteristics of Iberian rainfall*, Int J Climatol, **22**, 1593–1615.
- Guilló, A. M. i 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., i 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., i 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., i 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., i Pinskiar, 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. i 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. i 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. i 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. i 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., i 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., i 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., i 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., i Burgueño, A., 2004: *Spatial and temporal variability of the daily rainfall regime in Catalonia (Northeastern Spain), 1950–2000*, Int J Climatol, **24**, 613–641.
- Lana, X., Martínez, M. D., Serra, C., i 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., i Elvini, E., 2002: *Cyclones in the Mediterranean region: the present and the doubled CO<sub>2</sub> 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. i Puigcerver, M., 1992: *Pluies extrêmes en Catalogne, Hydrologie Continentale*, **7**, 99–115.
- Llasat, M. C. i Puigcerver, M., 1994: *Meteorological factors associated with floods in North-Eastern part of the Iberian Peninsula*, Nat Hazards, **9**, 81–93.
- Llasat, M. C. i Puigcerver, M., 1997: *Total rainfall and convective rainfall in Catalonia, Spain*, Int J Climatol, **17**, 1683–1695.
- Llasat, M. C. i Rodríguez, R., 1992: *Extreme rainfall events in Catalonia. The case of 12 November 1988*, Nat Hazards, **5**, 133–151.
- Llasat, M. C., Ramis, C., i 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: *Analisis de la irregularidad de la precipitación diaria en el litoral mediterráneo de la Península Ibérica*, Revista Geofísica, **40**, 101–106.
- Martín-Vide, J. i López-Bustins, J. A., 2006: *The western Mediterranean oscillation and rainfall in the Iberian Peninsula*, Int J Climatol, **26**, 1455–1475.
- Martínez, M. D., Lana, X., Burgueño, A., i 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., i 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., Reynolds, M., i 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. i 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., i 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., i Jansà, A., 1994: *The October-1987 flood in Catalonia: synoptic and mesoscale mechanisms*, Met Apps, **1**, 337–350.
- Rodrigo, F. S. i 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., i 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., i Lana, X., 1998: *Surface synoptic circulation and daily precipitation in Catalonia*, Theor Appl Climatol, **59**, 29–49.
- Trigo, I. F., Davies, T. D., i Bigg, G. R., 2000: *Decline in Mediterranean rainfall caused by weakening of Mediterranean cyclones*, Geophys Res Lett, **27**, 2913–2916.
- Ulbrich, U. i 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., i 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., i 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., i Nozawa, T., 2007: *Detection of human  
influence on twentieth-century precipitation trends*, *Nature*, **448**,  
461–468.