

EL EPISODIO PLUVIOMÉTRICO DEL 10 DE JUNIO EN CATALUÑA. UN PRIMER ESTUDIO HIDROMETEOROLÓGICO

Daniel Sempere Torres, Carles Corral, Marc Berenguer, Rafael Sánchez-Diezma y Josep Dolz*

Resumen

En este artículo se estudia el episodio pluviométrico registrado el día 10 de junio de 2000 en Cataluña. En particular se analiza la lluvia caída en la cuenca de 97 km² correspondiente a la riera de Magarola en su cruce con la autovía N-II en Esparreguera (Barcelona). Para ello se utiliza información de campo obtenida a partir de radar meteorológico, pluviómetros y pluviógrafos.

Sobre la mayor parte de la cuenca se recogieron más de 150 mm de lluvia durante el episodio. También prácticamente sobre toda la cuenca cayeron más de 100 mm en dos horas.

El cálculo del período de retorno asociado a la lluvia de 24 horas evidencia la naturaleza excepcional del fenómeno. No obstante la información histórica disponible es insuficiente y solo permite realizar estimaciones con una gran incertidumbre.

Introducción

La frecuente presencia de lluvias locales e intensas es una característica climática de España y, por tanto, existe una elevada probabilidad de que todos los años en algún punto de nuestra geografía se dé uno de estos episodios pluviométricos. Así ha ocurrido el pasado mes de junio en Cataluña.

El estudio de los episodios de lluvia de fuerte intensidad tiene un claro interés, ya que permite mejorar el conocimiento de las características pluviométricas del entorno geográfico donde se han producido y, de este modo, se facilita la toma de decisiones tendentes a disminuir el riesgo. Para que este análisis pueda hacerse con rigor es preciso disponer de información de campo adecuada en cantidad (series largas) y calidad (fiabilidad de los datos).

Dada la elevada velocidad con que se propagan espacialmente estas precipitaciones intensas, y su pequeña extensión, es de gran interés la aportación que el radar meteorológico hace para su estudio.

No obstante, esta información facilitada por el radar no es suficiente para resolver el problema que tradicionalmente existe en nuestro país al abordar un estudio pluviométrico: escasez de información histórica de calidad. Ello es más acusado para los datos referidos a lluvias de corta duración que, por otra parte, suelen ser las que están asociadas a mayores riesgos para las personas y bienes.

En el presente artículo se analiza el episodio pluviométrico acaecido el 10 de junio de 2000 en Cataluña, especialmente en lo que afecta a la cuenca de la riera de Magarola (Esparreguera, Barcelona).

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La previsión meteorológica del día 9 de junio hacía hincapié en la llegada de un frente durante la noche del 9 al 10, que tras barrer la parte norte de la Península podía provocar fuertes precipitaciones en el área mediterránea. El contacto con una masa de aire mucho más cálida y húmeda, susceptible de ser

* Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Jordi Girona 1-3, D-1. 08034 Barcelona.

fácilmente desestabilizada, y la presencia de una cuña de aire frío en altura se veían reflejados en una previsión que incluía el aviso de probables episodios de lluvias intensas que podrían ser localmente muy fuertes.

El episodio objeto de estudio se inició a últimas horas de la noche del día 9 de junio (todos los tiempos referidos en este artículo están en UTC), y consistió esencialmente en una banda muy marcada de precipitaciones intensas que cruzó Cataluña de sur a norte.

La Figura 1 presenta el área que enmarca las zonas afectadas por las intensidades máximas, y también recoge los puntos de medida pluviométrica (pluviómetros diarios, pluviógrafos y el radar meteorológico) que se han utilizado en este estudio. Como características distintivas de la zona se reconocen los ejes marcados por los cauces del río Llobregat y del Anoia y, en el centro del área la montaña de Montserrat, obstáculo orográfico de gran singularidad que jugó un papel muy relevante durante el episodio.

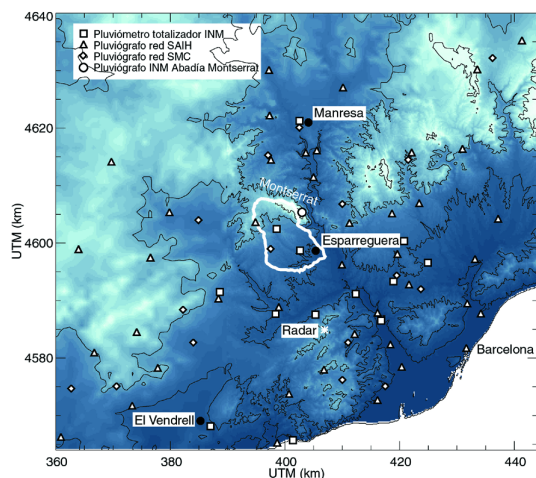


Figura 1: Marco general del área afectada por las precipitaciones más importantes registradas durante el episodio del 10 de junio.

Se ha identificado el contorno de la cuenca de la riera de Magarola. También aparecen los puntos de medida pluviométrica disponibles (ver Tabla 1).

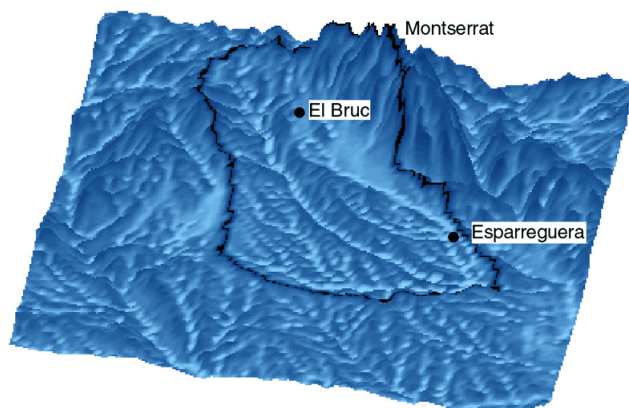


Figura 2: Cuenca de la riera de Magarola. Sobre un fondo altimétrico se muestra en color el valor del Índice Topográfico, $IT = \ln(\alpha/\tan \beta)$, de TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979) que puede interpretarse como un índice de facilidad de saturación del terreno (α = área drenada por el punto considerado, $\tan \beta$ = pendiente topográfica del punto).

El presente artículo se centra en el análisis de las lluvias recogidas en la cuenca de la riera de Magarola, en la sección definida por el puente de la autovía N-II. Esta cuenca de 97 Km² está limitada por las fuertes pendientes de Montserrat al noreste (ver Figura 2), que propician la rápida concentración de la escorrentía superficial hacia la red de drenaje de la cuenca objeto de estudio.

Datos disponibles

Para el estudio hidrometeorológico del episodio se han recopilado los datos citados en la Tabla 1. Se trata de todos los datos pluviométricos disponibles en centros oficiales con responsabilidad en tareas de medida de la lluvia. Aunque no es de descartar que pudiera existir información adicional no oficial, se ha circunscrito el estudio al análisis de los datos cuya calidad está en principio certificada.

Tabla 1: Origen de los datos de medida de lluvia utilizados en el estudio. Ver localización en Figura 1.

Puntos	Descripción del sensor	Fuente de los datos
55	Pluviógrafos del SAIH de las cuencas internas de Cataluña	Agència Catalana de l'Aigua
18	Pluviógrafos de la red de la Generalitat de Catalunya	Servei de Meteorologia de Catalunya, (SMC). (http://www.gencat.es/servmet)
11	Pluviómetros totalizadores diarios de la red estatal del Instituto Nacional de Meteorología (INM)	Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (CMTC)
1	Pluviógrafo de la red estatal del Instituto Nacional de Meteorología (INM)	Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (CMTC)
1	Radar meteorológico de la red estatal del Instituto Nacional de Meteorología (INM)	Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (CMTC)

La existencia de una buena densidad de sensores (más de 1 punto de medida cada 100 km² en promedio sobre el entorno de la cuenca) y la posibilidad de disponer de los datos del radar del Instituto Nacional de Meteorología (INM) situado en Corbera, permiten realizar una rigurosa descripción del episodio.

Dentro de la cuenca, o en su inmediato entorno, se dispone de 2 pluviómetros (El Bruc y Esparriguera) y 3 pluviógrafos (Montserrat, uno del SAIH y otro del SMC).

Descripción del episodio utilizando el radar meteorológico

Para comprender la dinámica temporal del episodio, se ha utilizado como referencia fundamental las imágenes del radar meteorológico existente en Corbera, próximo a la cuenca de la riera de Magarola.

Se trata de un radar de banda C (longitud de onda de 5.4 cm) de la red estatal de radares meteorológicos gestionada por el INM. Esta red está formada por 15 radares con capacidad Doppler que permiten dar cobertura a la totalidad del territorio nacional en tiempo real (1 imagen cada 10 minutos), siendo actualmente una herramienta básica de apoyo a la labor de vigilancia meteorológica operativa (Martín y De Esteban, 1994).

Sin embargo su utilización cuantitativa está aún limitada, esencialmente debido a que la medida de lluvia por radar es una medida indirecta que requiere un complejo proceso de tratamiento y corrección para ser fiable (Zawadzki, 1984; Rosenhaus, 1995; Rinehart, 1999; Sánchez-Diezma, 2000). Así, aunque hay en marcha en España varios proyectos de I+D con ese objetivo, hoy por hoy la estimación cuantitativa de la lluvia por radar está aún restringida a estudios experimentales (ver por ejemplo Sempere Torres et al., 1999).

Por todo esto, utilizaremos aquí las imágenes radar del episodio principalmente desde un punto de vista cualitativo, ya que su utilización cuantitativa requeriría un estudio específico que supera el marco de este trabajo. Se ha realizado un procesado básico de las imágenes para eliminar, al menos en parte, las fuentes de error más importantes, como los ecos debidos a obstáculos orográficos, la corrección de la subdetección por ocultamiento, y algunos problemas de estabilidad detectados. La atenuación de la

señal por la propia lluvia (efecto muy importante en lluvias de este tipo en radares de banda C) o las correcciones del Perfil Vertical de Reflectividad y las ligadas a la transformación Reflectividad-Intensidad en función del tipo de lluvia no han sido abordadas (para detalles metodológicos sobre estas correcciones ver Sánchez-Diezma, 2000).

Según lo anteriormente expuesto, podemos decir que aunque no se trata de las imágenes brutas, tampoco se pueden considerar campos de lluvia lo suficientemente depurados como para poder ser utilizados cuantitativamente, por lo que sólo se utilizan para la descripción del episodio. No obstante, sí se puede utilizar la escala de colores, que originalmente representa la reflectividad de la lluvia en decibelios, para asociar un orden de magnitud a las intensidades de lluvia.

Un estudio más profundo de estas imágenes está siendo llevado a cabo actualmente por el INM.

La Figura 3 presenta una secuencia de imágenes seleccionadas que permiten comprender la evolución del episodio. En los primeros minutos de la madrugada entra en la zona una banda de lluvia muy estructurada que lentamente se acerca a Montserrat. Esta banda (había una segunda más al sur asociada a un sistema convectivo) es la responsable de las precipitaciones que generaron las inundaciones del Vendrell y cumple las dos condiciones favorables para provocar inundaciones relámpago: estacionariedad y recurrencia de células convectivas al moverse éstas paralelamente a la banda. Hacia las 2h UTC, la banda parece romperse apareciendo diversos núcleos de precipitación muy intensa. A continuación, y tras unas imágenes dominadas por el efecto de la atenuación de la señal debido a la precipitación intensa sobre el propio radar, se vuelve a apreciar una estructura muy bien definida, de nuevo en forma de banda perpendicular a la costa, que pivotando sobre el obstáculo orográfico de Montserrat, se hace primero estacionaria permaneciendo aproximadamente entre las 3h y las 4h 30 sobre la cuenca de estudio, para luego continuar su avance hacia el norte. En este periodo de tiempo Montserrat ejerce un reforzamiento local de la convección, al forzar el ascenso del aire cálido y húmedo que llega desde el mar, generando lluvias muy intensas y muy localizadas espacialmente.

Finalmente la estructura precipitante se aleja, aunque se reproduce a partir de las 6h en la vertiente norte de Montserrat, alejándose definitivamente, y a muy debilitada, después de las 8h UTC.

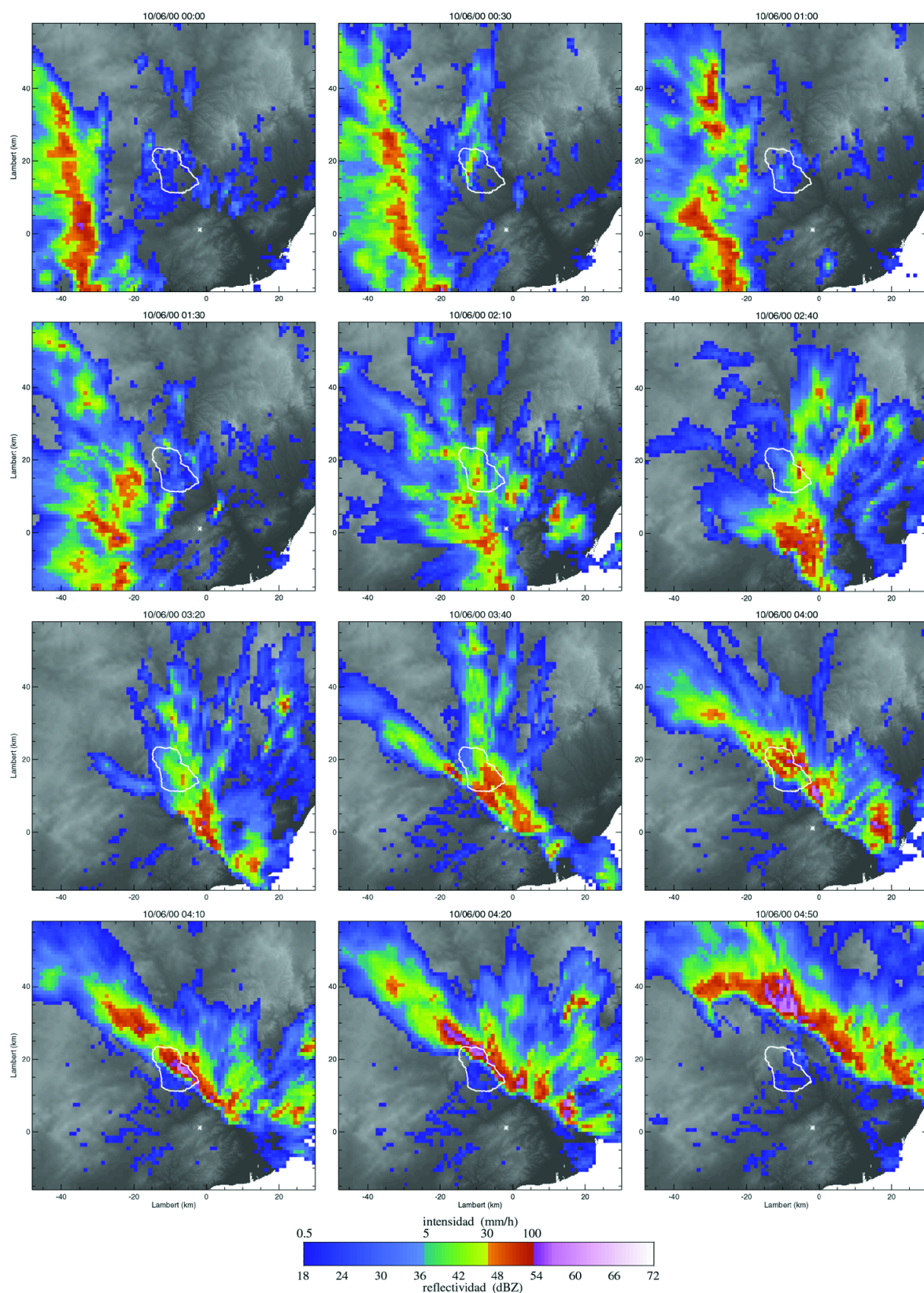


Figura 3: Selección de imágenes del radar meteorológico de Corbera (indicación temporal en cada una de las cabeceras). Se trata de imágenes de tipo PPI (Plan Position Indicator), procesadas a partir de las dos elevaciones de tiro más bajo (0.5 y 1.4 grados) del volumen polar bruto. Las coordenadas están expresadas en km de distancia al emplazamiento del radar (en proyección Lambert). Los datos de reflectividad de lluvia en decibelios están codificados en función de la paleta de colores, a los que se ha asociado unos valores de intensidad de lluvia orientativos (en mm h-1)

Estas imágenes de radar meteorológico (aunque aún presentan algún problema, como el enmascaramiento de parte de la banda de lluvia por efecto de la atenuación en la imagen de las 3h 40'), permiten comprender de forma privilegiada la dinámica del episodio y los fuertes gradientes espaciales a los que se asocian este tipo de precipitaciones de marcado carácter convectivo.

Descripción del episodio utilizando la red de pluviógrafos

En base a la información de acumulaciones horarias sobre los pluviógrafos disponibles se han elaborado los mapas de isohietas horarias. Para la interpolación de los campos de lluvia horaria se ha utilizado el método del spline de lámina delgada (Duchon, 1976), que resulta un buen método para la interpolación pluviométrica en términos de coste/beneficio (Creutin y Obled, 1982) y demostrándose que es un caso particular de krigeage con función de estructura impuesta (Dubrule, 1984).

La Figura 4 presenta la secuencia de las acumulaciones horarias del episodio. Lo primero a destacar es la similitud de estos campos de lluvia con los obtenidos a partir de la información del radar. Por supuesto la interpolación a partir de los pluviógrafos presenta un aspecto más suavizado y con menos contrastes de lo que nos permite ver el radar, pero aún así las formas esenciales se reconocen y se puede destacar la concordancia observada.

Sin embargo, la estructura y la dinámica de la banda de lluvia quedan difuminadas y, por supuesto, en los puntos donde el valor ha sido interpolado el radar mantiene una clara ventaja para describir lo que en verdad ha sucedido. No obstante, y mientras el radar no esté ajustado para ser utilizado cuantitativamente, la red de pluviógrafos es el único método para establecer una estimación cuantitativa de los valores de intensidades registradas.

Utilizando los pluviógrafos y los datos de lluvia recogida en los pluviómetros, se puede estable-

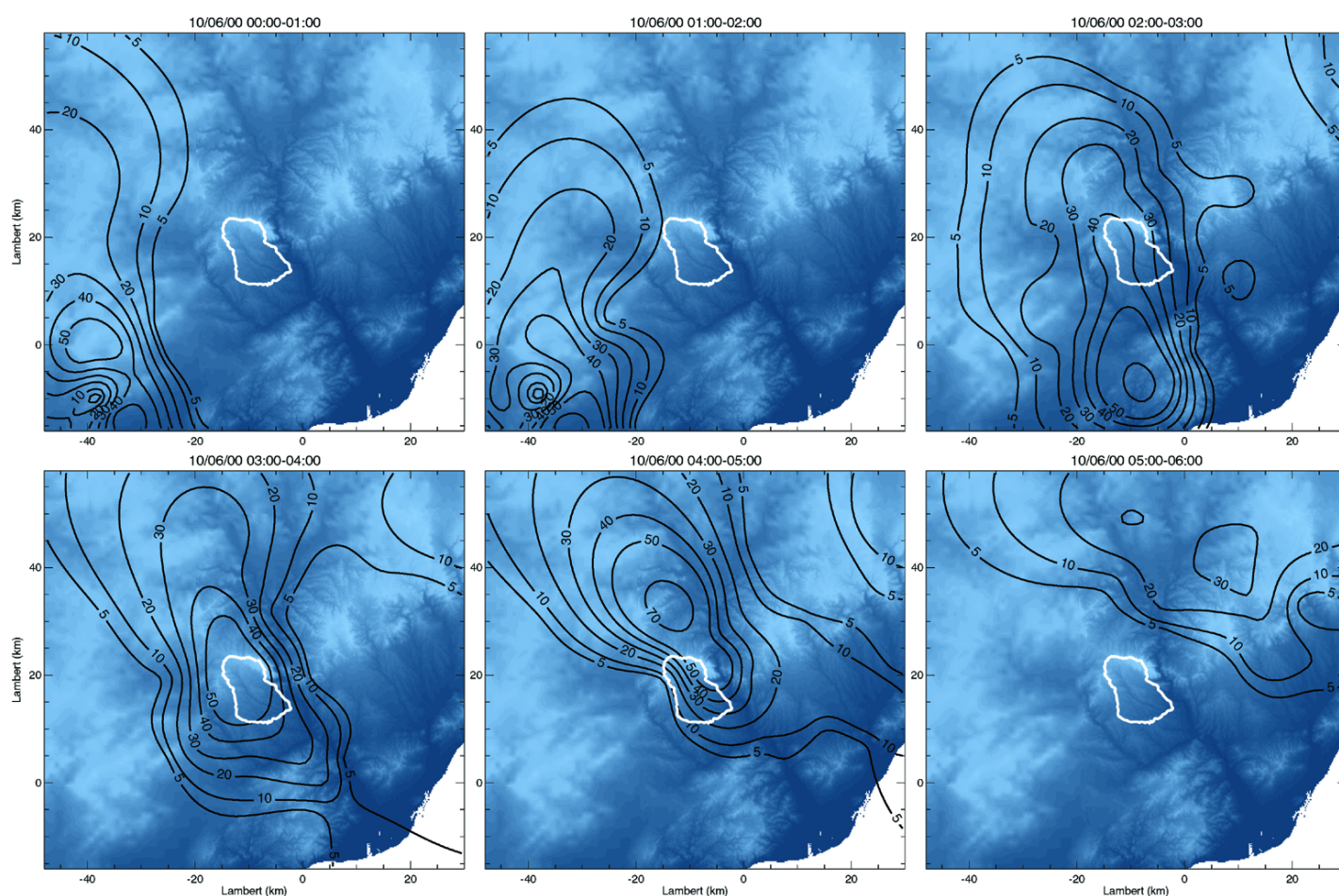


Figura 4: Secuencia de las acumulaciones de lluvia horarias del episodio (en mm h-1). El intervalo horario figura en la cabecera de cada gráfico (día e intervalo horario en UTC), y las coordenadas están expresadas en km de distancia al radar

cer una estimación de la lluvia acumulada del episodio, que se presenta en la Figura 5. Esta figura muestra que el máximo del episodio se registró fuera de la cuenca, lo que es coherente con el elevado caudal que presentó en la mañana del día 10 el Llobregat en Martorell. No obstante buena parte de la cuenca de la riera de Magarola registra valores de lluvia acumulada por encima de los 150 mm, lo que le convierte en un episodio de gran relevancia. Cabe indicar que las precipitaciones mostradas en la Figura 5 deberían coincidir con la suma de las mostradas en la Figura 4. Ello no se verifica de una forma rigurosa. La razón de esta discrepancia es que la Figura 5 incluye el dato del pluviómetro de El Bruc (situado en la parte central de la cuenca), mientras que en la Figura 4 no es posible tener en cuenta este punto ya que en él sólo se miden precipitaciones diarias totales.

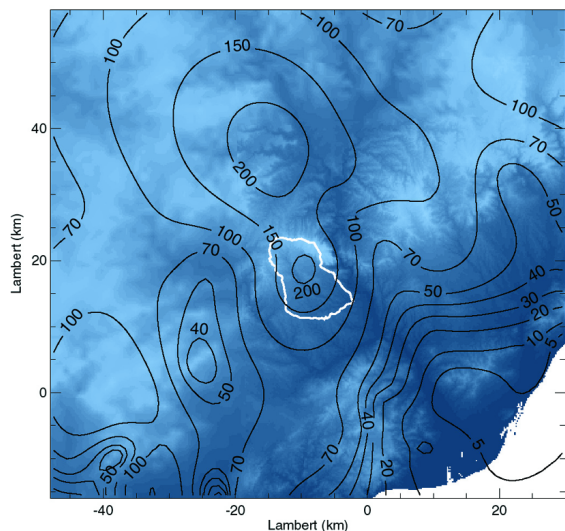


Figura 5: Lluvia acumulada del episodio (en mm) a partir de todos los datos pluviométricos disponibles. Coordenadas en km de distancia al radar.

Finalmente la Figura 6 presenta la distribución espacial de las precipitaciones máximas registradas en 2 horas, calculada a partir de los pluviógrafos disponibles. En este gráfico se muestra como las precipitaciones máximas se distribuyen en forma de banda, evidenciando la posibilidad de que Montserrat y el eje del Llobregat actuasen como factor físico determinante al focalizar durante un tiempo considerable la precipitación intensa sobre la zona de la cuenca de la riera de Magarola. Por otro lado, teniendo en cuenta la lluvia total correspondiente al episodio (figura 5), los valores máximos acumulados en dos horas confirman que, tal y como ya se veía en las Figuras 3 y 4, un porcentaje notable de la lluvia cayó en un corto periodo de tiempo.

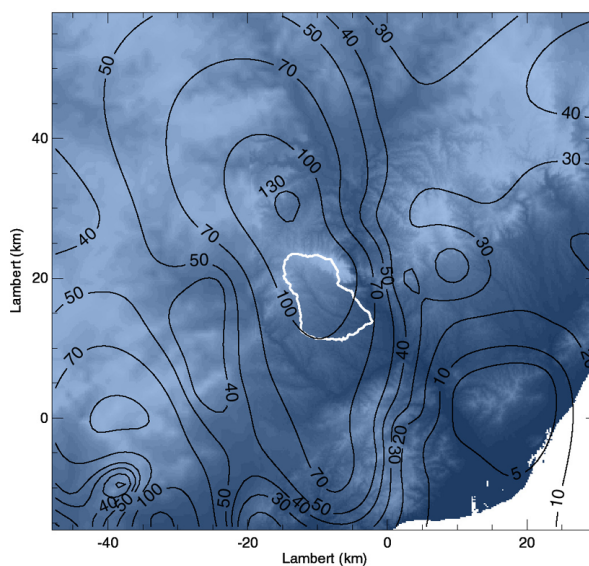


Figura 6: Distribución de la lluvia máxima acumulada del episodio en dos horas (en mm). Coordenadas en km de distancia al radar.

Cálculo del período de retorno

Para calcular el periodo de retorno de la lluvia registrada, es preciso disponer de series de datos suficientemente largas como para poder asegurar una inferencia estadística fiable. Por ello tan solo se deberían utilizar series con 20 o más años de datos, lo que reduce los puntos disponibles a algunos pluviómetros totalizadores del INM. Eso implica que solo se puede calcular el periodo de retorno de la lluvia de 24 horas, que es la variable que se mide en dichas estaciones, aunque según lo visto en el apartado anterior, la mayor parte de la precipitación cayó en un período del orden de 2 horas.

En esos puntos se ha utilizado el análisis realizado por el INM para el cálculo de los volúmenes de lluvia diaria asociados a diferentes periodos de retorno en las comunidades autónomas de España (INM, 1999a). Este análisis se basa en una metodología de cálculo similar a la utilizada por Elías Castillo y Ruiz Beltrán, 1979, fue propuesta por Chow, 1951; 1953 (ver INM, 1999b).

Aunque bien es verdad que existe una gran variedad de métodos para realizar este cálculo, hemos decidido utilizar estrictamente el estudio publicado por el INM, renunciando explícitamente al reanálisis de los datos históricos. Con esta decisión no pretendemos ocultar que las revistas especializadas están llenas de metodologías alternativas, y que existe una discusión abierta sobre los diferentes aspectos del procedimiento estadístico de estimación de valores extremos (bondad del estimador de probabili-

Tabla 2: Periodos de retorno de la lluvia recogida en 24h (de 8h a 8h) estimados aplicando la metodología de ajuste de la distribución de Gumbel utilizada por el INM, 1999a. Además del valor del periodo de retorno (T) estimado para el episodio, se dan los valores de lluvia (en mm) asociados a diferentes valores de T, así como el intervalo de confianza del 90% del cálculo.

ANÁLISIS PUBLICADOS EN LA MONOGRAFÍA DE CATALUÑA (INM, 1999a)										
Estación		Pd (mm)		Periodo	Nº de datos (años)	Pd (mm) asociada a T (años)				T estimado
		10/06	11/06			T=50	T=100	T=250	T=500	
0-158O	Montserrat Abadía	161,1	9,5	1970-87	18	167 ±46	187 ±54	213 ±64	232 ±72	40
0-161	El Bruc	210**	-	1948-87	40	143 ±26	159 ±30	180 ±35	196 ±40	>500
0-180	St. Quintí de Mediona	55,0	3,1	1941-90	50	135 ±20	149 ±24	168 ±28	182 ±32	<2
0-181	St. Sadurní d'Anoia	86,8	4,4	1972-87	16	123±32	136±37	153±44	166±49	7

ANÁLISIS NO PUBLICADOS EN LA MONOGRAFÍA DE CATALUÑA (INM, 1999a)										
0-163A	Esparreguera	160	0,3	1979-90	12	114 ±29	125 ±34	139 ±41	149 ±46	1000
0-161	Simulación de El Bruc (1979-1990)	210**	-	1979-90	12	129 ±39	143 ±46	161 ±55	174 ±62	3000

ANÁLISIS CON LAS SERIES COMPLETAS										
Estación		Pd (mm)		Periodo	Nº de datos (años)	Pd (mm) asociada a T (años)				T estimado
		10/06	11/06			T=50	T=100	T=250	T=500	
0-158O	Montserrat Abadía	161,1	9,5	1970-2000	31	161 ±33	180 ±38	204 ±46	222 ±51	50
0-161	El Bruc	210**	-	1948-2000	53	156 ±26	175 ±30	200 ±36	218 ±40	350
0-180	St. Quintí de Mediona	55,0	3,1	1941-2000*	58	134 ±19	148 ±22	167 ±26	181 ±29	<2
0-181	St. Sadurní d'Anoia	86,8	4,4	1972-2000*	23	119±24	131±28	146±33	158±38	7
0-163A	Esparreguera	160	0,3	1979-2000	22	145 ±33	160 ±38	181 ±45	196 ±51	100
0-161	Simulación de El Bruc (1979-1990)	210**	-	1979-2000	22	180 ±48	203 ±57	233 ±67	255 ±76	125

* Series con ausencia de algún dato

** Valor medido, aunque el pluviómetro llegó a verter

dad, idoneidad o no de la función de distribución de Gumbel, método de ajuste, método de cálculo del intervalo de confianza o del factor de corrección del sesgo, etc.); pero en el marco de este trabajo creemos de interés tomar como base el estudio realizado de forma exhaustiva sobre toda España por el INM.

A partir de estos datos, y recordando que la variable analizada es la lluvia recogida entre las 8h del día anterior y las 8h del presente, se puede asociar los siguientes periodos de retorno a los datos de lluvia disponibles (ver Tabla 2).

A la luz de los resultados, se pueden hacer los siguientes comentarios:

1) El valor de 210 mm de El Bruc es el medido por el observador responsable de la estación, aunque consta que el pluviómetro llegó a verter. Por ello es un límite inferior de la lluvia realmente recogida, que resulta pues desconocida, aunque la riqueza y la coherencia espacial de los datos disponibles parecen indicar que no se haya superado notablemente dicho valor.

2) Para el cálculo del periodo de retorno del episodio sobre la cuenca de la riera de Magarola se dispone esencialmente de las series de El Bruc y de la Abadía de Montserrat. Las series de St. Quintí de Mediona y St. Sadurní d'Anoia se pueden utilizar de forma complementaria, pero tienen poca influencia al estar alejadas de la cuenca.

3) En las series de El Bruc y de la Abadía de Montserrat se aprecia una ligera tendencia a que los puntos no se alineen en papel Gumbel, aunque también en ambos casos los puntos están dentro del intervalo de confianza simétrico obtenido a partir de la desviación típica del valor estimado, calculada por la fórmula de Kite (1977) (ver INM, 1999a y Figura 7).

4) A la vista de las pocas series históricas disponibles, y de la existencia del pluviómetro de Esparreguera (que no fue incluido en la monografía del INM al tener una serie excesivamente corta, 12 años en 1990), hemos creído conveniente, a pesar de la incertidumbre asociada, analizar este punto en razón a su importancia para poder completar el análisis del periodo de retorno sobre la cuenca de la riera de la Magarola.

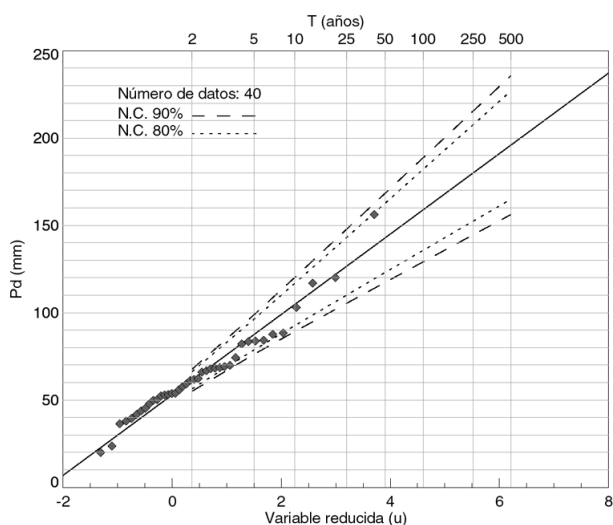


Figura 7: Ajuste de la función de distribución de Gumbel sobre los datos de precipitación diaria en la estación de El Bruc según la monografía del INM 1999. Se incluyen los límites para los intervalos de confianza del 80% y del 90%. Aunque en papel Gumbel se aprecia una cierta curvatura de la distribución (se ha utilizado el estimador de frecuencia acumulada de Weibull), todas las observaciones están dentro del intervalo de confianza calculado. El valor del test χ^2 para 7 clases equiprobables es de 3.2, cuando $\chi^2_{4, 0.90} = 7.8$.

Para ello se ha solicitado al Centre Meteorològic Territorial de Catalunya (CMTC) los datos de la serie histórica, y se le ha aplicado la metodología seguida en la monografía de referencia, obteniéndose los valores que figuran en la Tabla 2. El resultado obtenido en este emplazamiento resulta sorprendente, ya que sistemáticamente para todos los periodos de retorno analizados se estiman valores de lluvia significativamente inferiores a los de las estaciones vecinas, sin que aparentemente haya ninguna razón climática que permita justificarlo. Para analizar esta anomalía, hemos rehecho el análisis de la serie de El Bruc (muy próxima y con más del doble de puntos) tomando tan sólo los datos correspondientes a los años en los que ha funcionado el pluviómetro de Esparreguera. El resultado de esta simulación (ver Tabla 2), confirma que esta serie está fuertemente sesgada al restringirse a un periodo con máximos anuales especialmente bajos. Obsérvese que entre la serie simulada y la original de El Bruc se da un claro descenso en el valor de las precipitaciones asociadas a los diferentes periodos de retorno, un aumento en los intervalos de confianza y una sobreestimación importante del periodo de retorno del episodio del 10 de junio. Por lo tanto creemos que la serie de Esparreguera no debería utilizarse al estar cuestionada su representatividad.

5) Los intervalos de confianza calculados pueden parecer muy grandes, pero reflejan el margen de imprecisión usual de este tipo de estimaciones. Como se recoge en la Tabla 2, algunas de las series disponibles son muy cortas frente al periodo de retorno a estimar. Entre otras cosas, esto lleva a que la obtención de los valores de lluvia asociados a diferentes periodos de retorno tenga una imprecisión, a veces muy importante, que por supuesto repercute en el intervalo de confianza de la estimación final del periodo de retorno del episodio.

Con los datos obtenidos se ha realizado una cartografía de la distribución espacial del periodo de retorno, T, asociado a la lluvia recogida en 24h el día 10 de Junio sobre la cuenca de la riera de Margarola (ver Figura 8). Para ello, utilizando la información de la Tabla 2, se ha calculado en cada punto de la cuenca la probabilidad de excedencia de la lluvia recogida en 24h (de 8h del día 9 a las 8h del día 10), estimada por interpolación a partir de todos los sensores de la red pluviométrica disponibles. Esta lluvia prácticamente coincide con la del episodio aquí analizado tal y como puede observarse en la Tabla 2, donde se detallan las precipitaciones correspondientes a los días 10 y 11. En la Figura 8 queda claro que la parte central de la cuenca registró precipitaciones muy intensas, con periodos de retorno por encima de los 500 años (probabilidad de excedencia anual inferior al 0.2%). Sin embargo dicha estimación debe de entenderse como un valor aproximado dentro del entorno de variación dado por los límites del intervalo de confianza que, como se ve en la Tabla 2, son muy grandes.

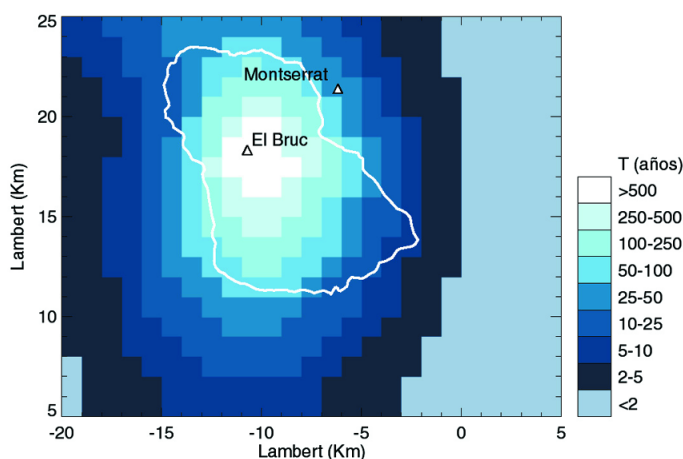


Figura 8: Distribución del periodo de retorno del episodio, calculado a partir de la estimación de la lluvia recogida en cada punto y del cálculo de su probabilidad de excedencia utilizando los datos publicados en la monografía del INM, 1999a.

A partir de la distribución espacial presentada en la Figura 8 se puede estimar que el periodo de retorno del episodio en media sobre la cuenca es de aproximadamente $T_{\text{cuenca}} = 200$ años. Este valor está afectado por la notable incertidumbre estadística debida al hecho de utilizar series de datos con un número reducido de observaciones (< 100 años) para estimar periodos de retorno elevados.

Es de interés recordar que el aquí análisis realizado hubiera podido ser hecho en 1990 (la publicación del INM sólo utiliza datos hasta 1990). Posiblemente el añadir los datos de la década de los 90, no utilizados en el estudio de referencia, permitirá reducir el intervalo de confianza. Aunque también es de esperar que afecte a la propia estimación (en estos años ha habido varios periodos de marcada tendencia a la sequía y se está haciendo un análisis de máximos anuales). Sin embargo en este caso, creemos que la inclusión de nuevos datos debería contemplar también la inclusión del propio episodio del 10 de Junio (dado el reducido número de observaciones con las que se trabaja no nos parece que haya ninguna razón para renunciar a un dato significativo, si lo que se pretende es caracterizar bien la serie). Así mismo parecería justificado realizar un análisis exhaustivo que permitiese comprobar la estabilidad de la serie y la bondad del ajuste de Gumbel. Estudio que excede el objetivo de este artículo.

Sin embargo, sí hemos creído interesante preguntarse cuál sería el resultado de aplicar el mismo método a la totalidad de los datos disponibles, es decir cuál sería la estimación que haríamos hoy pensando en el futuro si mantenemos el método utilizado. Para ello se han solicitado al CMTC los datos necesarios y de nuevo se ha aplicado el mismo método de referencia a las series extendidas obteniendo los resultados consignados en la Tabla 2.

Es de destacar que en algunos casos, como en Montserrat, la adición de esos 13 años de datos mejora notablemente la calidad de la serie, aunque se sigue apreciando la curvatura ya mencionada, y curiosamente no hace variar sensiblemente la estimación del periodo de retorno del episodio (que pasa de 40 a 50 años).

En el caso de Esparreguera esa curvatura no se aprecia, y el valor máximo registrado se sitúa en el límite de confianza de la estimación, lo que se ha de analizar sin olvidar las dudas expresadas anteriormente sobre esta serie. Los valores de lluvia para los diferentes periodos de retorno calculados son ahora más coherentes con los obtenidos en las estaciones

vecinas, pero el salto del periodo de retorno calculado de 1000 a 100 años vuelve a mostrar la prudencia con la que se ha de tratar esta serie. Además, la repetición del estudio de simulación a partir de los datos de El Bruc confirma a nuestro entender que los datos de Esparreguera no deberían de utilizarse.

En el pluviómetro de El Bruc (ver Figura 9) la no-linealidad de las observaciones se acentúa mucho más, pareciendo que exista una doble tendencia sobre papel Gumbel, de tal manera que incluso algunas observaciones se salen del intervalo de confianza (comparar con la Figura 7), pasando el valor del test de χ^2 con 7 clases equiprobables a 8.4 cuando el valor de referencia $\chi^2_{4, 0.90}$ es de 7.8.

Si, a pesar de la duda razonable sobre la bondad de un ajuste tipo Gumbel para este caso, utilizamos ahora los valores obtenidos analizando las series completas (incluido el propio episodio, pero sin considerar Esparreguera) para rehacer la distribución de los periodos de retorno asociados a la lluvia caída sobre la cuenca, obtenemos la Figura 10. Comparándola con la Figura 8 se observa una distribución espacial muy parecida, aunque los valores del máximo se han reducido sensiblemente.

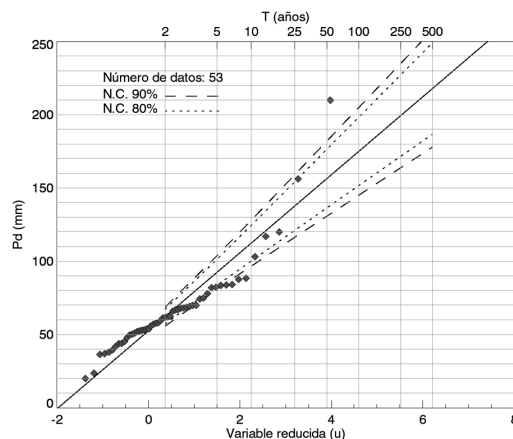


Figura 9: Ajuste de la función de distribución de Gumbel sobre los datos de la serie completa de El Bruc (datos desde 1948 a 2000). El gráfico en papel Gumbel insinúa la existencia de una doble tendencia. El valor del test χ^2 para 7 clases equiprobables es de 8.4, cuando $\chi^2_{4, 0.90} = 7.8$

De todo ello podemos deducir que si con los datos disponibles a día de hoy tuviéramos que hacer la estimación del periodo de retorno del episodio aplicando el método de la monografía de referencia, encontraríamos un valor medio sobre la cuenca del periodo de retorno del episodio algo superior a $T_{\text{cuenca}} = 100$ años.

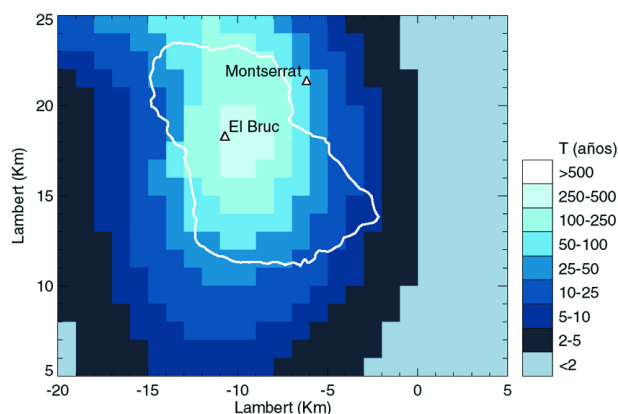


Figura 10: Distribución del periodo de retorno estimado para la lluvia recogida sobre la cuenca, calculado a partir de la lluvia estimada por la red de pluviógrafos y del cálculo de su probabilidad de excedencia a partir de las series completadas hasta el año 2000.

Conclusiones

A partir de los datos disponibles se ha analizado el episodio pluviométrico registrado el 10 de junio de 2000 sobre Cataluña. En particular se estudia la cuenca de 97 km² correspondiente a la riera de Magarola en su cruce con la autovía N-II en Esparreguera (Barcelona).

Los datos del radar meteorológico y los campos de lluvia interpolada a partir de los pluviógrafos presentan una semejanza notable, mostrando ambos la gran variabilidad espacial y temporal de este tipo de tormentas convectivas. En particular, el uso del radar permite comprender la remarcable persistencia de la estructura de la banda de lluvia y el destacado papel jugado por la montaña de Montserrat en esa persistencia.

A falta de un estudio más profundo que posibilite la utilización cuantitativa de los datos radar, la red de pluviógrafos permite asegurar que, aunque el máximo del episodio se registró fuera de la cuenca de la riera de Magarola, sobre la mayor parte de ella se recogieron más de 150 mm de lluvia acumulada en el episodio, sobrepasándose en el entorno de El Bruc los 210 mm. La mayor parte de esa lluvia se produjo en un periodo de unas dos horas.

El cálculo del periodo de retorno asociado a la lluvia de 24 h con los datos disponibles en el estudio por regiones del INM (series hasta el año 1990) permite confirmar la naturaleza excepcional del episodio, con un periodo de retorno medio para la cuenca de unos 200 años y con una zona central alrededor de la estación de El Bruc en la que se superaron los 500 años.

Un segundo análisis, utilizando la totalidad de los datos disponibles a día de hoy (incluido el propio episodio) y aplicando el mismo procedimiento que en el caso anterior, permite concluir que a pesar de los cambios introducidos lo esencial del análisis se mantiene: el episodio sigue siendo excepcional, con un periodo de retorno medio sobre la cuenca algo superior a los 100 años y con una zona central donde se superaron los 250 años. Sin embargo este análisis ayuda a poner de manifiesto el interés de realizar un estudio más profundo sobre la idoneidad de la metodología utilizada.

Finalmente se ha de insistir en que la información histórica disponible en este caso es, como en muchos otros, insuficiente, y que sólo permite realizar estimaciones con una gran incertidumbre. Además de la insatisfacción que este tipo de constatación comporta, entendemos que es necesaria una reflexión sobre la precisión con la que se pueden determinar los valores asociados a elevados periodos de retorno, por ejemplo 500 años, cuando sólo disponemos de una ventana de datos que en nuestro país es difícil que pueda ir más allá de los 50 años. Y esto sin poner en cuestión la necesidad de tener un procedimiento riguroso para calcular lo que, por convención, consideramos un aspecto clave del diseño hidrológico: el periodo de retorno asociado a un determinado episodio.

Agradecimientos

Este trabajo se ha desarrollado dentro de la colaboración entre la UPC y el INM y específicamente en el marco del proyecto CICYT del Plan Nacional del Clima CLI99-1240-C02. Para realizarlo se han utilizado datos cedidos por el Servei de Meteorologia de Catalunya, el SAIH y el INM. También se ha contado con la valiosa ayuda de Enric Velasco, de l'Agència Catalana de l'Aigua, del Padre Ramón Oranias de la Abadía de Montserrat, y especialmente con la de Ramón Pascual, Santi Valios y Sara Satué del Centre Meteorològic Territorial de Catalunya. Finalmente le debemos un especial reconocimiento a Miguel Lara, quién nunca ha dejado de confiar en nosotros desde que comenzamos a estudiar el radar meteorológico, hace ya diez años.

Referencias

- Beven, K. y Kirkby, M. J. (1979) A physically-based variable-contributing area model of basin hydrology. *Hydrol. Sci. Bull.*, 24 (27-53), 27-53.
- Chow, V. T. (1951) A general formula for hydrologic frequency analysis. *Trans. Am. Geophysical union*, 32 (2), 231-237.
- Chow, V. T. (1953) Frequency analysis of hydrologic data with special application to rainfall intensities. University of Illinois Eng. Expt. Station, USA.
- Creutin, J. D. y Obled, C. (1982) Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: an objective comparison. *Water Resour. Res.*, 18 (2), 413-431.
- Dubrule, O. (1984) Comparing splines and kriging. *Comput. Geosci.*, 10 327-338.
- Duchon, J. (1976) Interpolation des fonctions de 2 variables suivant le principe de la flexion des plaques minces. *Rev. Automat. Inf. Rech. Oper.*, 10 (12), 5-12.
- Elías Castillo, F. y Ruiz Beltrán, L. (1979) Precipitaciones máximas en España. Estimaciones basadas en métodos estadísticos. ICONA, Madrid.
- INM (1999a) Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno en España. Cataluña. Vol. 5. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- INM (1999b) Las precipitaciones máximas en 24 horas y sus periodos de retorno en España. Introducción y Metodología. Vol. 0. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Kite, G. W. (1977) Frequency and risk analysis in hydrology. Water Resources Publications, Fort Collins, Co., USA.
- Martín, F. y De Esteban, L. (1994) Manual de interpretación radar. Publicación interna del INM. STAP (INM), Madrid.
- Rinehart, R. E. (1999) Radar for meteorologists. Rinehart Publishing, 428 pp.
- Rosengaus, M. (1995) Fundamentos de radares meteorológicos: aspectos clásicos. *Ingeniería Hidráulica en México*, X (1), 55-74.
- Sánchez-Diezma, R. (2000) Optimización de la medida de lluvia por radar meteorológico para su aplicación hidrológica. Universitat Politècnica de Catalunya, Proyecto de Tesis Doctoral, Informe EHMA/33051501-01/200001.
- Sempere Torres, D., Corral, C., Malgrat, P. y Raso, J. R. (1999) Use of weather radar for combined sewer overflows monitoring and control. *Journal of Environmental Engineering, ASCE*, 125 (4), 372-380.
- Zawadzki, I. (1984) Factors affecting the precision of radar measurement of rain. *Proceedings of the 22 Conference on radar meteorology. American Met. Society*, pp. 251-256.

