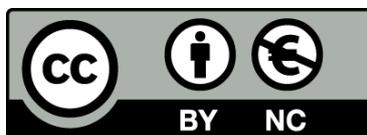




UNIVERSITAT DE
BARCELONA

Estudio de sistemas convectivos mesoscalares en la zona mediterránea occidental mediante el uso del radar meteorológico

Tomeu Rigo Ribas



Aquesta tesi doctoral està subjecta a la llicència **Reconeixement- NoComercial 4.0. Espanya de Creative Commons**.

Esta tesis doctoral está sujeta a la licencia **Reconocimiento - NoComercial 4.0. España de Creative Commons**.

This doctoral thesis is licensed under the **Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0. Spain License**.

5. Análisis de la precipitación convectiva

En este capítulo se presentan los diferentes trabajos realizados en el análisis de la precipitación debida a estructuras de carácter convectivo. Se han utilizado dos herramientas para realizar el análisis: la red de pluviómetros del SAIH de las Cuencas Internas de Catalunya y el radar meteorológico de Barcelona del INM. Se han analizado por separado las características de la precipitación convectiva vista desde los pluviómetros y desde el radar, como la comparación de ambos.

5.1. El parámetro beta (β) aplicado a los pluviómetros del SAIH

5.1.1. Presentación del trabajo: análisis de mapas diarios

Para el total de días incluidos dentro del período de trabajo se ha calculado la precipitación acumulada y el parámetro beta. Los umbrales utilizados para clasificar los episodios se han considerado también para clasificar los valores diarios. En la figura 5.1 puede apreciarse un ejemplo de cómo en muchos casos los valores máximos de precipitación no coinciden plenamente con las áreas donde se da el máximo de precipitación convectiva. Por lo tanto, el parámetro es un claro indicativo de si la precipitación registrada en una zona se debe a actividad convectiva y, por otra parte, cuan intensa es la precipitación registrada.

En el ejemplo se observa como los máximos de precipitación se dieron en el norte de la región, con valores superiores a los 10 mm en todos los pluviómetros. Sin embargo, en casi la mitad de las CIC no hubo precipitación que superase la intensidad umbral considerada. Y, por último, en aquellos puntos donde sí se superó el umbral mínimo, los valores de los máximos del parámetro β se dan en el litoral y son relativamente bajos (inferiores a 0.3, valor superado en muchos otros días).

A continuación se presentan dos análisis diferentes del parámetro beta, para episodios y para valores diarios, según el carácter convectivo (ligeramente, moderadamente y fuertemente) que se ha registrado, tanto máximo, como por zonas afectadas (figura 4.5).

5. Análisis de la precipitación convectiva

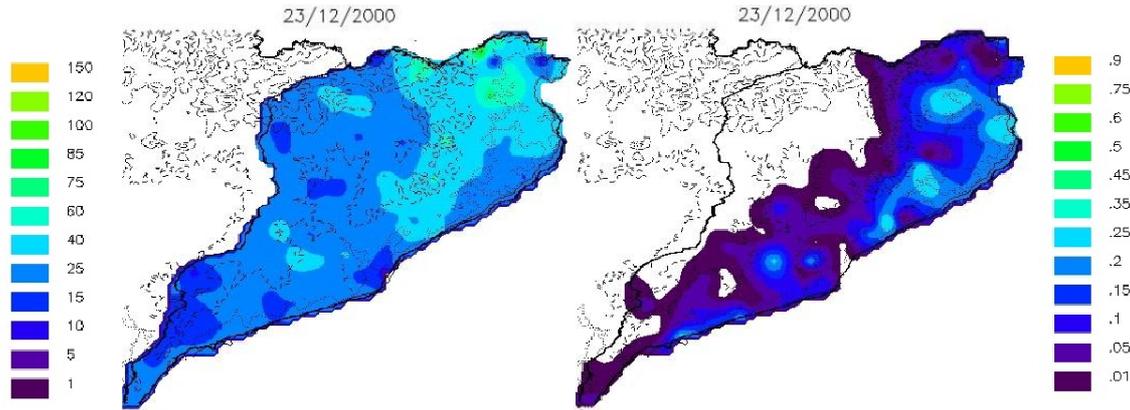


Figura 5.1. Ejemplo de precipitación diaria (23 de diciembre de 2000), a la izquierda, y del campo del parámetro β (derecha)

El primer análisis se refiere al número de días en los que se ha registrado precipitación convectiva. Para el período de 1996-2000, en un total de 472 días (25.83 %) el valor de la β fue superior a cero en alguna de las 126 estaciones pluviométricas del SAIH. En la mayoría de los casos, el parámetro beta alcanza la categoría de fuertemente convectivo (65.68 %), mientras que en un 31.99 % de los casos se puede considerar como un día moderadamente convectivo. Por lo tanto, únicamente un 2.33 % el día ha sido identificado como convectivamente débil. Es decir, podemos considerar que en la gran mayoría de días en los que existe precipitación convectiva, éstos son fuertemente o, como mínimo, moderadamente convectivos.

Estacionalmente, el período JJA fue cuando se registró el valor medio de beta más elevado (0.87), seguido muy de cerca por SON (0.86). MAM también puede considerarse fuertemente convectivo en promedio, con un valor de 0.81, mientras que DEF registra el valor de beta inferior (0.70). Además de ser el período con un valor promedio de β más elevado (para los días en los que el valor es no nulo), JJA es el que tiene un porcentaje de días convectivos más elevado (39.41 %). MAM y SON tienen un porcentaje muy similar, próximo al 23 %, mientras que DEF presenta únicamente el 13.98 % de los casos. Por lo tanto, JJA es el período más activo y, además, más fuertemente convectivo, todo lo contrario que DEF.

Refiriéndonos al análisis del parámetro en los episodios, el trabajo se ha dividido en diferentes partes: una primera más general, citando las características elementales, a continuación un estudio estacional, y, finalmente, un intento de clasificación de los episodios según las zonas afectadas y el grado de precipitación convectiva.

Ningún episodio de lluvias fuertes analizado en este trabajo ha registrado una precipitación convectiva de carácter débil, aunque no todos los casos han presentado una precipitación convectiva de tipo fuerte (aunque sí se ha dado en la gran mayoría: un 75%). Si analizáramos los porcentajes por zonas, tenemos que la más afectada por precipitación muy

5. Análisis de la precipitación convectiva

convectiva es la Central (afectada un 55.81% de los episodios por este tipo de precipitación, y un 30.23 % por precipitación moderada), seguida de la de Girona Central (con porcentajes de 46.51 % y 32.56 %, respectivamente). En el extremo opuesto tenemos la zona del NE (27.91 % y 44.19%) y la Costa Central (27.91 % y 32.56 %), aunque también cabe decir que son, junto al Maresme, zonas con menor número de pluviómetros.

En pocos casos todas las zonas se vieron afectadas por intensidades elevadas. Sin embargo, esto no quiere decir que no se registrase precipitación (incluso en una gran cantidad acumulada), si no que la lluvia se registró de forma poco intensa y en períodos más largos. En la figura 5.2 se puede observar que los valores de precipitación total acumulada fue en bastantes puntos superior a los 100 mm (especialmente en la zona de los Pirineos), mientras que la beta no superó el valor de 0.6 (y nunca en la zona donde se dan los valores máximos de precipitación).

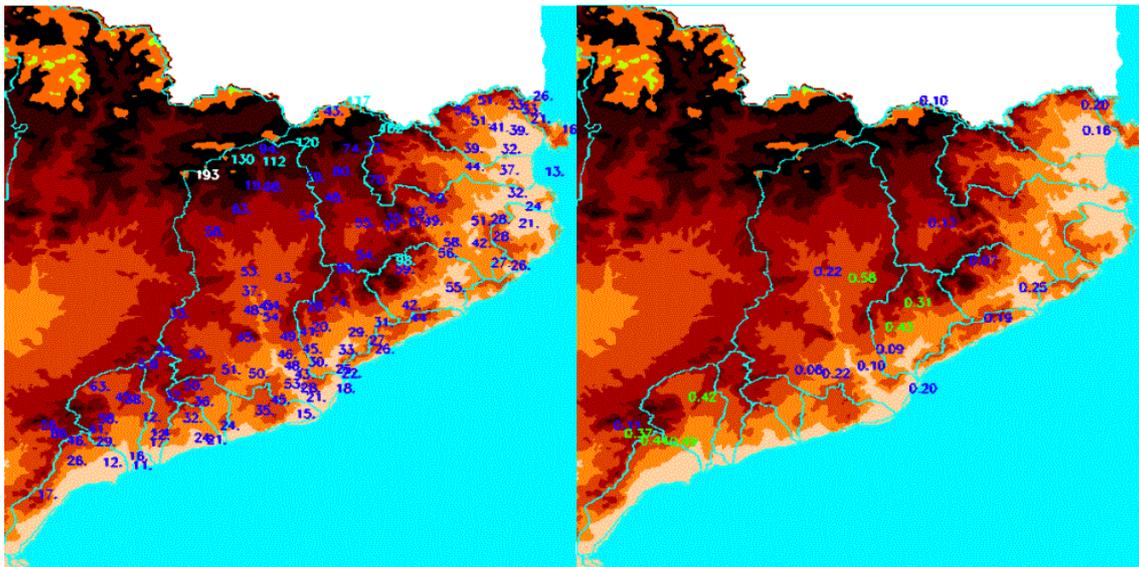


Figura 5.2. Episodio de 22-24 de enero de 1996. Valores de precipitación total acumulada (izquierda), y de beta (derecha).

Para realizar la clasificación de los episodios se han tenido en cuenta los siguientes aspectos: el número de zonas afectadas (considerada como zona afectada aquella en la que algún pluviómetro registra un valor de la beta no nulo), el tipo de precipitación convectiva máxima (fuerte o moderada) y, además, la distribución de las zonas afectadas y la duración.

La gran mayoría de episodios afectaron a bastantes zonas. En concreto, únicamente dos episodios afectaron a menos de 4 regiones, por lo que debemos considerar como anómalos los episodios muy localizados. Sin embargo, debemos tener en cuenta un aspecto que juega un papel muy importante en la conclusión anterior: la mayoría de episodios tienen una duración y

5. Análisis de la precipitación convectiva

un número de sub-episodios bastante grandes, por lo que dos zonas afectadas dentro de un mismo episodio lo hayan sido con una diferencia de 5 días y una situación meteorológica diferente. Sin embargo, en algunos de los episodios de mayor duración (figura 5.3) no se han visto afectadas todas las zonas, mientras que en otros que han durado relativamente poco (menos de dos días) la región completa ha resultado afectada. Por lo tanto, debe relativizarse el aspecto de la larga duración de los episodios.

La subdivisión de los episodios en períodos por intervalos de más de 1 hora en la cual no se registra precipitación ha revelado que la duración apenas tiene relación con el número de zonas afectadas en un sub-episodio. De todas maneras, en la subdivisión se han encontrado muchos casos en los que las zonas afectadas son inferiores a cuatro. Es por esto que se ha preferido trabajar con estos datos para realizar la clasificación. Se ha realizado una división de los sub-episodios según su duración, como se presenta en el capítulo 2 (igual o inferior a 6 horas, hasta 72 horas y por encima de los 3 días). La mayoría de sub-episodios (80.95 %) se encuentran dentro del segundo tipo, mientras que el resto se dividen entre el primero (14.29 %) y el tercero (4.76 %).

Para el **primer tipo**, predominan de forma casi totalitaria los ejemplos en los que se ve afectada una única zona (92.59 %), mientras que el resto son sub-episodios con dos zonas donde el parámetro beta fue no nulo (el promedio de zonas afectadas es de 1.07 zonas por sub-episodio). La duración media de este primer tipo de casos fue de 3 horas y media. Más del 67 % de los casos fueron fuertemente convectivos, mientras que el resto fueron moderados, siendo el promedio de la beta máxima igual a 0.81.

Para este tipo de episodios más breves deben remarcarse tres aspectos principales: el predominio de situaciones en JJA (51.85 %) y pocos casos en DEN (7.41 %); en segundo lugar, un grado de mayor intensidad convectiva en SON (el valor promedio de la β máxima 0.91) y JJA (0.85), mientras que en las otras dos estaciones no se supera el 0.75; y, por último, que la mayoría de los casos se registraron en las zonas situadas más al norte (especialmente en la zona de los Pirineos, donde en un 51.85 % del total de los casos se vio afectada, pero también las zonas del NE, Girona Central y Centro), mientras que en Maresme, Costa Central y N. Tarragona no se vieron afectados por ningún sub-episodio de estas características.

El **segundo tipo** de episodios cumple que la extensión abarcada es bastante superior a la que afecta a los episodios más breves, con un valor medio de 3.16 zonas por sub-episodio. Aquí también predominan los sub-episodios con menos de 3 zonas afectadas (49.67 %), pero hay bastantes situaciones donde entre 3 y 5 zonas superan el valor nulo del parámetro β (37.25 %), e incluso más de 5 zonas (13.07 %). La duración promedio de los episodios de la segunda categoría fue de casi 23 horas (por lo tanto, casi un día). Finalmente, lo que sorprende más de este tipo de situaciones es que el parámetro β alcanza valores más elevados en promedio que los

5. Análisis de la precipitación convectiva

casos breves (0.85). Sin embargo, los promedios de los episodios fuertemente y moderadamente convectivos son ligeramente inferiores (58.29 % y 35.62 %) a los episodios breves y aquí aparecen algunos episodios débilmente convectivos.

En los casos de duración moderada se observan características notablemente similares a las descritas en el anterior párrafo. En concreto, aunque el predominio de JJA aún es evidente (44.44 %), la distribución de las situaciones entre las diferentes estaciones es más uniforme. En este tipo de episodios hay tres estaciones (JJA, SON y MAM) en las que el valor promedio de la β máxima es superior a 0.85. En este tipo de situaciones, la probabilidad de que una zona se vea afectada es no nula para todas ellas, aunque nuevamente las cuatro zonas más septentrionales son las más afectadas (en este caso es Girona Central donde se da el máximo, con un 55.56 % de las situaciones en las que se ve afectada esta zona, sobre el total). Además, en la gran mayoría de casos en los que se ve afectada una de las zonas más norteñas, al menos en otra de las tres también se ve superado el valor cero del parámetro beta.

Para acabar, la **tercera categoría** de episodios es la de aquellos que tienen una larga duración. El número de zonas promedio por sub-episodio es el más elevado de los tres tipos: 5. La mayoría de estas situaciones afectan a 6 o más zonas, aunque también se dan algunos casos en los que una zona se ha visto afectada. Además, predominan las situaciones moderadamente (46.67 %) y débilmente (33.33 %) convectivas, siendo el valor promedio de la beta máxima de 0.74, bastante por debajo del resto de categorías. De media, estos casos duran casi 4 días, aunque algunos pueden llegar a superar los 5 días.

Finalmente, las situaciones más duraderas de precipitación muestran como en referencia a la estacionalidad hay un cambio radical respecto a los casos anteriores. JJA pasa a no tener ningún sub-episodio, mientras que el máximo se da en DEF (44.44 %). MAM es la única estación donde estos tipos de sub-episodios tienen un elevado componente convectivo (β máxima promedio cercana a la unidad), mientras en las otras estaciones el valor es bastante inferior. Al ser episodios que afectan a bastantes zonas simultáneamente, la mayoría de ellas registran valores destacables de aparición (por encima del 50 %), destacando especialmente S. Tarragona (100 % de participaciones) y Girona Central y Centro (con el 77.78 %).

5.1.2. Comparación de β con las descargas eléctricas

Gracias a la información proporcionada por el STAP del INM, ha sido posible realizar una verificación de la efectividad del parámetro. En concreto, se han comparado mapas diarios de β frente a los de descargas eléctricas (cabe mencionar que la red de detección de rayos del INM únicamente identifica descargas de nube a tierra (y al revés), pero no los rayos del tipo

5. Análisis de la precipitación convectiva

nube-nube. Se presentarán diferentes situaciones con características diferentes (por la extensión o por la localización de la zona afectada). Cabe decir que las imágenes anteriores a 1999 son de color blanco y negro, mientras que las posteriores vienen en diferentes colores (por franjas cuatro horarias) y diferenciando entre descargas positivas y negativas.

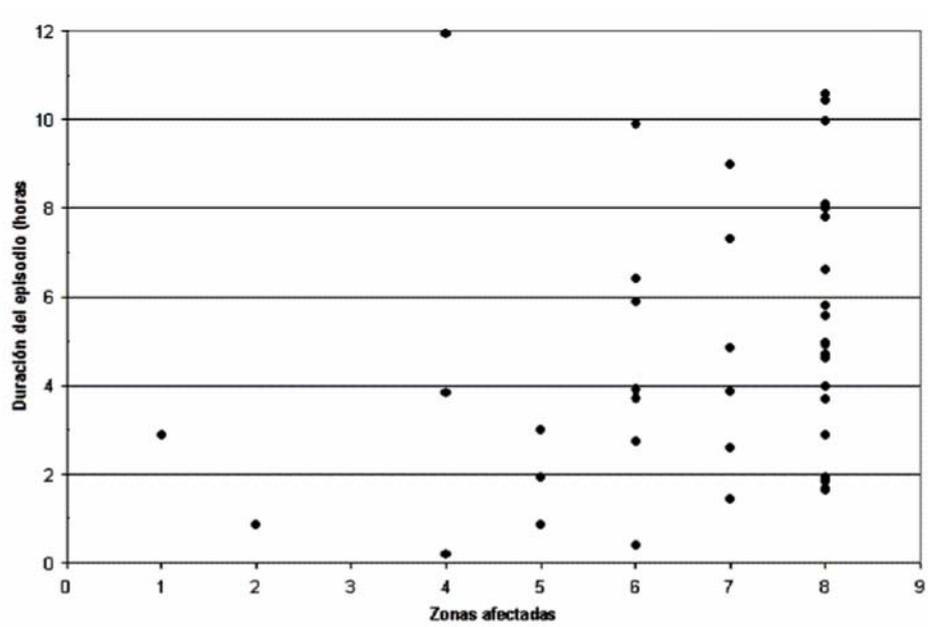


Figura 5.3. Duración de los episodios (en horas, eje y) frente al número de zonas afectadas con $\beta > 0$ (eje x)

En primer lugar, se presentan dos casos totalmente opuestos por la actividad convectiva. En el primero (10 de junio de 2000, figura 5.4) prácticamente en todo el territorio los valores del parámetro β fueron no nulos y en más de la mitad fueron bastante elevados. Comparando con el mapa de descargas las zonas afectadas por precipitación fuertemente convectiva y los rayos son prácticamente coincidentes. Por otra parte, en el caso del 14 de octubre de 1996 (figura 5.5) la precipitación convectiva no superó el grado de moderado y, además, en una línea paralela a la costa desde el S hasta el NE. Todas las descargas que se detectaron coinciden con la zona de los máximos de β . Por lo tanto, la distribución en superficie de la precipitación convectiva moderada y fuerte parece muy bien correlacionada con la situación de las descargas eléctricas para días donde prácticamente toda la región se ve afectada.

5. Análisis de la precipitación convectiva

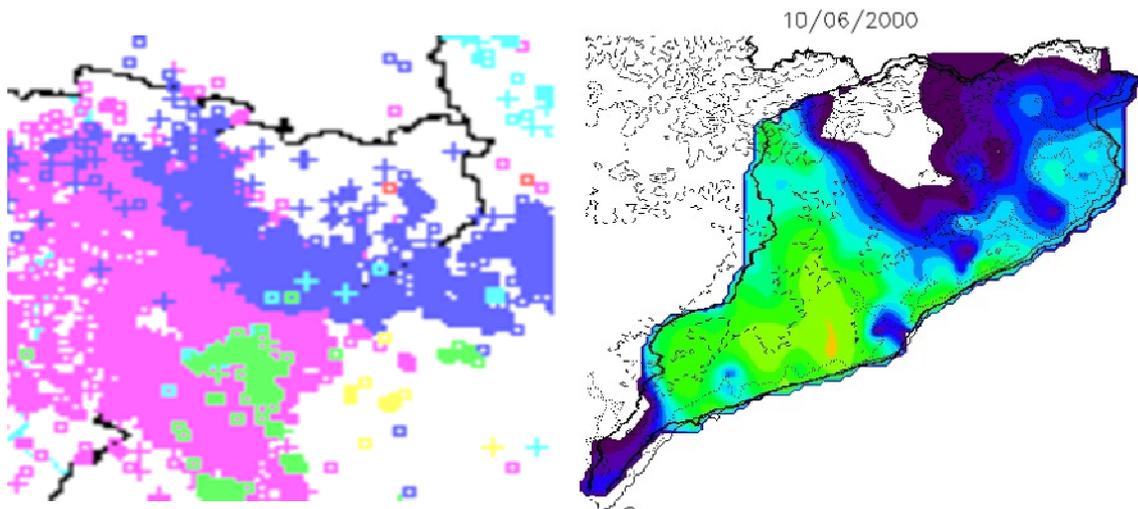


Figura 5.4. Comparación de la posición de las descargas eléctricas (izquierda) frente al campo del parámetro beta (derecha). Día 10 de junio de 2000

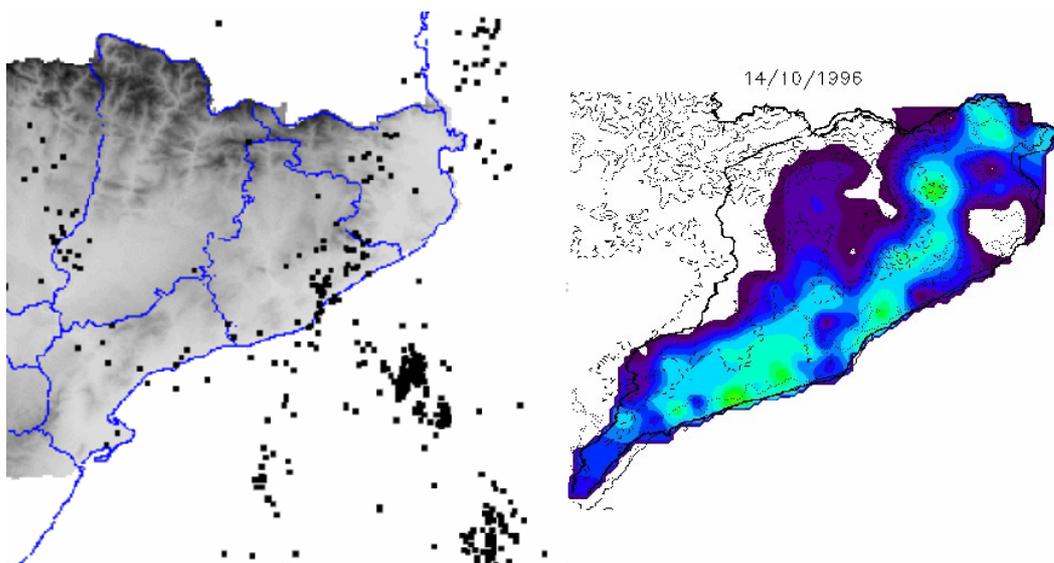


Figura 5.5. Igual que la figura 5.4 para el día 14 de octubre de 1996

Analizando días en que las zonas afectadas están muy localizadas en alguno de los extremos (28 de enero de 1996, figura 5.6, y 22 de octubre de 2000, figura 5.7) se aprecia nuevamente una clara relación entre pluviómetros con valores muy elevados (especialmente si se trata de fuertemente convectivos) y zonas donde se produjeron las descargas eléctricas más numerosas. Sin embargo, es posible detectar algún rayo en puntos donde no se identificó precipitación convectiva, aunque también es cierto que al ser precipitación poco extensa es también posible que no hubiera ningún pluviómetro cercano. En la parte opuesta se encuentra el hecho que, en ciertos lugares, se diera precipitación moderadamente convectiva y no se haya

5. Análisis de la precipitación convectiva

identificado ningún rayo (aunque también debe considerarse que la red del INM no detecta descargas nube-nube).

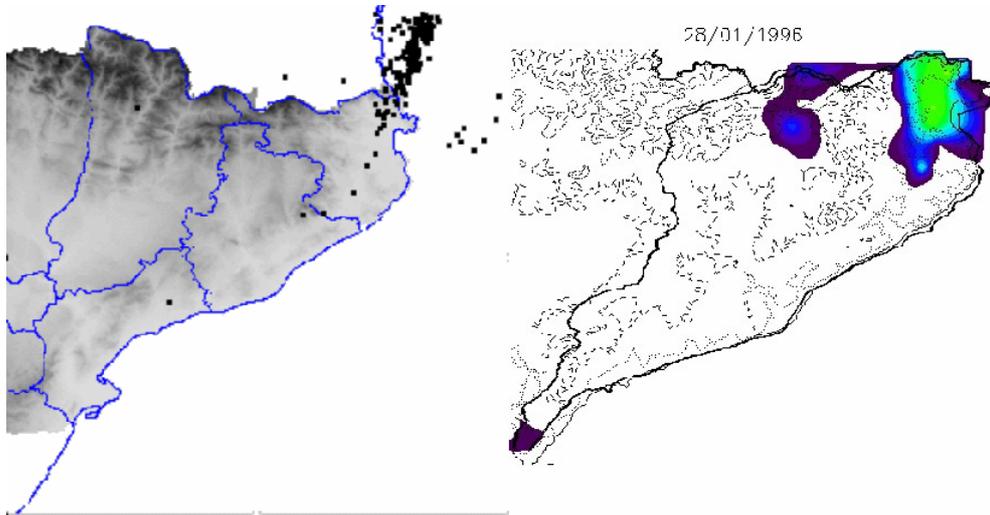


Figura 5.6. Igual que la figura 5.4 para el día 28 de enero de 1996

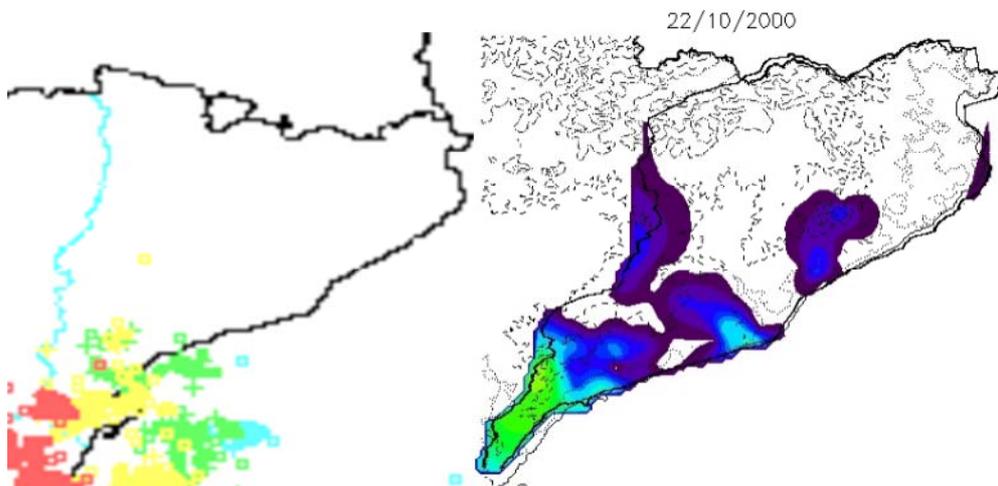


Figura 5.7. Igual que la figura 5.4 para el día 22 de octubre de 2000

Finalmente, se han comparado dos días (12 de noviembre de 1999, figura 5.8, y 3 de diciembre de 1998, figura 5.9) que tienen una clara diferencia: aunque en los dos casos hubo una gran actividad sobre el mar, destaca el hecho que o bien, en el caso del primero, tuvo una continuación sobre tierra o bien apenas se detectaron descargas sobre zona continental. Este aspecto presenta una limitación del parámetro: sólo puede ser aplicado en zonas donde haya una red de pluviómetros más o menos densa. Tampoco nos informaría de la evolución temporal

5. Análisis de la precipitación convectiva

de las estructuras convectivas, como presenta una información coloreada de los datos de rayos. Estos dos aspectos negativos no deben empañar la enorme utilidad del parámetro, tanto para realizar análisis climáticos de zonas más afectadas por la precipitación de carácter convectivo, como para realizar un seguimiento en tiempo real (tan real como permita la disponibilidad de los datos) de tormentas en zonas sin disponibilidad de radar (bien de forma habitual o simplemente por motivos técnicos) y también como elemento dentro de una herramienta más general que puede incluir información de sensores remotos (como detectores de descargas eléctricas, radar o satélite, entre otras).

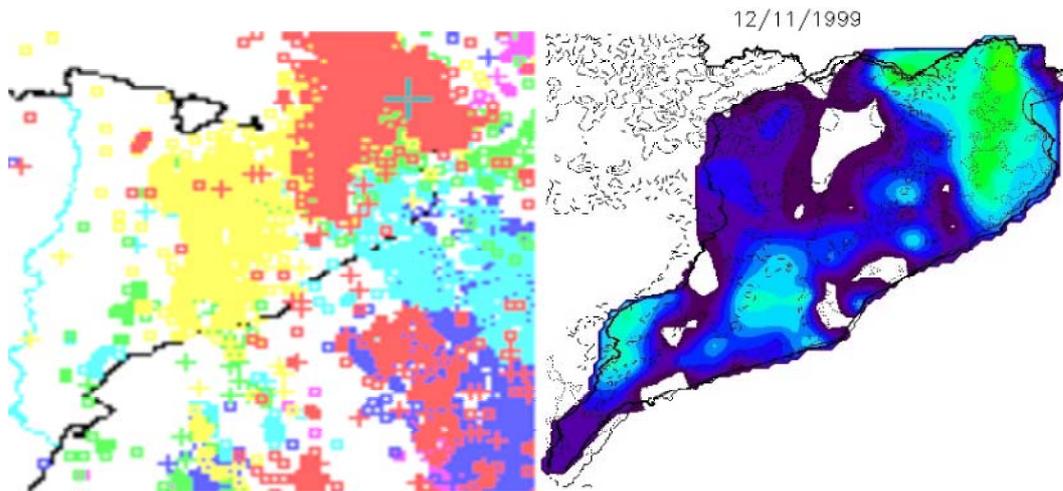


Figura 5.8. Igual que la figura 5.4 para el día 12 de noviembre de 1999

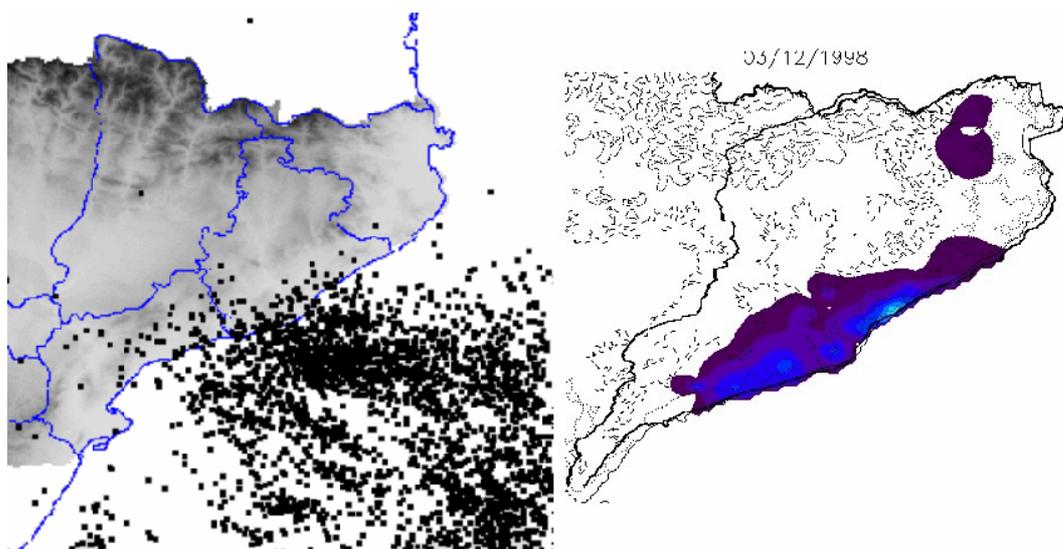


Figura 5.9. Igual que la figura 5.4 para el día 3 de diciembre de 1998

5.2. Identificación y clasificación de la precipitación mediante el radar

Una gran parte del trabajo mostrado en los tres siguientes apartados se presentó en los *proceedings* de la Conference on Mediterranean Storms, Plinius-2002 (Llasat and Rigo, 2002; Rigo and Llasat, 2002). Se trata de la utilización del radar para analizar la precipitación, especialmente la del tipo convectivo. En la primera parte de este apartado se muestran aspectos preliminares de la precipitación observada por el radar meteorológico del INM de Barcelona durante el período analizado y para los datos disponibles. A continuación, se presentan los resultados para los diferentes métodos utilizados y, por último, una reflexión sobre la predicción a corto plazo de la precipitación a partir de la utilización de métodos de advección.

5.2.1. Presentación de los datos radar

En primer lugar, se ha realizado una comparación (figura 5.10) entre los dos tipos diferentes de banda (S, antigua, y C, actual) con los que se ha trabajado con el radar, especialmente a la hora de ver como puede verse afectado el campo de precipitación por los diferentes fenómenos.

Considerando la distancia máxima (240 Km. al radar), se puede apreciar en la figura 5.10 como el efecto de ocultación del haz por la orografía es mucho más claro en la banda actual. Un claro ejemplo se aprecia detrás de la montaña de Montserrat (ligeramente al NO del radar): mientras que en el caso de la banda S la atenuación se aprecia de forma clara solamente a partir de los Pirineos, en el caso de la banda C ésta se inicia prácticamente detrás de la propia montaña. Sin embargo, el efecto del realce orográfico no es tan apreciable en la nueva banda del radar. Esto se observa de forma muy notable en la zona del Delta del Ebro y las cordilleras situadas al sur de éste (Ports de Beseit) y, por otra parte, en las diferentes dificultades orográficas de las Illes Balears (Serra de Tramuntana y Serra de Llevant, en Mallorca, así como la propia isla de Menorca). Por último, parece que en las zonas donde no aparece ningún efecto orográfico que perturbe la señal, ésta resulta más uniforme en el caso de la banda S, mientras que para la banda C existen algunas direcciones donde parece habitual una propagación anómala del haz radar.

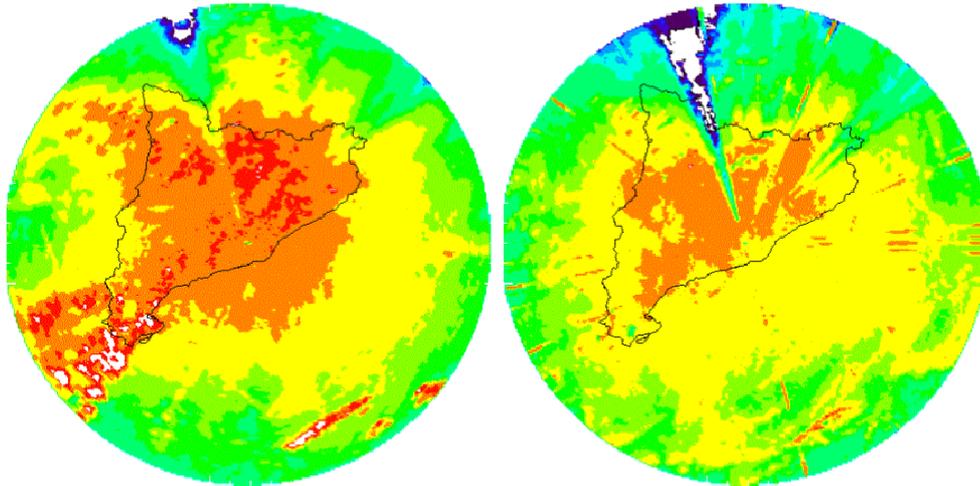


Figura 5.10. Comparación de acumulaciones de precipitación para 500 imágenes a partir de las dos bandas del radar disponibles (S, izquierda, y C, derecha). Se ha considerado la distancia máxima del radar (240 km)

Por lo que se refiere al rango de los 120 Km. más próximos al radar (figura 5.11), más conveniente para aplicar los diferentes procedimientos operativos, las características son similares. Para la banda S cabe señalar que la orografía realza de forma muy importante la señal del radar, especialmente para altitudes importantes y cercanas al radar, y también debe considerarse el efecto ya anunciado anteriormente en el Delta del Ebro. Por otra parte, para la banda C los efectos del realce de la señal por la orografía no son tan destacables, aunque sí pueden apreciarse ligeramente con las diferencias entre las zonas situadas a alturas más bajas y algunos sistemas orográficos. Sin embargo, en este caso se debe tener en cuenta que existe toda una zona detrás de Montserrat (y otras montañas en menor grado) donde el apantallamiento es bastante notable.

5.2.2. Resultados para los diferentes métodos utilizados para la clasificación de la precipitación convectiva

Para determinar el tipo de precipitación identificada por el radar se ha utilizado especialmente el método propuesto por Steiner et al. (1995), a partir de ahora SYH, y se ha comparado con la propuesta de mejora realizada por Biggerstaff y Listemaa (2000), que se conocerá como SYHBL, aunque sin considerar el fenómeno de la banda brillante, poco habitual en episodios convectivos.

5. Análisis de la precipitación convectiva

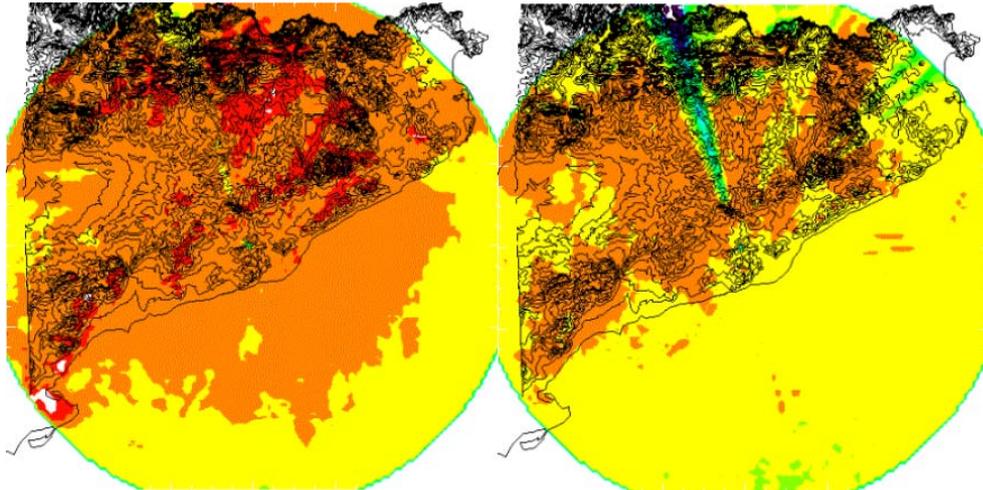


Figura 5.11. Comparación de acumulaciones de precipitación para 500 imágenes a partir de las dos bandas del radar disponibles (S, izquierda, y C, derecha). Se ha considerado la distancia al radar de 120 Km

Se ha dividido este apartado en dos partes. Primero, comprobar la diferencia entre los dos algoritmos (SYH y SYHBL), a parte de ver cual es la eficacia en diferentes situaciones. Por otra parte, se ha buscado que zonas se han visto más afectadas por precipitación para las imágenes disponibles de radar en los episodios de lluvias fuertes. Por lo tanto, la comparación con los datos de precipitación no es completa, ya que la información del radar no es la misma. Sin embargo, el número de imágenes disponibles (unas 5000) hace creer que los resultados obtenidos puedan ser considerados con un elevado grado de fiabilidad.

Como se puede apreciar en la figura 5.12, las diferencias entre los dos productos casi no son apreciables, exceptuando pequeñas regiones en las que lo que se había considerado inicialmente como precipitación convectiva se identifica en el segundo algoritmo como estratiforme. Resulta muy difícil clasificar como precipitación estratiforme aquella que procede de una estructura claramente convectiva, por lo que sería conveniente citarla como precipitación débil de origen convectivo o bien, como cita Steiner (1997), precipitación convectiva vieja.

5. Análisis de la precipitación convectiva

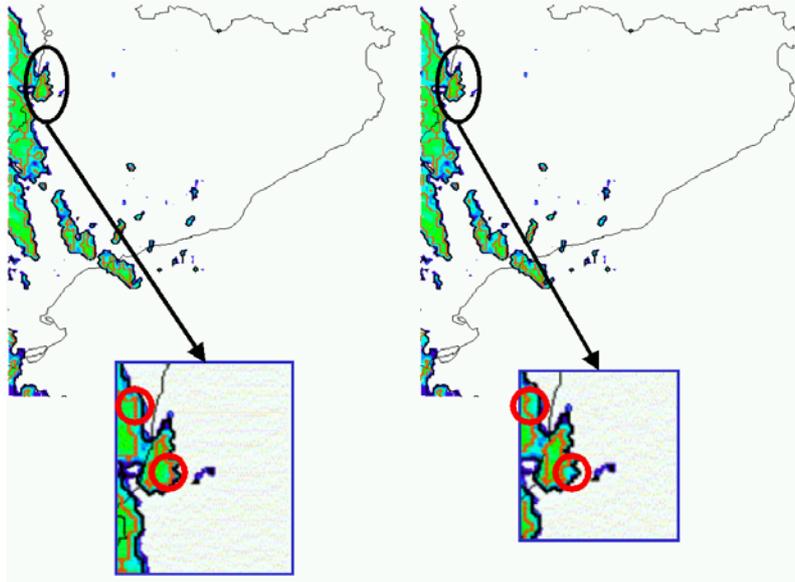


Figura 5.12. Comparación de los algoritmos SYH (izquierda) y SYHBL (derecha). 9 de junio de 2000, 22:30 UTC.

Comparando los dos algoritmos (figuras 5.13 y 5.14) para un gran número de imágenes (casi 2000) y las dos bandas con las que ha trabajado el radar meteorológico utilizado (S y C), se pueden deducir los siguientes puntos:

- Existe un comportamiento de la diferencia de la precipitación convectiva similar, para ambas bandas, aunque se producen valores mayores en la banda S. En la mayoría de imágenes (un 76.04 % en el caso de banda C y un 57.17 % en la banda S) la diferencia era inferior al 20 % respecto al valor del número de píxeles en los que se detectaba la precipitación convectiva.

- En las diferentes bandas, existe un hecho curioso al observar una tendencia opuesta entre el número de píxeles convectivos (o área de precipitación convectiva) y la diferencia entre los píxeles detectados por los dos algoritmos. Es decir, cuanto más área se ve afectada por la precipitación convectiva en una imagen, más posibilidades hay de que las diferencias entre los resultados del algoritmo SYH y los del SYHBL sean menores. La relación es casi inversamente proporcional para el caso de la Banda C.

- Teniendo en cuenta que parece que ajusta mejor el tipo de precipitación convectiva, parece interesante utilizar el algoritmo mejorado de clasificación de la precipitación (SYHBL), especialmente en el caso de episodios donde no se den estructuras especialmente grandes.

- Especialmente para el caso de la banda S (no se muestra en las imágenes), existe también una relación inversa entre el porcentaje de píxeles convectivos respecto a los estratiformes en una imagen y la diferencia entre los dos algoritmos. Es decir, cuanto más

5. Análisis de la precipitación convectiva

estratiforme es la situación (en cuanto al área total de precipitación etiquetada como tal), menor es la diferencia entre los dos métodos. Por lo tanto, además de aplicarse a estructuras de precipitación no muy grandes, el algoritmo SYHBL debería ser aplicado de forma más habitual cuando las estructuras son especialmente formadas por píxeles clasificados como convectivos.

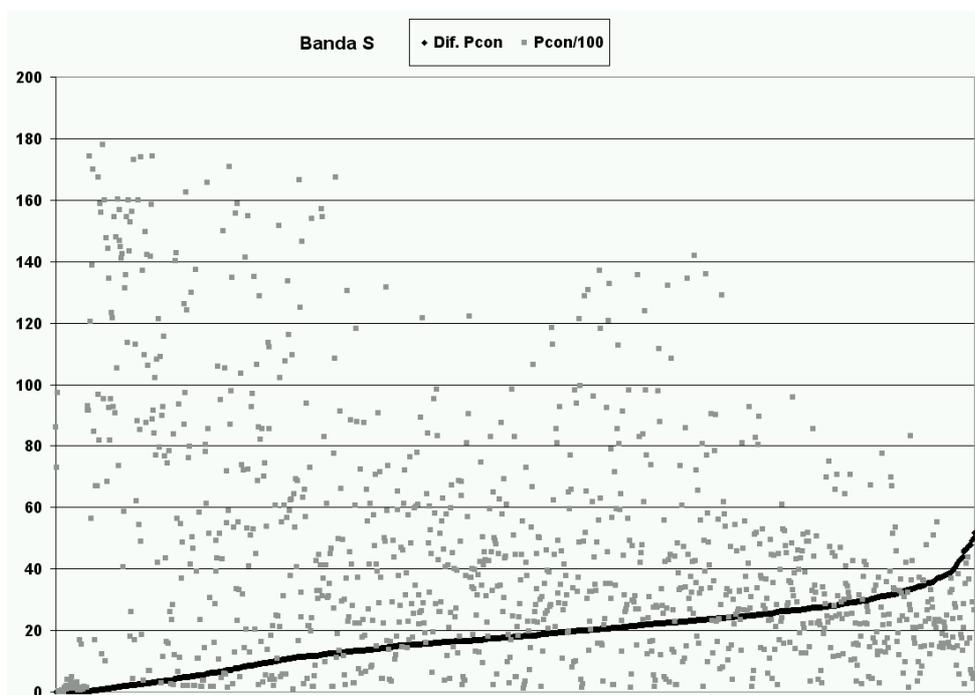


Figura 5.13. Comparación entre el número de puntos (en valor absoluto) convectivos para los algoritmos SYH y SYHBL para el radar en banda S (color gris). En color negro se indica el número de píxeles convectivos por imagen (según el SYH), dividido por 100.

5. Análisis de la precipitación convectiva

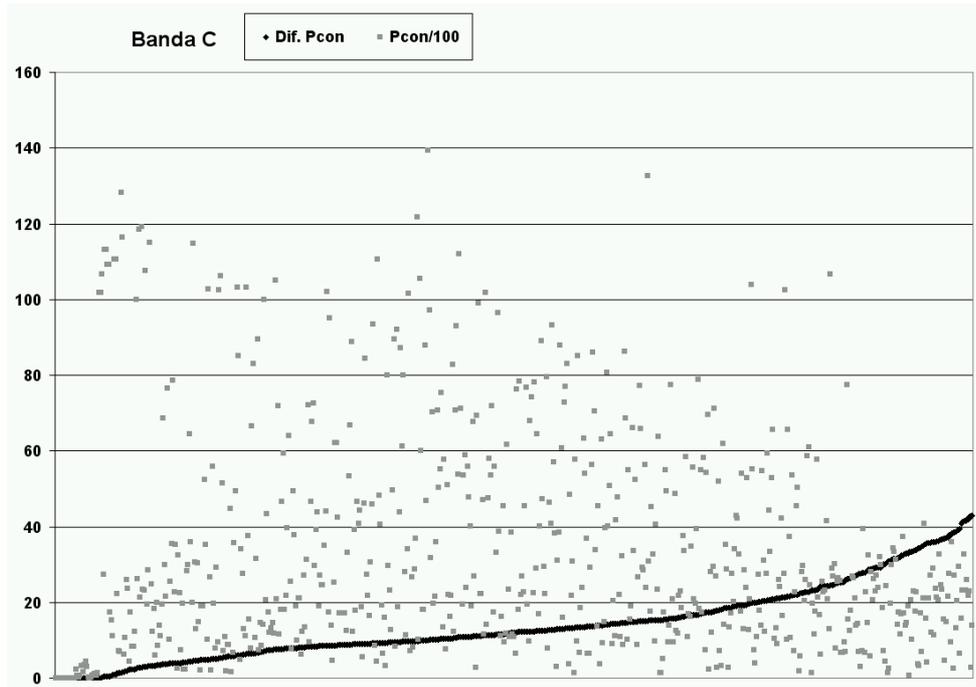


Figura 5.14. Igual que la figura anterior, pero para la banda C

La eficacia de los algoritmos 2D ha sido testada con varias situaciones de diferentes características. Empezando por una situación donde se dieron estructuras de grandes dimensiones horizontales y grandes desarrollos verticales (junio de 2000, figuras 5.15) puede verse como la zona de precipitación convectiva (en color lila) parece coincidir bastante bien con aquellas regiones donde en ese momento se producen los mayores desarrollos convectivos. La figura 5.16 muestra precisamente como los ecos que superan el valor de 30 dBz llegan a los niveles más altos del radar, además, a lo largo de toda la línea de precipitación (que sería la que aparece más al norte en la imagen radar). Los valores en superficie se encuentran, en la mayoría de píxeles, por encima de los 40 dBz, valor que puede asociarse a intensidades bastante elevadas (entre 10 y 40 mm/h, según la relación Z/R utilizada).

En el lado opuesto, tenemos las situaciones en las cuales los desarrollos verticales apenas son inexistentes, aunque la zona de precipitación es bastante extensa. Es lo que se definió anteriormente como precipitación convectiva embebida dentro de estructuras estratiformes. Es el caso de diciembre de 2000 (figuras 5.17 y 5.18), en el que la convección apenas se desarrolló. En el episodio presentado probablemente se identificó demasiada precipitación como de carácter convectivo, entendiéndola como aquella que se debe a estructuras de desarrollo vertical importante. Sin embargo, gracias a la separación entre lluvia cálida y fría, no resulta problemático identificar este tipo de precipitación como convectiva. De todas maneras, resultante bastante útil para el predictor, diferenciar la precipitación convectiva

5. Análisis de la precipitación convectiva

entre aquella que está bastante desarrollada verticalmente (denominada fría) frente a la que no lo está tanto (o cálida).

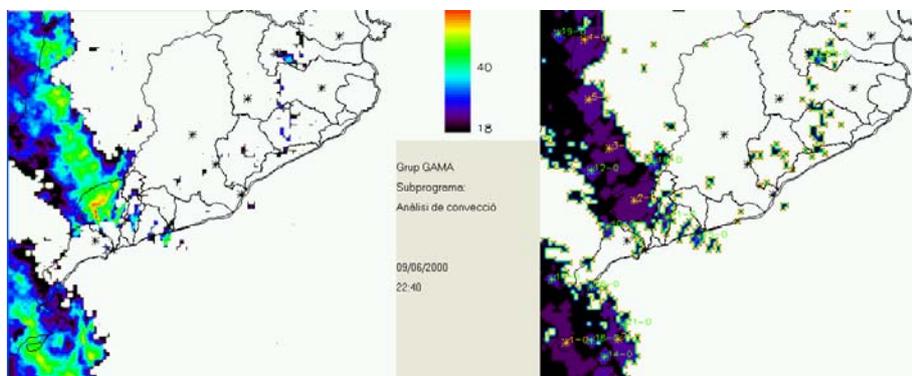


Figura 5.15. Imagen de radar (izquierda) para el día 9 de junio de 2000 (22:40 UTC). Aplicación del algoritmo de SYH (derecha), identificando precipitación convectiva (colores azules y violáceos) y estratiforme (negro)

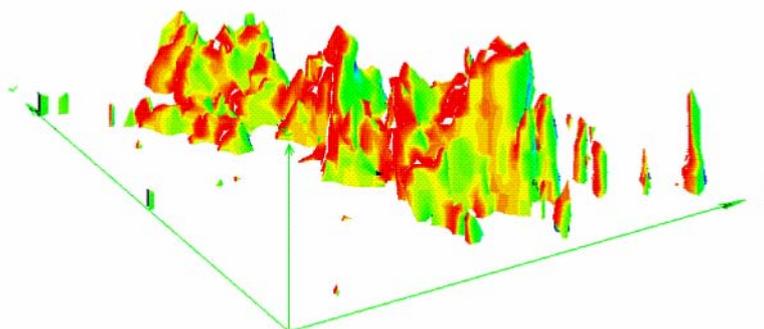


Figura 5.16. Imagen en 3D de la superficie en la que se registraron valores de 30 dBz, para la misma fecha que en la figura anterior.

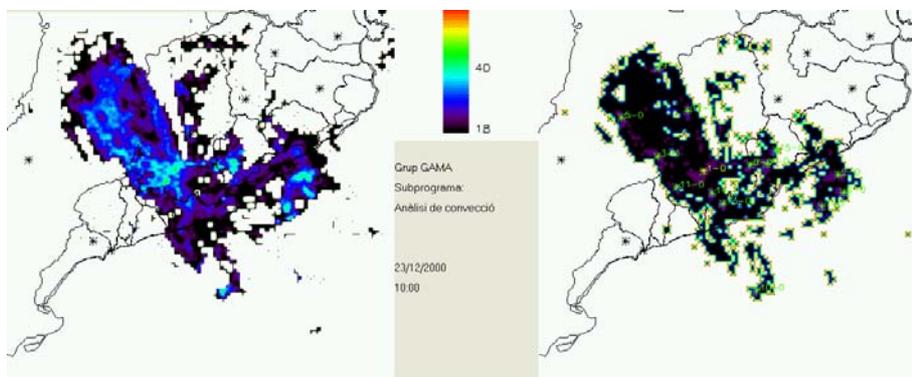


Figura 5.17. Igual que para la figura 5.15, para el día 23 de diciembre de 2000 (10:00 UTC)

5. Análisis de la precipitación convectiva

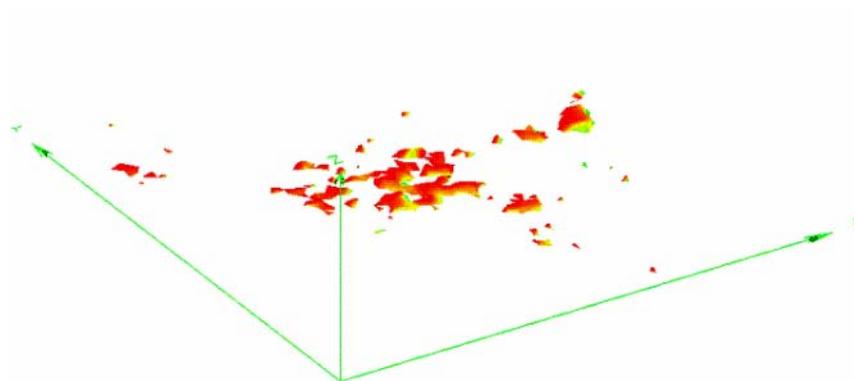


Figura 5.18. Igual que para la figura 5.16, para el día 23 de diciembre de 2000 (10:00 UTC)

Por último, se presenta otro tipo de situaciones bastante diferenciadas: células convectivas o estructuras multi-celulares de pequeñas dimensiones horizontales, pero con ecos de elevada intensidad que alcanzan niveles muy elevados (en bastantes ocasiones, incluso sobrepasando los toques de los sistemas convectivos mas extensos). Aquí se presenta el caso de agosto de 1999 (figuras 5.19 y 5.20), en el cual se puede apreciar como se identifica correctamente prácticamente toda la precipitación como convectiva. Sin embargo, se debe hacer aquí otra reflexión sobre la precipitación que se ha clasificado como estratiforme. En este caso quizás sería conveniente identificar esta precipitación que ha sido catalogada “estratiforme” como precipitación estratiforme de origen convectivo, frente a la que se debe a estructuras más estratificadas.

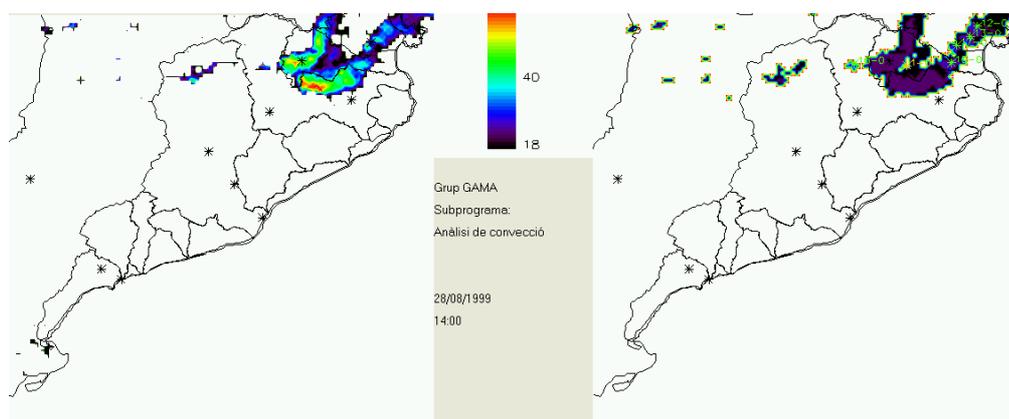


Figura 5.19. Igual que para la figura 5.15, para el día 28 de agosto de 1999 (14:00 UTC)

5. Análisis de la precipitación convectiva

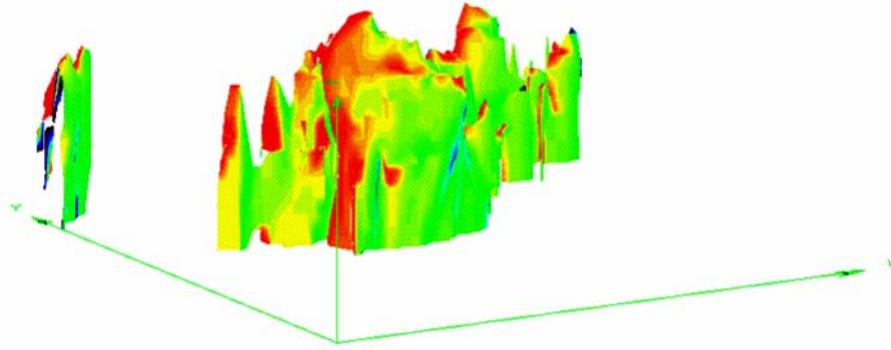


Figura 5.20. Igual que para la figura 5.16, para el día 28 de agosto de 1999 (14:00 UTC)

Por lo que respecta a la identificación de las zonas más afectadas por los dos tipos de precipitación, cabe decir que en primer lugar se han obtenido campos de precipitación convectiva y estratiforme (figura 5.21), los cuales serán analizados, teniendo en cuenta el hecho de los errores del radar. Más adelante, los resultados serán comparados con el campo de la distribución de la precipitación convectiva obtenido por los pluviómetros.

Se han impuesto a los campos calculados del porcentaje de precipitación convectiva y estratiforme los siguientes condicionantes:

- La distancia máxima impuesta de validez de los píxeles es 130 Km., que sería, aproximadamente, el rango del radar utilizado en el cual los valores son cuantitativamente válidos
- Se ha aplicado una máscara para trabajar únicamente con la zona de las CIC, con el objetivo de facilitar la comparación.
- El tanto por ciento para cada tipo de precipitación se ha hecho en base al valor máximo obtenido, que fue de 405 imágenes para el tipo convectivo, frente a los 2563 para el tipo estratiforme. Cabe decir que, especialmente para la primera clase de precipitación, si se hubiera considerado el tanto por ciento en referencia al total de imágenes utilizadas (5345), los valores en muchos puntos hubieran sido nulos, utilizando la misma escala para ambos.
- Se ha considerado que la banda era indiferente a la hora de aplicar el algoritmo de clasificación de la precipitación.

La figura 5.21 muestra en primer lugar que el análisis por zonas no es completo por varios motivos, entre los que destacan que las zonas de NE y parte de S. Tarragona se encuentran demasiado alejadas y, por otra parte, la orografía hace que ciertas zonas queden “ciegas”. Para ambos tipos de precipitación existen dos zonas con valores más importantes que el resto. La primera abarca la parte central de Catalunya entre las cordilleras del Pre-litoral y Litoral, es decir, que afecta a las regiones principalmente de Centro y Centro Girona. Por otra parte, especialmente para la precipitación de tipo convectivo, tenemos que los píxeles de los

5. Análisis de la precipitación convectiva

Pirineos presentan unos porcentajes realmente importantes, aunque también debe tenerse en cuenta que, en algunas situaciones, deberá considerarse el realce orográfico. Estos resultados parecen bastante similares a los del punto 5.1, aunque deben considerarse también que, a parte de los aspectos negativos presentados anteriormente, no se han analizado todos los episodios al no estar almacenados en el CMT del INM de Barcelona.

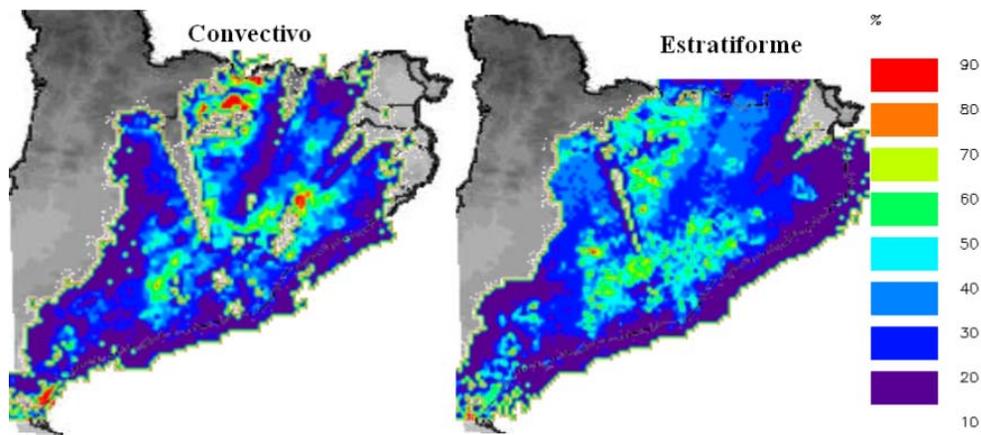


Figura 5.21. Porcentaje de precipitación convectiva (izquierda) y estratiforme (derecha), para el total de las imágenes analizadas

Por último, resulta interesante destacar la gran diferencia entre los valores en el número total de imágenes afectadas por precipitación convectiva y estratiforme (siendo mayor, en un 76.68% de los píxeles, para esta última). En concreto, de media, la diferencia es de casi 7.5 píxeles más de precipitación estratiforme, respecto a la convectiva. Esto se debe, principalmente, a dos factores:

- En episodios generales, la precipitación estratiforme es mucho mayor por imagen. Para los casos de banda C, la precipitación clasificada como convectiva solamente es un 18.05 % de la otra clase, mientras que para la banda S llega ser aún menor el porcentaje: 10.19 %.
- Para los episodios más convectivos, las diferencias son bastante menores, aunque las estructuras son muy inferiores en tamaño, afectando a menos zonas y, además, con el movimiento, los píxeles no suelen estar afectados por precipitación convectiva durante mucho tiempo.

5.2.3. Predicción del campo de la precipitación a corto plazo

La operatividad del algoritmo (Llasat y Rigo, 2003) recoge un conjunto de otros trabajos, que van desde la identificación del tipo de precipitación (convectiva/estratiforme, a partir del método de SYH), el uso de diferentes relaciones Z/R según el tipo de precipitación, la inclusión de información 3D, un método de correlaciones cruzadas para el seguimiento de las estructuras de precipitación, y una extrapolación a partir de los resultados anteriores.

A partir de esta metodología, podemos dividir los datos de precipitación en tres clases: **pasada** (hasta 1 hora previa, en intervalos de 10 minutos), **presente** (imagen actual) y **futura** (1 hora posterior). Por lo tanto, hablando en términos de una utilidad operativa para el seguimiento de episodios, es posible crear tres tipos de avisos: en primer lugar, existencia de acumulaciones horarias previas (según el umbral superado y la zona afectada, se puede realizar una alerta de crecida de ríos). Seguidamente, intensidades actuales muy elevadas (no es conveniente realizar un aviso, pero debe ser motivo de seguimiento alguna estructura que pueda ser más activa y tenga un movimiento casi-estacionario). Por último, probabilidad de que se den acumulaciones horarias futuras (dan una idea de que zonas pueden registrar valores acumulados elevados a corto plazo).

Deben realizarse una serie de consideraciones previas sobre la aplicación del algoritmo, especialmente a la hora de realizarse una aplicación operativa. Las más importantes se listan a continuación:

- Los campos de precipitación pasado y futuro (figura 5.22) y de las intensidades actuales obtenidos deben ser más considerados como aproximados, más cualitativos (áreas de máximos) que cuantitativos. Esto se debe a los diferentes errores en la estimación de la precipitación (errores propios del radar o conversión de la precipitación a partir de una relación Z/R, además del error en la aplicación del algoritmo).

- A partir del aspecto previo, los umbrales deberían tener en cuenta los errores en la medida de la precipitación y las diferencias debidas a problemas de la señal del radar en cada zona. En este trabajo, únicamente se presenta un único umbral general, por lo que sería recomendable realizar un estudio futuro para identificar los umbrales recomendables, comparando con la información de los pluviómetros e, incluso, de caudales.

- Finalmente, el hecho de que se de una superación de un umbral, no significa que se vaya a producir un efecto en superficie identificable para la población (inundaciones locales, crecidas de ríos, etcétera). Por este motivo, el estudio deberá tener un apartado que recoja las zonas de riesgo (densidad de población elevada, infraestructuras importantes, cauces de ríos...).

5. Análisis de la precipitación convectiva

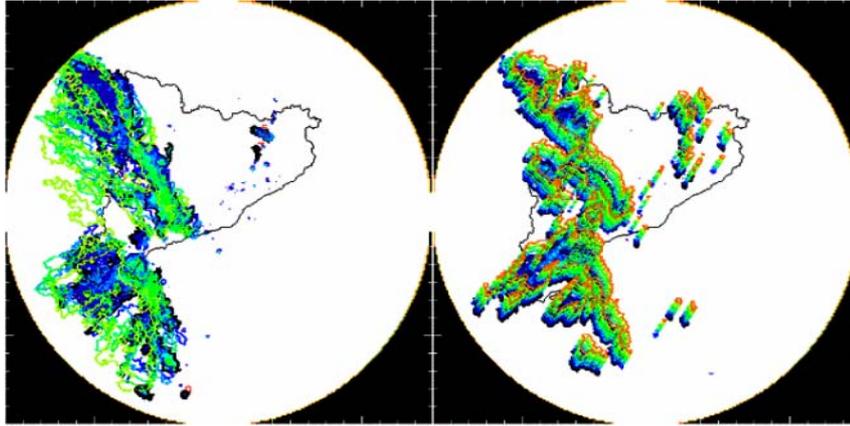


Figura 5.22. Ejemplo de campos de precipitación, hasta 1 hora, pasados (izquierda) y futuro (derecha), para el episodio de 10 de junio de 2000

De la figura 5.23 se obtienen conclusiones referentes a los índices de acierto utilizados para verificar el funcionamiento de la predicción de campos de precipitación. En este análisis no se ha tratado el tipo de precipitación, sino si en un píxel futuro que se ha predicho que en él se identificará precipitación, realmente se va a dar esta condición.

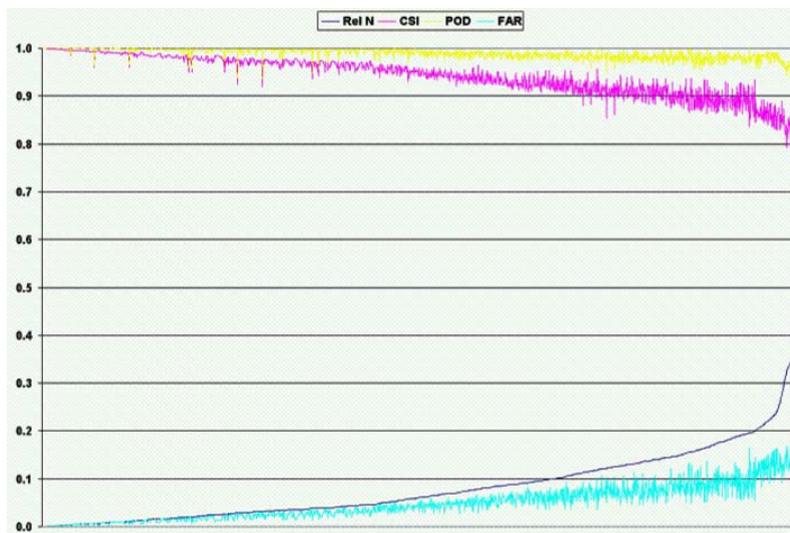


Figura 5.23. Valores de los índices de acierto y relación entre píxeles con precipitación frente al total.

El primer aspecto a citar es la clara relación directa entre el ratio píxeles con precipitación respecto al total de píxeles (Rel N) y el índice FAR, que es inversa para la POD y el CSI (Rigo and Llasat, 2002). Aunque existen muchos más índices de validación, se han considerado éstos al ser los más habituales en los trabajos consultados (Dinku *et al.*, 2002). Por

5. Análisis de la precipitación convectiva

Lo tanto, los resultados son mejores cuanto menos precipitación se da en la imagen. Sin embargo, los valores medios de los diferentes índices, presentados en la tabla 5.1, muestran que las diferencias entre considerar todas las imágenes o solamente para imágenes donde $Rel\ N > 0.15$ no son demasiado importantes.

Para concluir este punto, se presenta un ejemplo de la aplicación del algoritmo en una situación real (episodio de 10 de Junio de 2000). En primer lugar, se presenta la figura 5.24, en la cual se observa la evolución entre las diferencias entre el máximo de precipitación predicha y la obtenida (considerando solamente datos del radar), y la distancia entre la localización del máximo. Por lo que se refiere al valor de la precipitación, la diferencia máxima registrada fue de 21.2 mm, siendo el valor promedio de 4.0 mm. En cuanto a la distancia, el valor máximo es de 243.9 Km., por un valor medio de 5.6 Km. La explicación a los valores máximos se debe a la aparición de estructuras nuevas, no identificadas previamente, en la zona de avisos. Una simple manera de corregir este problema, cuando estas estructuras nuevas se deben a traslaciones dentro de la región analizada (y no por la generación en la propia zona de estudio de estos campos de precipitación máximos), es la colocación de una zona previa de avisos, en la cual se aplica el modelo, pero no se tienen en cuenta los resultados.

	Rel N	CSI	POD	FAR
Total	0.082	0.942	0.989	0.048
Rel N > 0.15	0.212	0.875	0.976	0.106

Tabla 5.1. Valores medios de los índices de verificación para el total de las imágenes y considerando aquellas en las cuales el tanto por ciento de píxeles de precipitación es superior al 15 %

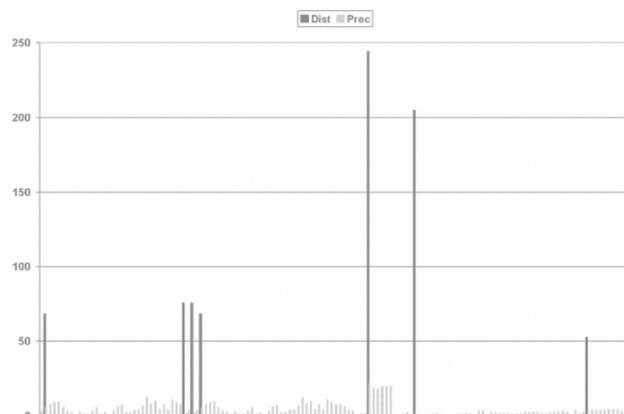


Figura 5.24. Evolución entre las diferencias entre el máximo de precipitación predicha y la obtenida (considerando solamente datos del radar), y la distancia entre la localización del máximo. Episodio de 10 de junio de 2000

5. Análisis de la precipitación convectiva

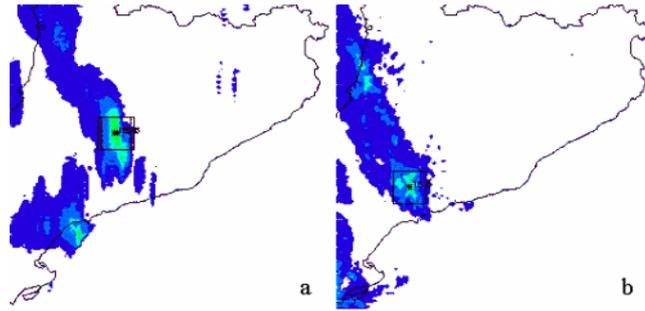


Figura 5.25. Ejemplos de avisos de superación de umbrales de precipitación acumulada para 1 hora; a) predicción, b) campo observado

La siguiente parte de este apartado consiste en la validación del campo de precipitación predicho, referente al que se observa también con el radar. En la figura 5.26 puede apreciarse, y es bastante habitual para situaciones con estructuras grandes, como las diferencias, al menos cualitativas, entre los dos campos no son muy grandes, coincidiendo en la forma de la precipitación y la identificación de la zona de los máximos. Sin embargo, para estructuras de dimensiones inferiores (en la misma figura, en la parte superior a la izquierda puede verse un ejemplo) los resultados son bastante peores. De todas maneras, son las estructuras de gran tamaño las que producen los episodios más importantes.

Para concluir, se presenta la tabla 5.2 con resultados comparativos con datos reales, de pluviómetros. También aquí debe tenerse en cuenta los errores de comparar las dos informaciones, tanto a nivel espacial como temporal. Considerando que el aviso debía ser realizado a partir de los 15 mm de precipitación horaria (es un umbral que se ha creído ya significativo y que es similar a los utilizados por el INM y el SMC para realizar avisos de observación a partir de datos de los pluviómetros), se observó que aunque la diferencia entre los valores podía ser bastante grande (subestimación de la precipitación por parte del radar), la validez de realizar o no el aviso hubiera sido acertado en todo el período presentado.

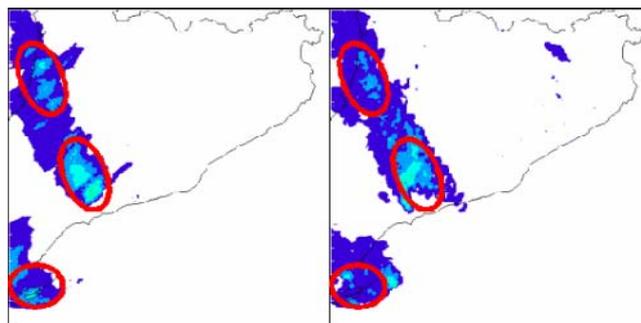


Figura 5.26. Campo de precipitación horaria, para la predicción (a), y campo observado (b)

5. Análisis de la precipitación convectiva

Máxima precipitación (Pluviómetros), mm	Predicción, mm	Aviso	Validez
6.5	8.6	No	OK
15.7	31.5	Sí	OK
27.6	23.6	Sí	OK
43.7	36.4	Sí	OK
48.7	36.4	Sí	OK
55.9	36.4	Sí	OK
59.1	36.4	Sí	OK
62.4	36.4	Sí	OK
59.5	27.3	Sí	OK
62.7	36.4	Sí	OK
62.6	56.0	Sí	OK
56.6	31.5	Sí	OK
49.5	31.5	Sí	OK
60.4	27.3	Sí	OK
69.8	48.5	Sí	OK
69.7	36.4	Sí	OK
61.2	31.5	Sí	OK

Tabla 5.2. Resultados comparativos de datos de predicción a partir del radar con datos reales (de pluviómetros) para el episodio de 10 de junio de 2000

En primer lugar, se muestra un día (28 de enero de 1996) en el cual se registró precipitación convectiva en un área muy localizada (figura 5.27). En este caso, se puede ver que a medida que el valor del umbral de reflectividad aumenta la zona con valores elevados de β quedan limitados al extremo nororiental de las CIC y algunas zonas de la zona central, aunque para esta última región es probable que se produjera un realce de la precipitación por causas orográficas.

En el segundo caso (figura 5.28), se presenta un día (12 de noviembre de 1999) en el cual la precipitación convectiva afectó prácticamente a toda la zona de las CIC. Sin embargo, en esta situación, la precipitación de tipo convectivo no alcanzó una intensidad tan elevada como en el caso anterior. Una de las ventajas del uso de los gráficos de β obtenidos a partir del radar meteorológico es que puede apreciarse mucho mejor la evolución de las tormentas que se registraron durante un episodio. En este caso se aprecia claramente el movimiento en dirección SO a NE, llegando desde el mar.

El último día mostrado (14 de septiembre de 1999, figura 5.29) presenta características bastante diferentes a los dos anteriores, siendo la situación que completa el conjunto de las más habituales. En este caso, nos encontramos con valores elevados de beta y que, además, afectaron a gran parte del territorio estudiado. Nuevamente puede observarse como los valores del

5. Análisis de la precipitación convectiva

parámetro de análisis de la precipitación convectiva van disminuyendo a medida que se incrementa el umbral.

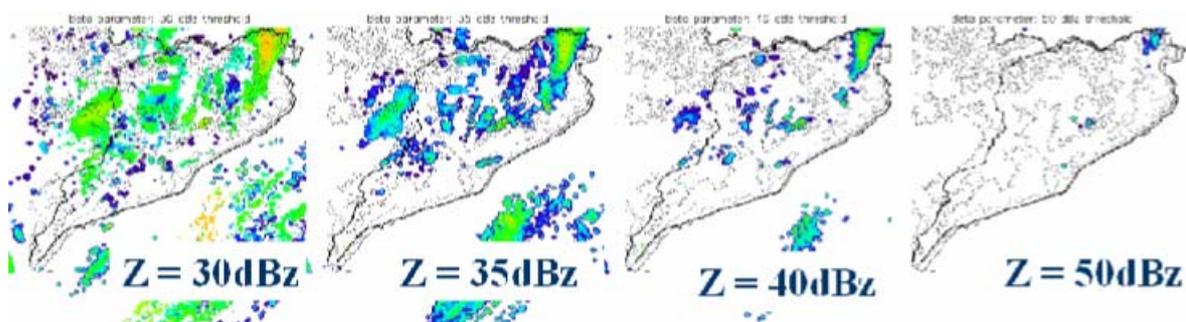


Figura 5.27. Campos del parámetro β diario para diferentes umbrales de reflectividad para identificar la precipitación convectiva (28 de enero de 1996)

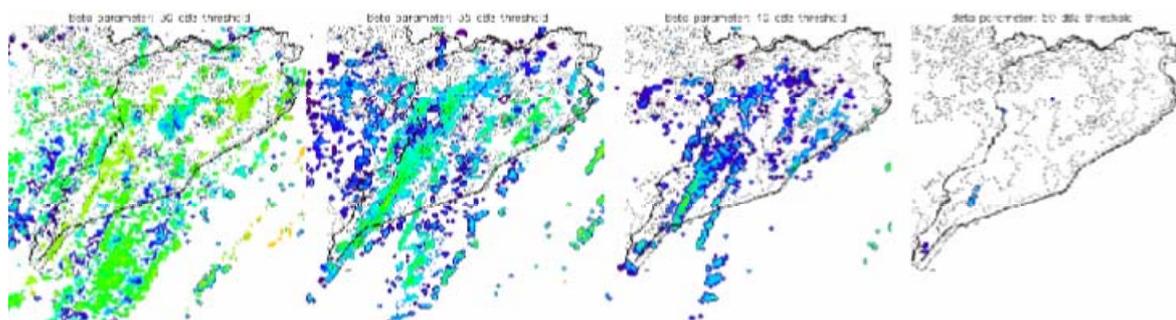


Figura 5.28. Igual que la figura 27, para el día 12 de noviembre de 1999

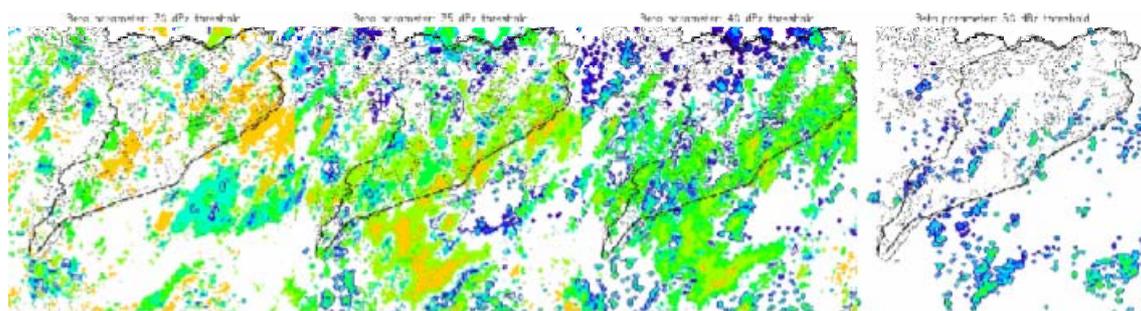


Figura 5.29. Igual que la figura 27, para el día 14 de septiembre de 1999

5.3. Comparación de los resultados de los puntos 5.1 y 5.2

Los objetivos de este apartado son dos: en primer lugar, servir como verificación del parámetro beta para el análisis de la precipitación convectiva, y, a continuación, verificar que

5. Análisis de la precipitación convectiva

rango de valores de reflectividad permiten obtener un campo de beta para el radar que se corresponda con el de los pluviómetros. Para ello, se presentan las figuras de la precipitación convectiva obtenida a partir de pluviómetros de los mismos días que en el apartado anterior (figura 5.30).

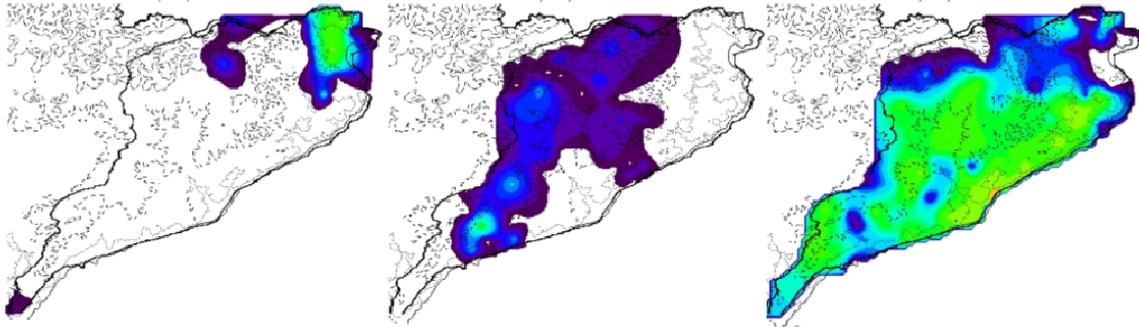


Figura 5.30. Precipitación convectiva obtenida a partir de pluviómetros para los mismos días que en el apartado anterior (figuras 5.27 a 5.29)

El primer resultado de la comparación de los campos de beta a partir de pluviómetros y de radar. Existen diferentes aspectos técnicos, tanto del radar como de los pluviómetros, que hacen que la comparación entre los dos campos sea difícil, al menos, de manera cualitativa. Por lo que se refiere al aspecto cuantitativo, los resultados son ciertamente interesantes, ya que la mayoría de regiones han quedado igualmente representadas en los dos tipos de campos, tanto por lo que se refiere a la identificación de máximos como zonas donde se registra precipitación de tipo convectivo.

Por otra parte, a partir de los diferentes mapas obtenidos según el de reflectividad, el rango de valores de reflectividad que se puede utilizar para identificar un píxel como de precipitación de tipo convectivo se encuentra entre 40 y 45 dBz, situándose el valor más idóneo en 43 dBz. Este valor ha sido el que se ha considerado en el algoritmo de SYH para nuestra región dentro de la primera parte del procedimiento, coincidiendo con el obtenido por Sánchez-Diezma (2001).

5.3.1. Comparación de los datos del radar con los de los pluviómetros en la estima de la precipitación convectiva.

La relación Z-R se utiliza para transformar la reflectividad en intensidad de precipitación. Sin embargo, entre otros problemas, la relación depende del tipo de precipitación

5. Análisis de la precipitación convectiva

detectado (que puede variar dentro de una misma imagen e, incluso, dentro de una misma estructura de precipitación). Una manera de mejorar la efectividad de la relación Z-R aplicada a una imagen radar puede ser mediante el uso del parámetro β , ya que éste puede ser obtenido tanto para el pluviómetro como por el radar (Rigo and Llasat, 2002), y permite conocer cuan convectiva es la precipitación.

La presente propuesta no pretende ser un método para corregir la precipitación obtenida mediante el radar, como son los presentados por Collier (1989), Corral (1994) o Cerro *et al.* (1997), aunque sí puede hacerse servir como una parte de la metodología para realizar ese trabajo. El objetivo principal es estimar la precipitación convectiva (y su intensidad) en alguna de las siguientes condiciones:

- Cuando en una región no se dispone de radar
- Cuando una región no está bien observada por ningún radar, debido a alguno de los errores comentados previamente
- Cuando el radar no está operativo (algo que ha ocurrido cuando se han dado algunos episodios meteorológicos adversos importantes)

A partir únicamente de los valores de una red de pluviómetros resulta extremadamente complicado obtener con más o menos exactitud un campo de precipitación que se aproxime a la realidad. Este problema se acentúa en dos situaciones: para períodos de tiempo relativamente cortos (p.e. inferiores o del orden de 1 hora) y, además, cuando el campo de precipitación es poco uniforme (caso que corresponde a las situaciones en las que predomina la precipitación de tipo convectivo).

Los primeros trabajos realizados comparaban los valores de β obtenidos por el radar y los pluviómetros (Rigo and Llasat, 2002). En ellos se calculaba β para el radar de la siguiente manera:

- Para un píxel dado se determinaba si era o no convectivo, a partir del método de Steiner *et al.* (1995), ya comentado anteriormente y que citaremos como SYH. Sería posible buscar el grado de convección, a partir de los diferentes puntos que tiene el algoritmo SYH, pero en este trabajo preliminar no se realizó por la simplicidad buscada
 - Dependiendo del tipo de precipitación identificada, se aplicaba una relación Z/R diferente para obtener un valor de intensidad de precipitación
 - Finalmente, se determinaba el parámetro β para ese instante dado.

Para todos los píxeles que coinciden con la posición de un pluviómetro se realizaba una comparación de los valores del parámetro, realizando este proceso para unos cuantos episodios. Los resultados obtenidos mostraban (ver figura 5.31) como la evolución del parámetro β era bastante similar tanto para el radar (línea azul) como para los pluviómetros (línea roja), aunque para estos últimos se identificaba con una pequeña antelación el inicio de la precipitación

5. Análisis de la precipitación convectiva

convectiva. Por otra parte, la comparación de los valores de precipitación mostraba, para este ejemplo y en la mayoría de casos, como existía un gran parecido entre las curvas de precipitación convectiva acumulada para ambos instrumentos, mientras que para la parte estratiforme existía una cierta infravaloración por parte del radar.

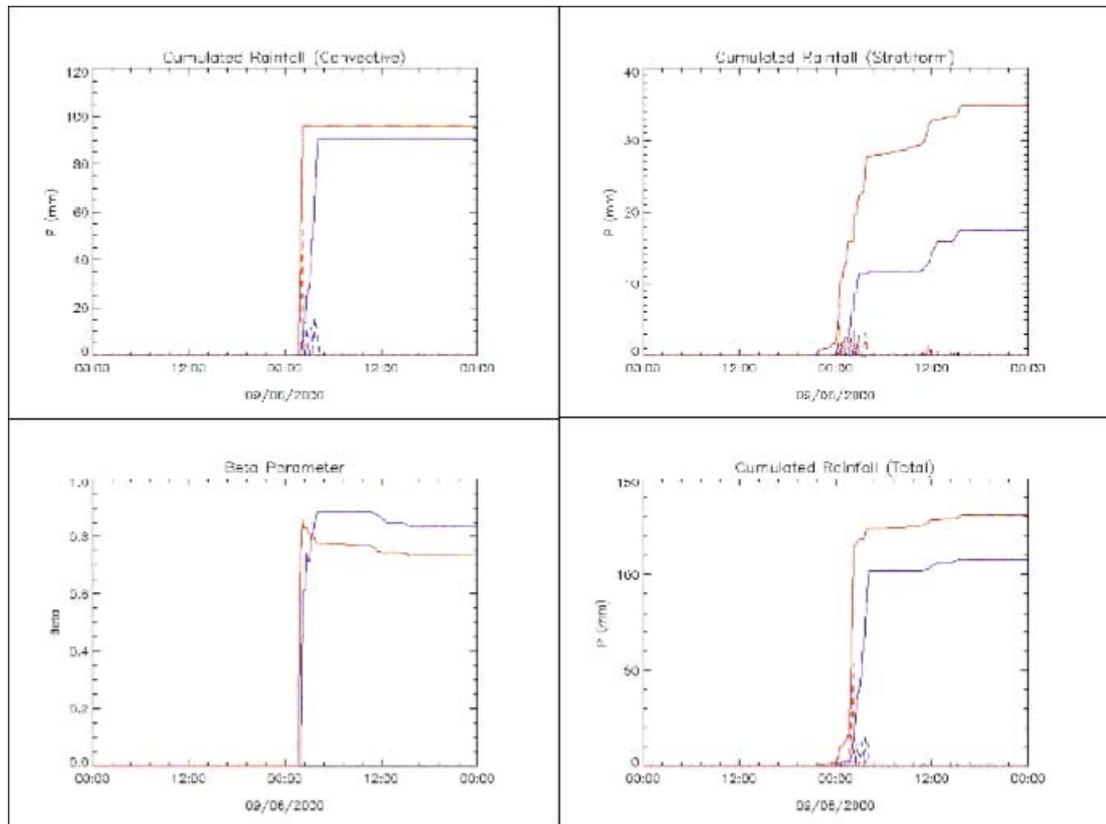


Figura 5.31. Evolución de diferentes parámetros para el episodio de 9-10 de junio de 2000. Precipitación convectiva acumulada (arriba izquierda), precipitación estratiforme acumulada (arriba derecha), parámetro β (abajo izquierda), y precipitación total acumulada (abajo derecha). En azul, valores del radar, y en rojo de los pluviómetros

5.4. Zonas más afectadas por la precipitación convectiva

En este último apartado el objetivo básico es determinar que zonas son aquellas que se han visto más afectadas para la serie analizada, desde el punto de vista del conjunto de los datos. Es decir, se ha considerado para cada pluviómetro un parámetro β a partir de la precipitación total registrada entre 1996 y 2000. Estos valores han sido comparados finalmente con los valores de beta para los episodios analizados en el apartado 5.1.

5. Análisis de la precipitación convectiva

Si comparamos (figuras 5.31 y 5.32) las zonas (gran parte de Pirineos y sur del Centro de Girona) donde se observa los valores máximos de precipitación acumulada durante todo el período analizado con aquellas en las que el parámetro β total (es decir, considerando todos los datos de precipitación) es máximo (especialmente, el Sur de los Pirineos, pero también casi todo el NE y parte del Maresme, Costa Central y N. Tarragona) se aprecian bastantes aspectos a remarcar. En primer lugar, que las regiones son poco coincidentes: en aquellos puntos donde llueve más no suele registrarse tanta precipitación convectiva como en otras zonas donde los valores son inferiores. En concreto, áreas donde la precipitación total supera los 4500 mm (900 mm anuales) suele registrar valores de β entre 0.1 y 0.15, muy por debajo de los valores máximos (superiores a 0.5). Precisamente, a parte del valor máximo de beta, registrado en una zona de precipitación total moderada, el resto de máximos relativos del parámetro (por encima de 0.2) se localizan en regiones donde no se superaron los 3000 mm (600 mm anuales).

Por zonas, se puede decir que las más activas (en promedio), son Pirineos (donde la orografía juega un papel muy importante) y algunas de las regiones costeras (ya citadas en el párrafo anterior), en donde es el efecto del mar el que favorece la actividad convectiva. Por el contrario, las zonas donde la precipitación convectiva ha sido menos activa suelen estar situadas especialmente en el interior de las Cuencas Internas de Catalunya.

La comparación con las zonas más afectadas por episodios convectivos muestra que dos de las dos regiones (Girona Centro y Centro) menos activas (pero en las que los valores totales de precipitación sí son importantes) son las que se presentan en un mayor número de episodios como zonas donde la β es mayor que nula. Además, son bastantes los casos (aproximadamente un 50% en las dos zonas) en los que se ha registrado precipitación fuertemente convectiva.

Por lo tanto, existe una diferencia muy notable a la hora de considerar las zonas más afectadas por la precipitación de tipo convectivo. En primer lugar, debe ser recordado que esas zonas no coinciden casi nunca con las zonas donde se han registrado los mayores valores acumulados de precipitación. Por otra parte, la selección de dichas zonas cambiará radicalmente si el punto de vista es la serie completa o bien los episodios de lluvias fuertes. Para el primer caso, predominan las zonas pirenaica y algunas zonas costeras donde existe una pendiente inicialmente suave hasta unos cuantos kilómetros tierra adentro, donde aparecen las sierras prelitorales. Para el segundo caso, las zonas más afectadas se sitúan en la parte más septentrional del centro de la región.

5. Análisis de la precipitación convectiva

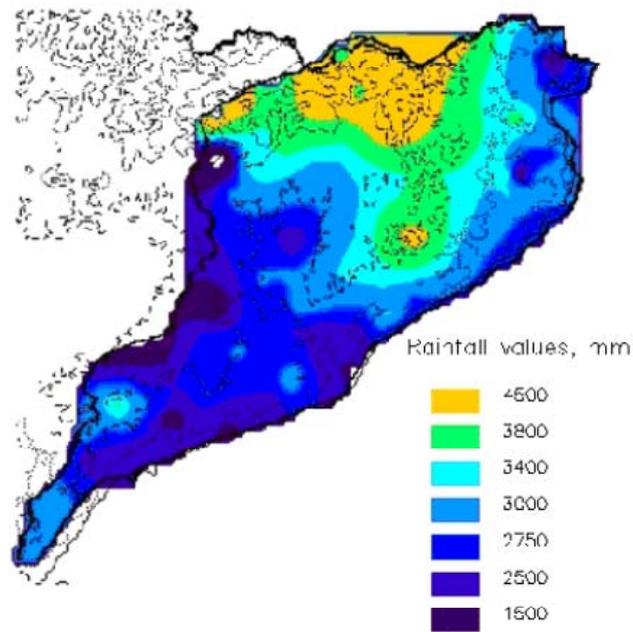


Figura 5.31. Valores de precipitación total acumulada durante el período 1996-2000

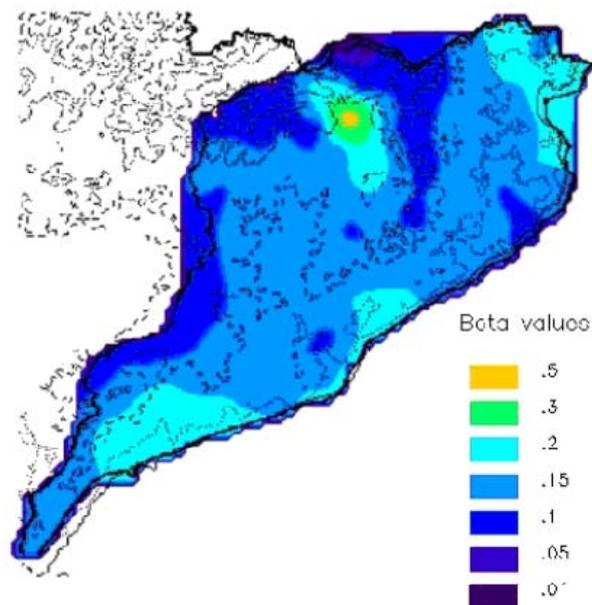


Figura 5.32. Valores del parámetro β para el conjunto del período 1996-2000