

# PREDICCIÓN DE LOS PARÁMETROS RADAR DE LAS CÉLULAS CONVECTIVAS

Manuel Ceperuelo, María del Carmen Llasat

Departament d'Astronomia i Meteorologia, Facultat de Física, Universitat de Barcelona  
ceperuel@am.ub.es

## Introducción

La predicción de la intensidad de las tormentas es una de las tareas más difíciles. Esto es debido a que existen un gran número de procesos físicos y termodinámicos que tienen lugar en la escala de la tormenta. Una de las técnicas utilizadas para realizar el pronóstico de situaciones de tiempo severo está basada en la obtención de índices termodinámicos de inestabilidad, tales como la CAPE o el SI. Si bien recientemente se han publicado trabajos tales como el de Doswell y Schultz (2006), en los que se discute el empleo de tales índices como parámetros predictores de convección intensa, es cierto que tienen la capacidad de resumir en un simple valor las características de los entornos medioambientales favorables a la producción de situaciones severas (Schaefer, 1986; Johns y Doswell, 1992).

Sean mejores o peores, el objetivo de tales índices estriba en aportar más información de cara al pronóstico del tipo de situación meteorológica y el desarrollo de situaciones de tiempo severo. En general, no se utilizan para pronosticar la evolución temporal de las tormentas o células convectivas, una vez ya se han iniciado, lo que es fundamental para poder mejorar la predicción a muy corto plazo. Es en esta última parte en donde se va a centrar el presente trabajo. Su objetivo es proporcionar unas herramientas para la mejora de la predicción de la evolución del sistema convectivo una vez ya han sido formadas las tormentas. Para ello se utilizará el radar meteorológico y el modelo meteorológico mesoescalar MM5, a fin de disponer de la estructura del sistema y sus características y evolución, el viento en diferentes niveles, las alturas de las isoterms de 0 °C y de -20 °C, su desplazamiento y su intensidad.

Dada que la metodología desarrollada se basa en la técnica orientada a objetos, se ha considerado oportuno presentarla al inicio de este artículo. Posteriormente se comentará la zona de estudio y los datos empleados, y se introducirá la metodología empleada para la generación de los modelos de predicción de un nuevo índice que denominaremos intensidad, partiendo de la definición de unos nuevos parámetros radar. A continuación se analizarán los resultados obtenidos mediante una

validación real y finalmente se comentarán las conclusiones y trabajo futuro.

## Técnica orientada a objetos

Existen bastantes trabajos acerca del desplazamiento de las células y sistemas para intervalos temporales que alcanzan entre minutos y horas, como por ejemplo los que consideran el desplazamiento de los sistemas de precipitación a partir del método de correlaciones (Collier, 1989; Circe y Martín, 2003; Rigo, 2004) o los relativos al desplazamiento de células convectivas a partir de buscar similitudes de la estructura en la imagen anterior (Dixon y Wiener, 1993), detectando así un patrón de movimiento del sistema en cuestión. Sin embargo, no existen muchos trabajos en cuanto al pronóstico de la evolución del ciclo de vida de los parámetros radar considerando todo el volumen de la célula convectiva, probablemente por tratarse de un problema mucho más complejo. Referidos a esto último, uno de los primeros trabajos sobre pronóstico del ciclo de vida a partir de diversos parámetros vinculados con la reflectividad fue el de Hand (1996), en el que desarrollaba una técnica orientada a objetos para la predicción a corto plazo de lluvias intensas y tormentas. Esta técnica permitía predecir la evolución de la tormenta a partir de un árbol de decisiones que se iba construyendo con el transcurso del tiempo (Fig. 1). Posteriormente ha sido adoptado por el servicio meteorológico inglés, Met Office (<http://www.metoffice.gov.uk/>), dentro del modelo GANDOLF (Collier y Lilley, 1994; Pierce et al, 2000).

GANDOLF es un sistema de alerta de tormentas desarrollado en colaboración entre la Agencia Medioambiental del Reino Unido y el Servicio Meteorológico Inglés. Utiliza datos radar, datos de satélite y datos del modelo empleado en el Met Office, para la predicción del desarrollo y disipación de lluvias intensas en una malla de 2 km x 2 km. Este modelo parte de una clasificación del tipo de nubes a partir de la última imagen de satélite, y considerando la información radar y del modelo meteorológico efectúa la generación de predicciones del movimiento y desarrollo/disipación de cada tormenta así como de la precipitación. La sección de predicción de la tormenta contiene un modelo conceptual e idealizado con cinco etapas de

crecimiento, donde dependiendo de la velocidad con la que las nubes crecen se generan nuevas tormentas. La técnica orientada a objetos empleada en este trabajo identificará las tormentas a partir de observaciones radar y a partir de la aplicación de los algoritmos SCIT (Johnson et al., 1998; Rigo y Llasat, 2004) para la identificación de las células convectivas 3D como objetos.

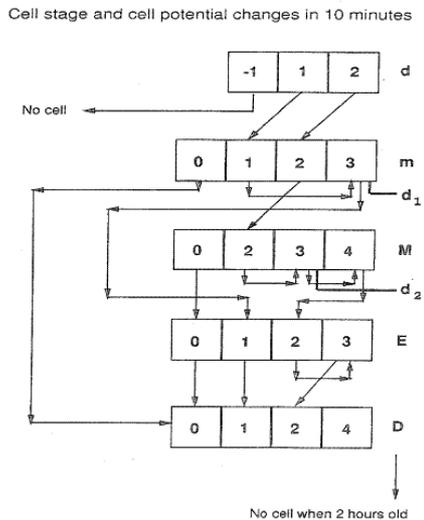


Fig. 1.- Diagrama que muestra el cambio de fase de una célula cada 10 minutos en el esquema orientado a objetos, extraído de Hand (1996). Cada fila de cajas representa un estado de la célula y cada caja representa los diferentes potenciales de la célula. Las flechas muestran los cambios permitidos. Las líneas indican la creación de nuevas células (o hijas) al final de cada intervalo temporal. Donde *d* es una célula en desarrollo, *m* es una célula joven madura, *M* son células maduras, *E* son aquellas células con disipación temprana y *D* corresponde a una célula en estado de disipación. -1 se usa para células tipo *d*, 0 para células débiles, 1 moderadas, 2 fuertes (lluvias fuertes y fuerte desarrollo), 3 célula capaz de crear una nueva y 4 célula que ha creado una nueva célula pero que no ha cambiado de fase.

### Área de estudio y datos

El área de estudio de este trabajo es la región nororiental de la Península Ibérica (Fig. 2). Corresponde a la zona del valle medio del Ebro, comprendiendo casi la totalidad de la comunidad de Aragón y el oeste de la provincia de Lleida. Consta de una extensión de unos 50.000 km<sup>2</sup> y presenta una orografía muy compleja, marcada por dos sistemas montañosos principales: en el norte se sitúan los Pirineos, con alturas superiores a los 3.000 metros distribuidos de oeste a este, y en el sur, con una distribución noroeste-sureste y con alturas cercanas a los 2.000 metros, el Sistema Ibérico. El viento medio de la zona es de dirección noroeste; no obstante, existen frecuentes situaciones con flujo de viento del sur en niveles bajos. El tiempo severo asociado a las primeras situaciones no suele dar episodios de precipitación debido a la elevada

cizalladura y a los fuertes vientos del noroeste, usualmente secos y fríos. Por el contrario, las del sur suelen dar lugar a eventos de precipitación con tormentas con y sin granizo (Pascual, 2002). La explicación física y meteorológica se encuentra en la distribución geográfica de los sistemas montañosos. Para el desarrollo de la convección, además de tener las condiciones medioambientales requeridas, es necesario que algún factor físico ayude a alcanzar la energía necesaria para desencadenar la convección (CIN). En las situaciones con flujos de componente sur, el inicio de la convección se ve favorecido, por un lado, por la modificación de los vientos de capas bajas provocada por el Sistema Ibérico, creando una marcada zona de convergencia en el Noreste de la provincia de Teruel, mientras que por el otro lado, la incidencia perpendicular de vientos húmedos en las zonas montañosas del Pre-Pirineo y Pirineo ayudan a disparar la convección en el norte de la región (Ceperuelo et al., 2006). Además de estos factores, hay que añadir dos aportes más de energía, estos son el aporte energético radiativo y la cizalladura moderada y elevada que a veces se encuentra en los niveles bajos de la troposfera (de 0 a 1 km).

En esta contribución se utilizan datos procedentes del radar meteorológico de Zaragoza de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) y las salidas a resolución horaria del modelo meteorológico mesoescalar MM5. En concreto se han empleado todas las células convectivas detectadas mediante el radar meteorológico comprendidas entre una distancia de 20 y 150 km respecto al radar, obteniendo así una óptima observación en todo el volumen. Las observaciones proceden de las campañas realizadas durante los meses de mayo a septiembre de 2004 y 2005, por la Universidad de León con la colaboración de la Universidad de Barcelona, en el contexto del proyecto MONEGRO. Se han seleccionado para el estudio un total de 46 episodios con 4863 células convectivas detectadas mediante el radar de Zaragoza, de las cuales 3471 células se utilizarán para la obtención de los modelos, y el resto, para su validación.

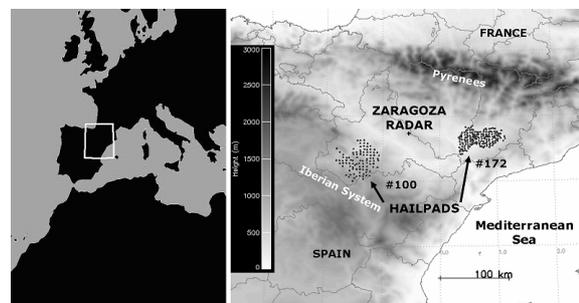


Fig. 2. Área de estudio.

Además de los diferentes datos disponibles, en esta comunicación se utilizará el programa Rainfall events and Hailstorms Analysis Program – RHAP (Ceperuelo et al, 2006) con el objetivo de obtener la

evolución temporal de las características físicas de las células convectivas. Las principales técnicas o algoritmos que utiliza RHAP se basan en el análisis de la información en 2D, 3D así como la caracterización de los sistemas de precipitación (Dixon y Wiener, 1993; Steiner et al, 1995; Johnson et al., 1998; Biggerstaff y Listemaa, 2000; Martín et al. 2001; Rigo y Llasat, 2004).

### Nuevos parámetros radar

Una de las aplicaciones inmediatas del uso de un radar meteorológico es la caracterización física de una célula convectiva mediante su observación en 3D. Existe una gran cantidad de parámetros que tratan de describir la intensidad de una célula convectiva, de los cuales en este trabajo se seleccionarán 25: eje máximo, eje mínimo, volumen, altura de la base, de la cima, inclinación del eje vertical, altura del centroide, altura de la isocero y de la isoterma de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , viento medio de las capas medias y bajas ( $u$ ,  $v$ ), reflectividad (mínima, máxima y media), contenido de agua líquida en la vertical o VIL (celular,  $Z_{\max}$  y grid), densidad de VIL ( $Z_{\max}$  y celular), parámetro de Waldvogel o WP, altura de la reflectividad de 45 dBZ o E45, flujo de energía cinética o KEF, índice de granizo severo o SHI, probabilidad de granizo severo o POSH y tipo de sistema 2D asociado. En principio estos parámetros no contienen suficiente información en un instante dado, como para predecir la evolución de las características físicas de la célula convectiva, por lo que es necesario estudiar su propia evolución temporal y buscar patrones temporales, los cuales no suelen ser detectables a priori, dada la complejidad de los fenómenos convectivos. Consecuentemente se trata de una tarea compleja tanto para su modelización como para la actividad del predictor meteorológico quien debería tener en cuenta numerosos valores.

En el trabajo de Ceperuelo et al. (en revisión, 2008) se analizan relaciones entre los parámetros radar y la probabilidad de granizo en superficie, encontrándose que muchos de los parámetros radar considerados no son independientes y además muestran correlaciones elevadas, lo que permite reducir el número inicial de parámetros por la introducción de nuevas variables radar. Por otro lado, dentro de la aparente aleatoriedad del comportamiento de las células convectivas, se observa que existen unos patrones de crecimiento, madurez y disipación. Fruto de esta experiencia es la posibilidad de determinar los modelos de comportamiento de las nuevas variables radar, las cuales reducen la información redundante determinada por la caracterización inicial de las células convectivas.

Del gran número de técnicas que existen para la reducción de variables, el análisis en componentes

principales (ACP) ha sido muy empleado para estudios meteorológicos y climáticos. Su objetivo consiste en eliminar información redundante de la muestra original. El ACP permite obtener un número mucho menor de variables para caracterizar la célula convectiva y su ciclo de vida, con el objetivo de mejorar la predicción a muy corto plazo.

Tras aplicar la técnica del ACP (Ceperuelo et al, en revisión 2008), se ha reducido el número de parámetros radar que caracterizan las células convectivas a cinco nuevas variables que explican más de un 60% de la varianza. El método aplicado para la selección de las variables es el Método de Kaiser (1958), y el método de rotación escogido es el "Varimax".

A fin de considerar la influencia del entorno en que se desarrollan las células se han incluido en el ACP las alturas de las isotermas de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , así como las componentes del viento medio de los niveles medios y bajos.

Finalmente, de las 25 variables seleccionadas se obtiene que un 77,43% de la varianza de la muestra es explicada mediante cinco componentes principales, hecho que corrobora la gran dependencia entre los parámetros radar empleados. La interpretación física de este resultado es la siguiente:

- PC1, Distribución Vertical de la reflectividad, VDR: esta componente principal explica un 42,5% de la varianza total de la muestra, por lo que contiene gran información sobre la célula convectiva. Principalmente está correlacionada con los valores de VIL y las densidades de VIL, el KEF, SHI y el POSH, el E45 y el WP, e indica la organización en la vertical de las reflectividades elevadas. Altos valores de esta componente indicarán tormentas de gran desarrollo vertical y reflectividades elevadas.
- PC2, Dimensiones físicas, PD: La segunda componente explica un total del 12,1%, la correlación se encuentra con aquellos parámetros relacionados con las dimensiones físicas de la célula: el radio mínimo y máximo del elipsoide obtenido y el volumen de la célula.
- PC3, Nivel de fusión y de enfriamiento de la célula convectiva, MCP: La tercera componente explica menos varianza, un 8,9%, y está relacionada con las alturas de las isotermas de  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  y de  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , es decir, se integra en esta variable parte de las condiciones medioambientales, sobre todo aquellas ligadas a los procesos físicos de fusión y de congelación.
- PC4, Estado dentro del ciclo de vida de la célula, FMD: Esta componente explica un 7,2% de la

varianza y está mayor correlacionada con la altura de la base y la altura del centroide, por lo que indicará la posición de la base y si su centro de masas se encuentra en zonas altas o bajas, es decir, si la célula se halla en estado de formación, de madurez o de disipación.

- PC5, Reflectividad y nivel de organización de la convección, RCO: Esta última componente está relacionada con la reflectividad mínima, media y máxima y con el tipo de sistema precipitante, esto es con el porcentaje de precipitación convectiva y su dimensión espacial en dos dimensiones. Valores muy negativos indicarían sistemas estratiformes, mientras que el caso inverso indicaría sistemas convectivos multicelulares. La varianza explicada corresponde a un 6,7% del total.

Las componentes principales pueden obtenerse mediante una combinación lineal de las variables iniciales, mediante (1) y los coeficientes de la tabla 1.

$$F_j = \sum_{i=1}^p W_{ji} X_i = W_{j1} X_1 + W_{j2} X_2 + \dots + W_{jp} X_p \quad (1)$$

$F_j$  es el nuevo parámetro radar y que definiremos como como intensidad.  $X_i$  es el valor del parámetro inicial,  $W_{ji}$  es el valor del coeficiente (Tabla 1) correspondiente al nuevo parámetro  $j$  y al parámetro inicial  $i$ , mientras que  $p$  los 25 parámetros radar considerados.

	Matriz de coeficientes				
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
Ejmn	-0.003	0.260	0.006	-0.064	-0.093
Ejmax	-0.063	0.354	-0.005	-0.103	-0.003
Vol	-0.028	0.327	0.004	-0.093	-0.085
Hbase	-0.005	-0.113	-0.037	0.542	-0.042
Htop	0.028	0.106	-0.001	0.217	-0.050
Zc	0.017	0.039	-0.015	0.407	-0.046
Inc	0.159	-0.285	0.050	-0.113	-0.259
iso0	-0.003	-0.025	0.438	-0.021	-0.076
iso20	-0.001	-0.033	0.423	-0.042	-0.059
Uwind	-0.042	-0.001	0.181	-0.056	0.132
Vwind	-0.002	-0.011	0.247	-0.017	-0.029
Zmi	-0.014	-0.100	0.013	-0.130	0.410
Zmn	0.010	0.007	-0.018	-0.048	0.316
Zmx	-0.021	0.083	-0.025	-0.011	0.318
E45	0.041	0.043	-0.021	0.032	0.110
WP	0.042	0.046	-0.070	0.034	0.119
VILc	0.134	-0.061	0.018	-0.019	-0.136
VILg	0.120	-0.032	0.008	-0.022	-0.098
VILz	0.120	-0.026	0.010	-0.028	-0.106
VILDc	0.089	-0.086	0.004	-0.046	0.090
VILDz	0.065	-0.037	-0.008	-0.071	0.159
KEF	0.145	-0.093	0.017	-0.041	-0.132
SHI	0.179	-0.142	0.012	0.024	-0.271
POSH	0.154	-0.100	-0.034	0.038	-0.190
Sist2D	0.082	-0.029	-0.052	-0.100	-0.371

Tabla 1. Matriz de coeficientes utilizada para obtener las componentes principales. La primera columna corresponde al parámetro radar utilizado  $i$  la segunda fila corresponde a las cinco componentes principales seleccionadas.

## Modelos de predicción

Gracias al ACP, existe la posibilidad de realizar un pronóstico de un número reducido de variables radar las cuales serán de muy fácil interpretación física para un predictor meteorológico lo cual simplificará la tarea de análisis de los parámetros radar así como la toma de decisiones.

Una vez ya se ha realizado la síntesis de parámetros a analizar, la única condición necesaria para aplicar el modelo de predicción de intensidad de convección consiste en que la célula ya se haya iniciado. Se requerirán un mínimo de dos escaneos radar para aplicar los modelos de predicción de intensidad.

Para obtener los modelos se propone partir de las siguientes hipótesis. Hasta ahora se ha demostrado que las variables meteorológicas obtenidas a partir de un radar meteorológico guardan cierta dependencia entre si, además, se conoce que las células convectivas tienen un ciclo de vida caracterizado por tres etapas. Consecuentemente se puede pensar que las tormentas convectivas respetan una serie de patrones de evolución temporal que permiten clasificarlas en diferentes tipos, basándose esencialmente en su duración. Conociendo el tipo de ciclo de vida asociado a una célula observada, es posible predecir la evolución de su posición e intensidad, y por lo tanto realizar una predicción, todo ello dentro de un marco donde a priori se considera como aleatoria la ocurrencia y el comportamiento de las células convectivas.

Se ha aplicado una metodología basada en realizar predicciones en función de los valores previos de los parámetros que caracterizan la célula convectiva en un instante dado, y a los cuales se aplicarán diferentes modelos de comportamiento, dependiendo del tiempo de vida observado de la célula convectiva. No obstante, existen una serie de peculiaridades o errores que deben tenerse en cuenta en el momento de aplicar esta técnica, con el fin de poder entender mejor los resultados obtenidos. En los primeros instantes de formación de la célula, ésta podrá manifestar una gran variedad de comportamientos (aleatoriedad del fenómeno), según forme parte de las células de corta duración e intensas, células de corta duración y débiles, células de larga duración pero baja intensidad, etc. Por el contrario, para células con más tiempo de vida el número final de posibilidades se reduce bastante. Esto puede verse de forma gráfica en la Fig. 3 donde se puede apreciar como el número de células decrece de forma exponencial en función de la duración de la célula convectiva.

Teniendo en cuenta la distribución de los tiempos de duración de las células convectivas, los modelos de predicción se aplicarán en intervalos de 30 minutos

y a partir de aquellas células que alcancen como mínimo los 20 minutos de duración hasta aquellas que duren como máximo 150 minutos, momento a partir del cual la frecuencia de observación de células convectivas se reduce de forma muy importante (4.2%). Para más de 150 minutos será posible juntar todas estas células en un mismo grupo y aplicar otro tipo de metodología basada en interpolaciones previas de los parámetros radar. Los modelos se aplicarán teniendo en cuenta la duración previa de la célula y considerando intervalos temporales de 30 minutos, lo que permitirá establecer diferentes tipologías.

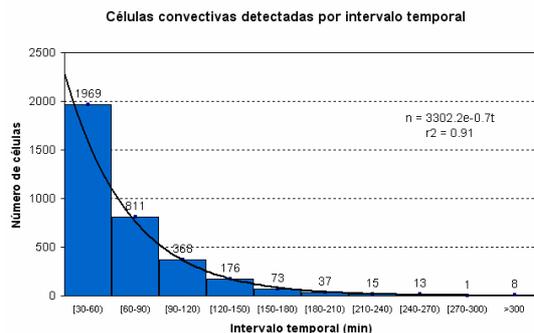


Fig. 3. Relación entre el número de células convectivas y su tiempo de duración.

La metodología a desarrollar en la predicción de la evolución de las células contempla aquellos parámetros relacionados con sus características físicas y estructurales, por lo que en este trabajo no se tendrá en cuenta el modelo de predicción para el desplazamiento. Este último suele realizarse a partir de una extrapolación lineal del movimiento de la célula convectiva y de la salida del modelo meteorológico para obtener su advección final (Dixon y Wiener, 1993; Ceperuelo et al., 2006).

Se propone realizar un análisis en conglomerados (Aldenderfer y Blashfield, 1984; Kaufman y Rousseeuw, 1990) de todas las células detectadas para aquellos intervalos de tiempo definidos anteriormente con el fin de llegar a clasificar u obtener modelos de comportamiento. El procedimiento a desarrollar consiste en seleccionar primero aquellas células con tiempos de duración superiores a los umbrales preestablecidos (>30', >60', >90', >120') y menores a 150 minutos de duración y finalmente aquellas con duraciones >150'. A continuación se realiza el análisis de conglomerados para cada clase y se definen o regionalizan el número de grupos o modelos a obtener para cada una. Finalmente se obtienen las características y modelos de comportamiento para cada clase de células.

La metodología empleada para la obtención de los grupos o modelos de comportamiento será el análisis no jerárquico, partitivo o de optimización. El

objetivo del método reside en realizar una sola partición de la muestra en un cierto número "k" de grupos. Uno de los procedimientos, y el empleado en el caso de células convectivas es el K-means (Hartigan y Wong, 1979). Para el caso contemplado de la agrupación de las células convectivas, se toma la hipótesis de que "k" puede variar. Partiendo de la muestra de valores instantáneos de las cinco variables se escoge el valor de "k" de forma tal que optimice la distribución en grupos suficientemente representativos. Esto es así porque uno de los objetivos es llevar a cabo este tipo de análisis cada vez que se produzca un episodio de precipitación convectiva, el cual implicará una ampliación de la base de datos de células convectivas y por consiguiente un cambio en la base de datos inicial. Al final, el resultado será una herramienta operativa de creación de modelos dinámicos que expliquen el comportamiento de la intensidad de las células convectivas. Sobre la misma célula se aplicará el modelo más adecuado dependiendo del instante en el que se halle.

Finalmente, dado que las células convectivas tienen un determinado ciclo de vida, se propone realizar unos ajustes mediante modelos Gaussianos a los grupos obtenidos según la ecuación (2), a partir de los cuales, con una breve observación se puede llegar a clasificar y determinar las características de la células en cuestión.

$$y = A_0 \cdot \exp\left(-Z^2/2\right) \quad (2)$$

Donde  $Z=(X-A_1)/A_2$ .  $A_0$  corresponde a la altura de la Gaussiana,  $A_1$  corresponde al centro de la Gaussiana y  $A_2$  a la anchura (desviación estándar).

### Células con duración superior a 30 minutos.

Contiene todas las células convectivas seleccionadas con duración superior a los 30 minutos. Es posible agrupar a las 2761 células convectivas seleccionadas con estos requisitos en cinco grupos. Valor para el cual la regionalización presenta su funcionamiento óptimo. Los modelos de comportamiento de los cinco grupos seleccionados son los mostrados en la Fig. 4. La agrupación en número de células convectivas corresponde a 59 células clasificadas dentro del grupo 1 y con una duración media de 127 minutos; 129 dentro del grupo 2 con 100 minutos de duración media; 2400 en el grupo 3 y 46 minutos de duración; 45 en el grupo 4 y 128 minutos y, finalmente, 691 en el grupo 5 con 74 minutos de duración media.

Puede concluirse a partir de los modelos obtenidos que el grupo más numeroso, el 3, es aquel constituido por células convectivas con poca variación en la intensidad, dimensiones, condiciones medioambientales, altura del centroide y

organización del sistema y con una duración media inferior a una hora. Se trataría de células aisladas y dispersas de poca intensidad, las cuales pueden ser clasificadas según los tipos de convección como células unicelulares.

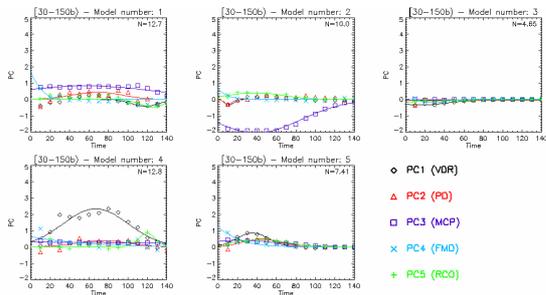


Fig. 4. Cinco modelos de comportamiento obtenidos para aquellas células que duran entre 30 y 150 minutos.

Por otro lado, también se detectan comportamientos diferentes de la variable dependiente de las condiciones medioambientales, MCP. Así, los grupos 3, 4 y 5 presentan condiciones medioambientales constantes pero comportamientos diferentes de evolución de los parámetros radar. En cambio, cuando el MCP es alto (grupo 1) o cuando el MCP es bajo (grupo 2) solo se detecta un tipo de evolución de células convectivas. A excepción del modelo 3, la componente FMD empieza con valores altos, verificando que la formación de células tiene lugar en niveles medios y altos.

Por otro lado, los grupos 4 y 5 son aquellos que muestran altos valores de los parámetros correspondientes a la intensidad (VDR) y valores bajos de los otros parámetros.

### Células con duración superior a 60 minutos.

Si ahora sólo se tiene en cuenta aquellas células convectivas de duración superior a 60 minutos, se llega a reducir el número total hasta un 41% del número de células iniciales (un total de 1.355 células), por lo que la variabilidad de los diferentes ciclos de vida de las células convectivas se verá reducida en un 59% implicando una mejor agrupación de ellas.

El funcionamiento óptimo de clasificación en grupos se obtiene también con 5 modelos de evolución temporal (Fig. 5). La característica principal de los diferentes grupos es que se puede apreciar una variación temporal del parámetro medioambiental. Esto es debido a que las duraciones son superiores a una hora, detectándose variaciones temporales de los parámetros medioambientales. A pesar de ello, los patrones de comportamiento encontrados son muy parecidos a los de la clasificación de las células con duraciones superiores a 30 minutos.

En total se han detectado 37 células en el grupo 1 con duración media de 78 minutos, 241 células con 127 minutos de duración media en el grupo 2, 55 células en el grupo 3 de 87 minutos, 816 en el grupo 4 de 128 minutos de duración media y 206 en el grupo 5 con 79 minutos. En general, los modelos 3, 4 y 5 muestran valores altos de las alturas de las isothermas (MCP). La gran diferencia entre ellos es que en el grupo 4, grupo con mayor número de células, se detectan valores altos de todos los parámetros así como de la duración media de la célula con unos 128 minutos, lo que muestra la importancia de la organización del sistema para la obtención de valores altos de intensidad y de larga duración. Resumiendo, los grupos 1, 2 y 5 corresponderían a células con poca variación temporal de los parámetros; el grupo 3 a células de duración de 87 minutos y con un ciclo de vida intenso (rápido crecimiento y rápida disipación) y el grupo 4 con una gran organización, gran intensidad y duraciones de 128 minutos.

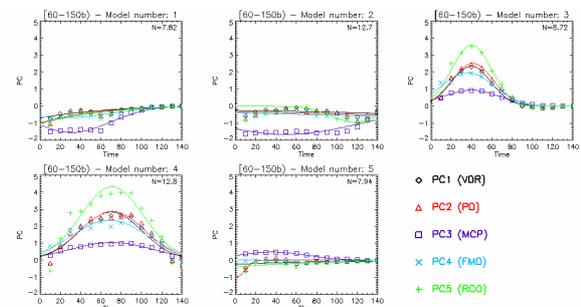


Fig. 5. Cinco modelos de comportamiento obtenidos para aquellas células que duran entre 60 y 150 minutos.

### Células con duración superior a 90 minutos.

En este caso, el número de células que cumplen el requisito de superar los 90 minutos es de 544, que equivale a un porcentaje del 16,4% del total de células seleccionadas. Para este caso los grupos se reducen a un número de 3 (Fig. 6), lo que es debido a la disminución de la variabilidad. Cuanto más duran las células convectivas más definido queda su ciclo de vida. Los 3 grupos presentan las siguientes características: el grupo 1, constituido por un total de 387 células, corresponde a aquellas células de larga duración, 105 minutos de promedio, pero con poca variación en los parámetros radar, lo que puede ser debido a procesos de realimentación del sistema de precipitación los cuales mantienen la célula convectiva en vida; el grupo 2, constituido por 72 células, corresponde a aquellas células con un proceso de crecimiento, madurez y disipación lento pero intenso; y el grupo 3 (85 células) es parecido al grupo 1 pero diferenciado por el MCP, el cual es más bajo, lo que implica niveles más bajos de las isothermas.

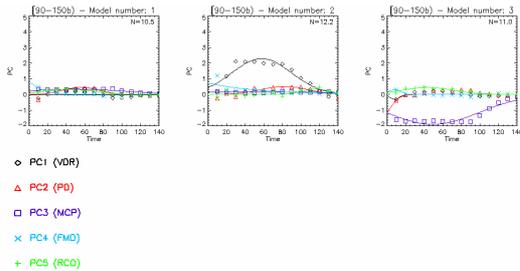


Fig. 6. Tres modelos de comportamiento obtenidos para aquellas células que duran entre 90 y 150 minutos.

### Células con duración superior a 120 minutos.

En este último caso de clasificación de células en grupos, se reduce el número a dos, de forma que en el primer grupo se encuentran 91 células y en el segundo grupo 85, lo que equivale a un total de 176 células convectivas que representan un 3% de las células con duración comprendida entre 30 y 150 minutos. Los dos tipos de modelos obtenidos se muestran en la Fig. 7, en la cual se puede detectar que en el caso del grupo 1, las células son de larga duración, 128 minutos, de poca intensidad y con alturas de las isothermas bajas; mientras que en el caso del grupo 2, las células tienen una duración similar, 129 minutos, son de moderada intensidad y con alturas de las isothermas elevadas.

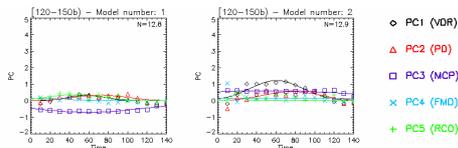


Fig. 7. Dos modelos de comportamiento obtenidos para aquellas células que duran entre 120 y 150 minutos.

### Aplicación y validación de los modelos

A partir de los modelos anteriores es posible clasificar cada célula y asociarle un patrón de comportamiento determinado. Para ello el modelo propuesto consiste en realizar ajustes gaussianos de tercer grado (2) sobre las cinco componentes principales que caracterizan la llamada “intensidad” de la célula, para cada estado de la misma y teniendo en cuenta el tiempo de vida precedente. Con este tipo de ajuste queda minimizado el test de  $\chi^2$ , el cual nos verifica el uso de este tipo de modelo. Por consiguiente, se puede identificar de una forma más óptima la gran variabilidad dentro de los grupos de los parámetros a pronosticar y resulta sencillo llegar a la aplicación y posterior validación de los modelos de comportamiento.

Una vez obtenida la evolución de los primeros instantes de la célula radar se adaptará la ecuación propuesta manteniendo constantes la media y la desviación estándar, mientras que el máximo vendrá determinado por el comportamiento inicial de los parámetros radar de la célula convectiva.

La validación de los modelos de predicción se ha realizado a partir de casos no empleados en la obtención de los modelos de comportamiento, siendo posible la comprobación de la metodología propuesta y la selección de funcionamientos correctos e incorrectos. Es por ello que se tiene presente la dependencia con el tiempo de observación y la capacidad de predicción de cada modelo. Una vez verificado se podrá aplicar en centros meteorológicos para la predicción de la intensidad de las tormentas.

Se ha realizado la validación considerando un total de 313 células convectivas las cuales presentan una duración mínima de 40 minutos y duraciones máximas que pueden llegar a ser superiores a 120 minutos.

En general, los resultados muestran un comportamiento óptimo de los modelos de predicción, para células que han sido observadas un mínimo de 40 minutos, siendo el error cometido del orden del 20% en la predicción de la intensidad de la tormenta. No obstante existen una serie de peculiaridades en las predicciones las cuales se comentan a continuación:

En el caso de la VDR (Fig. 8), el error absoluto medio para el caso de todas las células seleccionadas con un tiempo inicial de vida de 20 minutos, es elevado (alrededor de un 50%), lo cual es debido a la gran variabilidad de las células convectivas. Para observaciones superiores a 30 minutos y en concreto para casos superiores a 40 minutos, los errores cometidos son del orden del 10%, margen de error más que aceptable para realizar la predicción de la intensidad de las células convectivas.

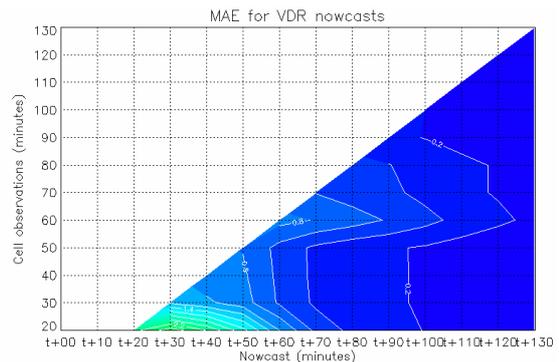


Fig. 8. Error absoluto medio para el VDR en función del tiempo de observación de la célula convectiva (eje Y) y del tiempo de predicción (eje X).  $t$  indica la hora de formación de la célula convectiva.

En el caso de la PD o dimensiones físicas, los modelos propuestos se muestran correctos a partir de los 60 minutos de formación de la tormenta para células detectadas entre 20 y 40 minutos; y a partir de los 50 minutos de la hora de formación para observaciones superiores 40 minutos (Fig. 9). A

pesar de este buen comportamiento, se detecta un error importante en la predicción a 40 y 50 minutos de la hora de formación de aquellas células que han sido observadas tan sólo durante 20 o 30 minutos, hecho que está vinculado a la estabilidad que presentan los modelos en cuanto a las dimensiones físicas, a consecuencia de los requisitos exigidos en el proceso de identificación de la convección (SCIT).

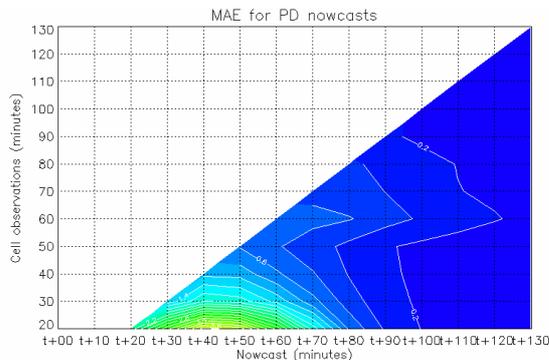


Fig. 9. Error absoluto medio para el PD en función del tiempo de observación de la célula convectiva (eje Y) y del tiempo de predicción (eje X).

Las condiciones medioambientales asociadas a la célula convectiva son bien predecibles a partir de los 60 minutos de la hora de formación de la tormenta. Esto es debido a la estabilidad de estas condiciones en situaciones favorables a la organización de la convección (Fig. 10).

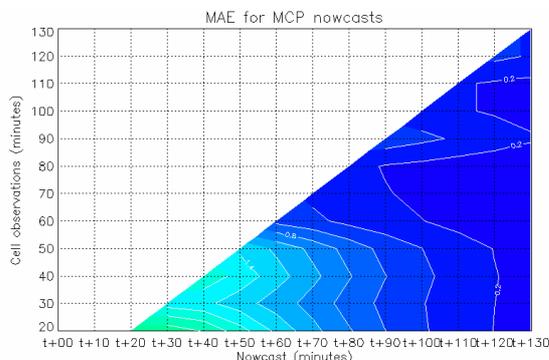


Fig. 10. Error absoluto medio para el MCP en función del tiempo de observación de la célula convectiva (eje Y) y del tiempo de predicción (eje X).

Un comportamiento bien distinto se identifica en la gráfica de los errores cometidos en la estima de la FMD o etapa del ciclo de vida (Fig. 11), y es que a pesar de realizar una buena predicción en todos los casos, para células que han sido observadas durante 60 y 70 minutos, se obtienen errores elevados. Este es justo el momento en el que se aplican unos nuevos modelos de comportamiento, los correspondientes al intervalo de duración de más de 60 minutos, por lo que es de pensar que los modelos obtenidos no contienen toda la variabilidad

contemplada por el momento del ciclo de vida en función del tiempo.

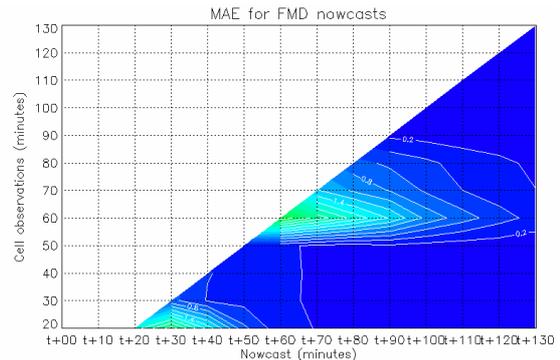


Fig. 11. Error absoluto medio para el FMD en función del tiempo de observación de la célula convectiva (eje Y) y del tiempo de predicción (eje X).

La organización de la convección es de todos los parámetros a predecir el que contiene mayores errores. Sobre todo en células que han sido detectadas entre 20 y 30 minutos y hasta predicciones de 80 minutos. Esto puede estar vinculado a la clasificación automática de la organización de los sistemas precipitantes, la cual debería ser mejorada con la adición del ciclo de vida de la célula convectiva para así determinar a que tipo de organización de la convección corresponde exactamente. El método empleado implica que las células detectadas en los primeros instantes sean identificadas como convección aislada, no obstante, pueden estar dentro de una región que se constituirá como un sistema multicelular o un sistema convectivo mesoescalar. A pesar de ello, la organización de las células convectivas con una edad inicial de 50 minutos o más, es predicha correctamente.

## Conclusiones

Pronosticar el ciclo de vida de las tormentas es una tarea de gran dificultad debido al gran número de variables que deben ser tenidas en cuenta y debido a la aleatoriedad, a priori, de los fenómenos producidos. Obtener un análisis temporal de los 25 (en este trabajo) o más parámetros radar es una tarea muy difícil de realizar y muy compleja de resumir para un predictor, el cual debe tomar la decisión sobre hacia donde irá y sobre si aumentará o disminuirá la intensidad de la tormenta teniendo la duda sobre qué parámetro/s radar centrarse. Una de las grandes aplicaciones del ACP, propuesto para la reducción de la información redundante gracias a la reducción del número de variables, reside en realizar una agrupación del ciclo de vida de las células convectivas por clases temporales.

Dentro de la aleatoriedad de la evolución temporal de los parámetros radar, las células convectivas presentan unos ciertos patrones, y estos están ligados

a la organización de los sistemas de precipitación, por lo que si existen una serie de definiciones teóricas de células convectivas, es posible llegar a modelizar la evolución temporal de todos sus parámetros. Tras aplicar el análisis en grupos en función del tiempo que ha sido observado una célula convectiva, se han podido clasificar en diferentes modelos de comportamiento. Estos modelos se han obtenido para intervalos de 30 minutos y para aquellas células que alcancen tengan una edad, como mínimo, de 30 minutos, hasta aquellas que duren como máximo 150 minutos, momento a partir del cual la frecuencia de observación de células convectivas se reduce de forma significativa.

La aplicación de estos modelos es compleja desde el punto de vista de programación. No obstante presenta una gran ventaja de cara a la predicción de la evolución de la intensidad de las células convectivas, ya que usualmente no existen modelos. Lógicamente, existen una serie de errores asociados a la aplicación de estos modelos, pero que se reducen cuando los modelos de comportamiento propuestos son ajustados a la evolución temporal previa de la célula convectiva a pronosticar. Los resultados obtenidos en el proceso de validación de los modelos muestran como en general los errores cometidos son aceptables y pequeños para células que han sido detectadas un mínimo de 40 minutos. En el caso de la VDR, el error absoluto medio para el caso de todas las células seleccionadas con una edad inicial de 20 minutos es elevado, con un valor próximo al 50% de error. Para el resto, los errores cometidos son del orden del 10%, margen de error aceptable en el pronóstico de la intensidad. Las dimensiones se pueden predecir correctamente a partir de los 60 minutos de formación de la tormenta para células detectadas entre 20 y 40 minutos y a partir de los 50 minutos de la hora de formación para observaciones superiores a 40 minutos. Las condiciones medioambientales asociadas a la célula convectiva también son bien pronosticadas a partir de los 60 minutos de la hora de formación de la tormenta. La FMD en cambio presenta errores grandes en el cambio de modelos aplicado para células de más de 60 minutos, no obstante, a pesar de esta región, los demás instante son bien predichos. Finalmente, la organización de la convección es la que está sujeta a mayores errores, sobretudo en células que han sido detectadas entre 20 y 30 minutos y hasta predicciones de 80 minutos, hecho que puede estar vinculado a la identificación automática de la organización de la convección. A pesar de ello, la predicción de la organización de las células convectivas con observaciones de 50 minutos se realiza correctamente.

Tal y como ya se ha mencionado, la ventaja de estos modelos propuestos es que son dinámicos y auto-ajustables. Esto es así porque uno de los objetivos es

llevar a cabo este tipo de análisis de forma operativa y cada vez que se produzca un episodio de precipitación convectiva, el cual implicará una ampliación de la base de datos de células convectivas y por consiguiente un cambio en la base de datos inicial. Al final, el objetivo y trabajo futuro consistiría en la creación de modelos de comportamiento de la intensidad de las células convectivas donde los pasos serían los siguientes: preparación de la base de datos en términos de las nuevas variables radar definidas para el tratamiento estadístico, obtención de las variables estandarizadas para cada instante temporal, ejecución del análisis en grupos, obtención de los diferentes grupos, preparación de la nueva base de datos y obtención de las variables reales de las componentes para llegar a la generación del modelo predictivo. Por último, se representarían de forma gráfica los modelos de comportamiento con su correspondiente ajuste teórico de la evolución temporal del ciclo de vida de los parámetros

### **Agradecimientos**

El presente estudio ha sido realizado dentro del marco del proyecto SEVERUS. Expresamos nuestro agradecimiento a la Agencia Estatal Meteorología por los datos radar proporcionados.

### **Referencias**

- Aldenderfer, M.S. y R.K. Blashfield, 1984. Cluster analysis. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, Quantitative Applications in the Social Sciences Series No. 44.
- Biggerstaff, M.I. y S.A. Listemaa, 2000: An Improved Scheme for Convective/Stratiform Echo Classification Using Radar Reflectivity. *J. Appl. Meteor.*, 39, 12, 2129–2150.
- Ceperuelo, M., M.C. Llasat y T. Rigo, 2006: Rainfall events and Hailstorm Analysis Program, RHAP. *Adv. Geosci.*, 7, 205–213.
- Ceperuelo, M., M.C. Llasat, T. Rigo y J.L. Sánchez, 2008 (en revisión): Improving hail identification in the Ebro Valley region using radar observations: probability equations and warning thresholds. *Atmos. Res.*
- Circe, M. y F. Martin, 2003: Identificación y seguimiento automático de estructuras convectivas a partir de datos de radares meteorológicos, Nota técnica, STAP No. 39.
- Collier, C.C. y R.B.E. Lilley, 1994: Forecasting thunderstorm initiation in north-west Europe using thermodynamic indices, satellite and radar data. *Meteorol. Appl.*, 1, 75-84.
- Collier, C.G., 1989: Applications of Weather Radar Systems. A guide to uses of radar data in meteorology and hydrology, published by Ellis Horwood, Chichester, 294 pp.

- Dixon, M. y G. Wiener, 1993: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting – A Radar-based Methodology. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 10, 6, 785–797.
- Doswell, C.A.III y D.M. Schultz, 2006: On the use of indices and parameters in forecasting severe storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 1, 1-14.
- Hand, W.H., 1996: An object-oriented technique for nowcasting heavy showers and thunderstorms. *Meteorol. Appl.*, 3, 31-41.
- Hartigan, J.A. y M.A. Wong, 1979: A K-Means Clustering Algorithm. *Applied Statistics*, 28, 1, 100-108.
- Johns, R.C. y C.A.III Doswell, 1992: Severe local storms forecasting. *Wea. Forecasting*, 7, 588-612.
- Johnson, J.Y.; P.L. MacKeen, A. Witt, E.D. Mitchell, G.J. Stumpf, M.D. Eilts y K.W. Thomas, 1998: The Storm Cell Identification and Tracking (SCIT) Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. *Wea. Forecasting*, 13, 263-276.
- Kaiser, H.F., 1958: The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23, 187-200.
- Kaufman, L. y P.J. Rousseeuw, 1990. Finding groups in data: An introduction to cluster analysis NY: John Wiley & Sons, ISBN: 0471878766.
- Martín, F., Eliazaga, F., Carretero, O. y San Ambrosio, I., 2001: Diagnóstico y predicción de la convección profunda. STAP Nota técnica, nº 35.
- Pascual, R., 2002: Estudio de las granizadas en el llano de Lleida. Nota técnica no. 3, Centro Meteorológico Territorial de Catalunya.
- Pierce, C.E., P.J. Hardaker, C.G. Collier y C.M. Haggett, 2000: GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation. *Meteorol. Appl.*, 7, 4, 341-360.
- Rigo, T. y M.C. Llasat, 2004: A methodology of convective structures using meteorological radar: application to heavy rainfall events on the Mediterranean coast of the Iberian Peninsula, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 4, 59–68.
- Rigo, T., 2004: Estudio de Sistemas Convectivos Mesoscalares en la zona Mediterránea Occidental Mediante el uso del Radar Meteorológico. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- Schaefer, J.T., 1986: Severe thunderstorm forecasting. A historical perspective. *Wea. Forecasting*, 1, 164-189.
- Steiner, M., R.A. Houze Jr. y S.E. Yutter, 1995: Climatological Characterization of Three-Dimensional Storm Structure from Operational Radar and Rain Gage Data. *J. App. Met.*, 34, 9, 1978-2007.