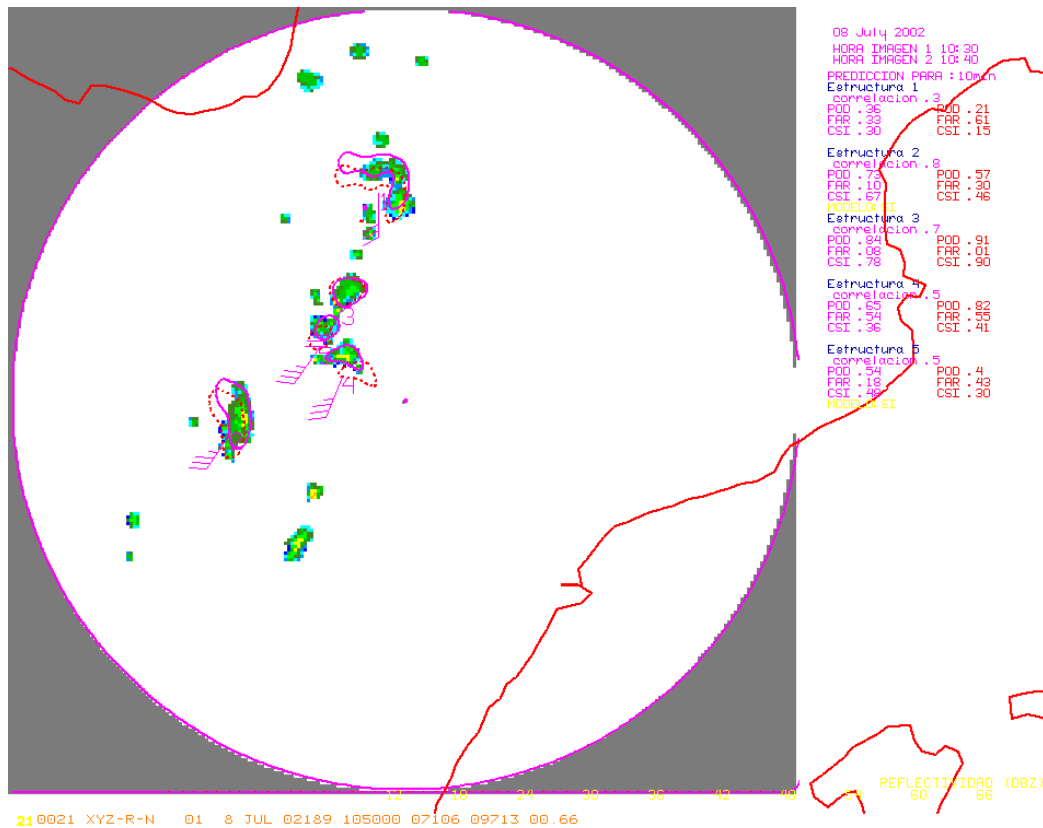


IDENTIFICACIÓN Y SEGUIMIENTO AUTOMÁTICO DE ESTRUCTURAS CONVECTIVAS A PARTIR DE DATOS DE RADARES METEOROLÓGICOS

NOTA TÉCNICA S.T.A.P. Nº 39



Presentación experimental del desplazamiento previsto a 10 min. de estructuras convectivas radar aplicado al CAPPI-1 del radar de Zaragoza. Estructuras convectivas verificantes coloreadas con el realce estándar de reflectividades (dBZ). Los contorneos previstos en los diez minutos anteriores están representados en línea: continua, los obtenidos por el método de correlaciones cruzadas (solo para estructuras superiores a 30 píxeles) y discontinua, por el método de centroides. Las estructuras identificadas están etiquetadas por sus números correspondientes.

María Circe Triviño de la Vega*
Francisco Martín León

Servicio de Técnicas de Análisis y Predicción (S.T.A.P.)
Area de Predicción y Aplicaciones
Subdirección General de Redes, Sistemas y Producción Meteorológica

* Beca de formación de postgraduados 2002-2003

INDICE

INDICE	1
RESUMEN	2
1.- INTRODUCCIÓN	2
2.- ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES EN EL INM	3
2.1.- ESTADO DEL ARTE DE LAS TÉCNICAS DE EXTRAPOLACIÓN	3
2.2.- ANTECEDENTES EN EL INM	9
3.- PROCEDIMIENTO DESARROLLADO	10
3.1.- IDENTIFICACIÓN DE ESTRUCTURAS, ANÁLISIS DE ASIGNACIONES Y TAMAÑOS (COMANDO UNION)	12
3.2.- EXTRAPOLACIÓN DE ESTRUCTURAS POR CC	13
4.- VERIFICACIÓN DE RESULTADOS	14
5.- PRODUCTO. APLICACIÓN A CASOS	16
5.1.- PRODUCTO	16
5.2.- APLICACIÓN A CASOS	20
6.- CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS	33
REFERENCIAS	35

RESUMEN

El seguimiento automático y la posterior extrapolación de estructuras convectivas a partir de datos de radares meteorológicos, se ha convertido en un elemento imprescindible en el proceso de “nowcasting”. La técnica del centroide (Johnson et al., 1998) y la de correlaciones cruzadas (Wolfson et al., 1999) son dos de las más empleadas en los centros meteorológicos que trabajan con datos radar enfocados al seguimiento y extrapolación de la convección. El método del centroide, que está implantado en los terminales McIDAS del INM que trabajan con datos radar regional y nacional con la aplicación YRADAR y YRADARNA, (Martín et al., 2002) respectivamente, es especialmente útil para estructuras de pequeño tamaño, bi y tridimensionales. Sin embargo, a medida que las estructuras crecen, su aplicabilidad es desaconsejable. En tal caso es útil sustituir dicho método por el de Correlaciones Cruzadas (CC, a partir de ahora) para estructuras más amplias.

Esta memoria describe el desarrollo de dicho método aplicado solo a estructuras convectivas radar a nivel regional. El trabajo se ha llevado a cabo a lo largo de la beca de formación de postgraduados dentro del proyecto “Identificación y seguimiento automático de estructuras convectivas a partir de datos de radares meteorológicos” publicada en el BOE el 23 de Noviembre de 2001.

1.- INTRODUCCIÓN

Cuando se analiza una estructura potencialmente convectiva mediante radar, se hace necesario conocer y dar cierta información sobre su evolución espacial futura a muy corto plazo. Dado el poco tiempo que posee el predictor para analizar y tomar decisiones en situaciones de convección generalizada y adversa, dicha información ha de ofrecerse de un modo rápido, claro y fiable. Las técnicas de extrapolación tienen como objetivo dar a conocer la posición más probable de una estructura convectiva de una manera concisa, de modo que el predictor pueda interpretar toda la información que le llega lo más rápidamente posible. Por esta razón, un método de extrapolación no solo tiene que ser fiable sino que, además, debe ser computacionalmente rápido.

Las técnicas de seguimiento y extrapolación lineales se basan en caracterizar el movimiento pasado de una estructura para aplicarlo al desplazamiento futuro. Una de las dificultades comunes a todas las técnicas deriva de la propia naturaleza de la convección ya que su variabilidad temporal y espacial implica que su movimiento futuro normalmente no vendrá determinado por su movimiento pasado: la convección interacciona con su medio circundante de forma no lineal. Esto da lugar a cambios en la morfología, tamaño, intensidad e incluso disipación o creación de estructuras potencialmente convectivas en cuestión de minutos. Un problema añadido es las fusiones y disipaciones de los sistemas convectivos. Nuestros radares toman datos cada 10 min., haciendo, a veces, difícil el seguimiento tanto objetivo como subjetivo de las tormentas con este intervalo de muestreo.

Otra de las dificultades es caracterizar cada estructura. Según sea su tamaño y morfología se hace necesario representar sus propiedades de una u otra forma. En el caso de estructuras pequeñas, simétricas y compactas, su centroide puede representarlas correctamente. Sin embargo, cuando estas estructuras se hacen de mayor tamaño y/o muestran formas “singulares” (arqueadas, alargadas, formas grandes e irregulares..), el centroide deja de ser representativo.

Implantar un nuevo método alternativo al del centroide en las herramientas operativas de extrapolación, permitirá aplicar distintas técnicas para distintos tamaños de estructura contenida en una imagen regional. Así mismo, el producto obtenido por CC ofrecerá el contorno de las estructuras extrapoladas, y no solo el vector extrapolación como se venía haciendo al emplear el método del centroide, facilitando así, la interpretación de los resultados al predictor.

Esta nota se divide en varios apartados. Primeramente, se revisa el “estado del arte” de las técnicas de seguimiento y extrapolación actual tanto fuera como dentro del INM con el objetivo de encontrar, proponer y probar un método operativo que mejore algunos de los puntos débiles del método por centroides, complementándose el uno al otro para dar los mejores resultados posibles. En función de ello, se elabora una metodología y se desarrollan y describen los programas necesarios. En otro apartado se estudian ciertas situaciones permitiendo, no solo hacer una verificación del trabajo, sino que, además, se compara el método de CC con el ya implantado método de centroides. Al final, presentamos las conclusiones, donde se recogen algunos de los puntos débiles que se han encontrado en los métodos desarrollados y se plantean futuras mejoras.

2.- ESTADO DEL ARTE Y ANTECEDENTES EN EL INM

2.1.- Estado del arte de las técnicas de extrapolación

Para la predicción a muy corto plazo de la posición de los sistemas convectivos, se emplean técnicas de extrapolación, debido, mayormente, a las limitaciones computacionales de los modelos operativos de predicción inmediata. Dichas técnicas pueden clasificarse en lineales y no lineales. La diferencia entre ambas es que la primera consiste en asumir que la trayectoria lineal observada en el intervalo más reciente, va a continuar.

En este apartado, se persigue revisar las técnicas de seguimiento, extrapolación y validación existentes actualmente para el “nowcasting” de la posición de estructuras convectivas, tanto a nivel operativo como de investigación. Sin embargo, es importante recalcar que muchos procedimientos emplean una técnica de extrapolación lineal para el tamaño e intensidad de estructuras convectivas, complementando así a la extrapolación de la posición.

En primer lugar hay que centrarse en **caracterizar** las estructuras que son interesantes para el estudio, las convectivas. Es difícil dar una definición de convección pero si nos centramos en sus propiedades radáricas podemos decir que se caracterizan por:

- Intensos valores de reflectividad.

- Fuerte gradiente de reflectividad.
- Una distribución vertical bien definida de reflectividad, alcanzado valores significativos en ciertos niveles.
- Buena continuidad espacial (bi y tridimensional) y temporal.

Cuando se trata de identificar áreas convectivas, una de las técnicas empleadas consiste en marcar las zonas estratiformes y considerar que el resto de ecos constituyen estructuras convectivas (Collier, 1980; Rosenfeld et al., 1995). Estos métodos se basan, principalmente, en la detección de la banda brillante.

Otros métodos relacionan las formas e intensidades de los ecos de reflectividad con las corrientes verticales que caracterizan la convección (efectos indirectos), estableciendo unos criterios para identificar y caracterizar las estructuras convectivas. Estos métodos, bi y tridimensionales, son los que se han adaptado en el INM por el STAP para detectar la convección (Martín et al., 2001). Se remite al lector a la bibliografía específica para más detalles.

Una vez caracterizadas e identificadas las estructuras y células convectivas que conforman una imagen radar regional, el próximo objetivo es extrapolarlas. Para ello es necesario seguir la evolución espacio-temporal de dichas estructuras y células en imágenes temporalmente consecutivas y **asignarlas** de forma coherente. En otras palabras, dada una estructura en un momento determinado (t), debemos tratar de asignarle otra en el momento anterior ($t-dt$), siempre y cuando sea posible. Algunas veces, esta tarea no es inmediata e incluso imposible. El ciclo de 10 min. de disponibilidad de datos radar es una limitación importante cuando se van a analizar estructuras y células convectivas que en muchos casos evolucionan muy rápidamente. El proceso de asignación viene representado en la figura 2.1.

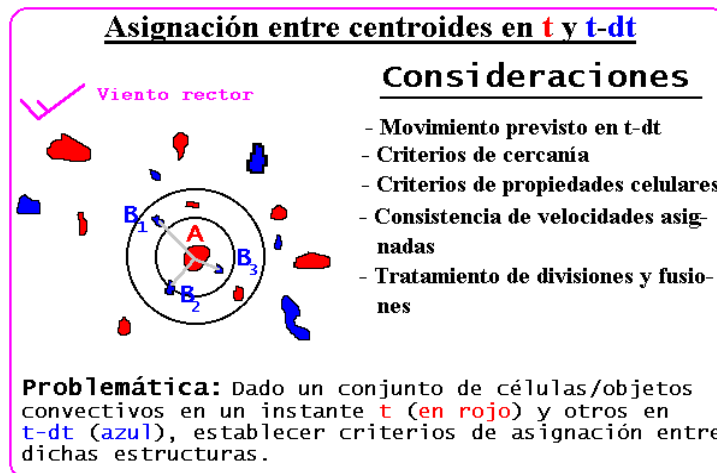


Fig. 2.1 Esquema de asignación de estructuras. El vector que responde a la asignación debe ser consistente con los criterios de proximidad, de propiedades celulares y de velocidades. Figura extraída del Curso de Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda 2000-2001.

2.1.1.- Seguimiento y Extrapolación

Una vez identificada una estructura convectiva es necesario su **seguimiento** para poder realizar, con los datos de su posición pasada, una **extrapolación**. El seguimiento de estas células puede introducir errores en la extrapolación ya que puede confundirse la trayectoria de una célula con disipación y/o generación de otras.

a) Extrapolación lineal

El problema de la extrapolación se puede enunciar de la forma:

$$X(x,y,z,t) = X(x,y,z,t_0) + (t_1 - t_0) \left(\frac{\partial X}{\partial t} \right)_{t=t_0} + \dots$$

Donde X puede ser cualquier variable (posición, área, intensidad,...) y t es el tiempo con $t > t_1 > t_0$. En nuestro caso nos interesa extrapolar la posición de una estructura convectiva, pero existen métodos en que esta información se combina con una extrapolación lineal del área y/o de la intensidad. Los métodos de extrapolación lineal de la posición más importantes son:

1) Método del centroide

Se basa en concentrar en el centroide de una estructura todas sus características y extrapolar su posición (Barclay and Wilk, 1970; Browning et al., 1982). Para cada estructura o célula identificada se define su centroide, que es la representación más simple de estos sistemas: un punto donde se localiza y se centra toda la estructura y a la cual se le asigna las características de ésta. El centroide representa, de manera muy simple, muchas de éstas propiedades para células aisladas o tormentas, por lo que se empleará para extrapolar toda la estructura. El vector extrapolación se obtiene a partir de la distancia entre los centroides correspondientes a una misma estructura en dos exploraciones radar consecutivas siempre que cumpla ciertos criterios. Dichos criterios pueden ser de proximidad (empleado en el INM, Martín et al., 2002), de similitud en la forma de los ecos, o de conservación de ciertas propiedades dentro de la estructura estudiada.

El SCIT (Storm Cell Identification and Tracking, Johnson et al., 1998) desarrollado por el National Severe Storms Laboratory (NSSL), se desarrolló para sustituir al algoritmo WSR-88D y se mejora calculando el vector extrapolación mediante un ajuste de mínimos cuadrados entre las 10 últimas posiciones del centroide y archivando las propiedades de todos ellos. En este sentido, las coordenadas de las posiciones de los centroides a lo largo del tiempo se pueden representar como un sistema lineal de forma que queda definido por los coeficientes a_0 , a_1 , b_0 y b_1 (ver figura 2.2):

$$\mathbf{X} = \mathbf{a}_0 + \mathbf{a}_1 \cdot t$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 \cdot t$$

Se puede calcular el vector teniendo en cuenta determinadas posiciones pasadas (SCIT), la última o dándole a las posiciones distintos pesos dentro del vector. Si la estructura es nueva, no se habrá podido identificar en el momento anterior, por lo que habrá que escoger un vector *first-guess* que se puede obtener, por ejemplo, del viento medio en ese momento previsto por el modelo o un sondeo próximo

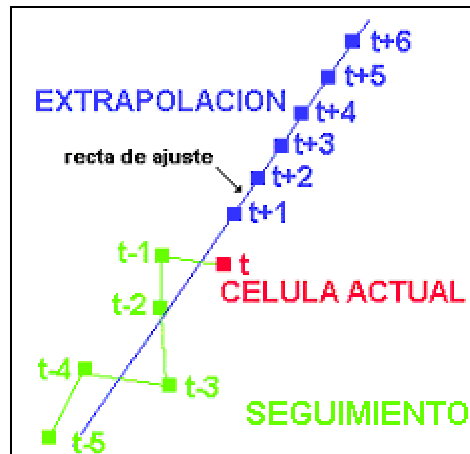


Fig. 2.2 Esquema de seguimiento y extrapolación lineal. Dadas las posiciones pasadas de una estructura (seguimiento) y la actual, se hace un ajuste por mínimos cuadrados y se calcula la extrapolación. Figura extraída del Curso de Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda 2000-2001

Se ha demostrado que este método da buenos resultados para células individuales, estructuras convectivas pequeñas. Lógicamente, esta asignación y extrapolación es meramente geométrica y no contempla crecimiento y disipación ni tiene en cuenta las propiedades intrínsecas de las células asignadas, lo que puede provocar errores en el seguimiento.

Aunque el SCIT (Johnson et al., 1998) es el ejemplo más importante de algoritmo de extrapolación mediante la técnica del centroide, existen sistemas que fueron originalmente lineales, pero han ido evolucionando completándose con algoritmos no lineales. Algunos sistemas de este tipo son: TITAN (Dixon et al., 1993), SCOUT (Einfalt et al., 1991), TRACE3D (Handwerker, 2001), PARAPLUIE (Brémaud et al., 1993).

2.- Método de Correlaciones Cruzadas, CC

Se basa en extrapolar la totalidad de los ecos radar que se estén considerando. Dadas dos exploraciones de radar consecutivas, se desplaza la primera de ellas de tal forma que se obtenga la mayor correspondencia con la segunda (Rinehart and Garvey, 1978; Austin and Bellon, 1974). Ese desplazamiento será el que de lugar al vector extrapolación que será empleado para la advección de la imagen más reciente y ofrecer un pronóstico de imágenes para tiempos futuros.

Puede emplearse para extrapolar el campo entero de reflectividad (movimiento general de todo el campo), regiones aisladas o células embebidas en una región de ecos (locales). Para ello es necesario eliminar de la imagen mediante filtros (tamaño, intensidad,...) aquellas estructuras que no interesen extrapolar y dejar solamente las que se van a estudiar para su posterior extrapolación.

Al igual que en el método del centroide, el método de correlaciones cruzadas empleado originalmente en sistemas como el GDST (Wolfson., 1999), han ido evolucionando hacia sistemas no lineales, aunque basados en correlaciones cruzadas. Ejemplos de ello son: TREC y COTREC (Rinehart., 1978), y SHARP (Bellon and Austin, 1978).

Extrapolación del tamaño y la intensidad de ecos de reflectividad

La limitación más importante para la extrapolación de intensidad de los ecos es la iniciación y disipación, así como los efectos orográficos. Una aproximación muy empleada para predecir tamaño e intensidad de ecos es realizar un ajuste del desarrollo del eco. Tsonis and Austin, (1981), incluían el desarrollo individual de células aplicando una extrapolación lineal a la intensidad y el tamaño (Ej.: hacerle crecer durante 15 min., luego decrecer,...).

Sin embargo, debido a que cada célula posee su propio curso de vida, el resultado no mejoraba mucho a la extrapolación del eco sin modificar las propiedades de intensidad y reflectividad. El TITAN utiliza un ajuste lineal de la historia pasada de la tormenta para la posterior predicción del tamaño de ésta. Así mismo, el SCIT va guardando las características más importantes del centroide durante diez posiciones pasadas para poder emplearlas para la extrapolación del tamaño e intensidad de ecos.

b) No Lineal

1.- Basadas en diversas fuentes de observación

Combinan fuentes de datos y modelos conceptuales para obtener información de la iniciación, el desarrollo y la disipación de la tormenta. La relación entre líneas de convergencia y aumento de convección es el pilar sobre el que se apoyan muchos modelos conceptuales. Para la detección de líneas de convergencia en la capa límite planetaria se emplea observaciones y radiosondeos. También es interesante la detección de cúmulos con la ayuda de imágenes de satélite, por lo que encontramos que en muchos sistemas operativos se emplean el satélite y el radar conjuntamente.

El Auto Nowcast system (AN, Saxen et al., 1999) del NCAR combina la información de las líneas de convergencia a través de su algoritmo COLIDE (Convergence Line Detection and Extrapolation) que identifica, sigue y extrapola líneas de convergencia basándose en datos radar con imágenes de satélite para detectar cúmulos y con el algoritmo TITAN de extrapolación de células.

El GANDOLF system (Pierce et al., 2000) de la UK Met Office combina una extrapolación lineal con un ciclo de vida conceptual empleando radar, satélite, y modelos numéricos mesoescalares (NIMROD).

El algoritmo TITAN (Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis and Nowcasting) como componente del Auto-nowcaster system (AN) del National Center for Atmospheric Research (NCAR), combina el método de correlaciones cruzadas con el de centroides, que se emplea para identificar las tormentas, consideradas entidades tridimensionales. Dixon and Wiener, 1993 le han introducido un algoritmo geométrico para la detección de uniones y divisiones de estructuras.

La técnica VET (Variational Echo Tracking) se basa en aplicar la ecuación de continuidad bidimensional para eliminar componentes de divergencia del campo de vectores de extrapolación debidos a giros, apantallamiento, ... (Li et al., 1995). La Universidad de McGill está dirigiendo sus investigaciones hacia este campo actualmente (Germann and Zawadzki, 2002). Actualmente está operativa en ETH Suiza con el predictor RAINCAST (Smith et al., 2000).

Una técnica basada en reconocer patrones de reflectividad en imágenes es la búsqueda jerárquica (V. Lakshmanan et al., 2000, Chornoboy et al., 1995). Este método se basa en realizar una exploración jerárquica de toda la imagen, dividiendo dos imágenes radar consecutivas en distintas secciones recursivamente de distinta resolución. Como resultado se identifican las estructuras en ambas imágenes y se calculan los vectores desplazamiento que distan menos de una distancia umbral que se forman entre todas las tormentas en imágenes adyacentes. Para probar la consistencia se usan ciertas propiedades de tormenta que se toman como funciones. Cada una de ellas se llama compatibilidad: Intensidad media, tamaño, forma, orientación y convexidad.

También se están empleando radares Doppler para obtener información del contenido de agua y hielo. La evolución del VIL (Vertically Integrated Liquid) se está usando para determinar el inicio de convección. Se combina con información sobre la altura y el contenido de agua en el tope de la nube (Seo and Smith, 1992).

2.- Otras

Otras técnicas más complejas que, además, son computacionalmente más lentas, usan los modelos numéricos y las redes neuronales.

Determinados modelos numéricos de mesoescala son capaces de reproducir líneas de convergencia en bajos niveles. Si se contrastan los resultados del modelo con datos observados se pueden obtener predicciones muy fiables (Wilson et al., 1998).

Otro campo en el que se está investigando son las redes neuronales (Moriyama and Muneo, 2000), así como aproximaciones estadísticas (Seed and Keenan, 2001) y “*forecast*” de probabilidad (Andersson and Ivarsson, 1991).

A pesar de la complejidad de estos métodos, no se han encontrado resultados satisfactorios hasta el momento. Esto es, en parte, debido a que la convección organizada u su evolución son fenómenos muy complejos, en sí misma.

2.1.2.- Verificación

Una vez extrapolada la imagen es necesario conocer, a posteriori, la bondad de los resultados obtenidos comparando la imagen predicha y la real. Se suelen emplear distintos métodos de verificación. Analicemos algunos de los encontrados en la bibliografía.

a) Parámetros estadísticos estándar

Cuantifican la observación, punto a punto, del fenómeno observado respecto al predicho. Estos parámetros son los que se ha empleado en este proyecto y se explicará detalladamente en el apartado de verificación de resultados. Como ya se verá a lo largo de estas notas, estos parámetros poseen algunas limitaciones, una de las cuales es que no pueden determinar si la intensidad del campo de reflectividad es sustancialmente diferente de la que observamos, ya que solo realiza la comparación punto a punto y no por áreas.

b) Validación por lógica difusa (*Fuzzy logic*)

En vez de realizar la verificación calculando los parámetros estadísticos punto a punto, se construye un núcleo (Kernel) alrededor del píxel de estudio (Hallowell et al., 1999). De esta forma se da cierta tolerancia a errores espaciales, permitiendo que lo que ocurre en un punto halla sido predicho en un entorno de ese punto.

c) Considerar errores de fase (*Phase Shifting Approach*)

Cuando se trabaja evaluando extrapolaciones a muy pequeña escala, cualquier error espacial o temporal produce unos parámetros estadísticos muy malos. Incluso aunque halla sido predicha la iniciación de una tormenta, su duración y su movimiento general, se obtendrán bajos valores estadísticos si la posición de la tormenta no ha sido predicha de forma precisa. Aparecen errores de fase espaciales y temporales (Phase and Time lags). Esta aproximación considera estos errores de fase y los trata de forma especial con el fin de minimizarlos y ofrecer una verificación más útil desde el punto de vista de la predicción.

2.2.- Antecedentes en el INM

A nivel regional existe un procedimiento operativo en entorno McIDAS para la extrapolación de estructuras convectivas bidimensionales que se basa en la técnica del centroide (ver documentación YRADAR, Martín et al., 2002). La experiencia ha ido demostrando que este método da buenos resultados cuando se trata de extrapolar estructuras pequeñas que no sufren fusión ni división de un instante a otro. Cuando tratamos estructuras grandes y con formas no uniformes, el centroide no representa con exactitud la forma ni las propiedades de la estructura, por lo que resulta necesario recurrir a otro método de seguimiento y extrapolación.

Se ha extendido el método de centroides a los datos radar del mosaico nacional aplicando allí dicha técnica tal y como se hace en imágenes regionales radar. (Ver documentación YRADARNA, Martín, 2002). Esta aplicación está operativa en una terminal McIDAS dentro del STAP, cuya imagen se sirve en la INTRANET, y en el terminal de vigilancia del CNP.

El único precedente de seguimiento y extrapolación por CC dentro del INM es el originario del sistema radar regional, desarrollado por la Universidad de McGill y basado en aplicar CC a las imágenes radar regionales completas. El resultado del método es un único vector de mejor ajuste entre dos imágenes. Al ser un vector único de extrapolación, tiene como limitación importante de cara a la convección, el no permitir movimientos diferenciales dentro de la misma imagen, trasladando todas las

estructuras mediante el mismo vector extrapolación. Este procedimiento esta operativo en los terminales radar regional.

Un método, algo más elaborado, es utilizado en los productos del mosaico nacional tipo SIRAM y disponible en McIDAS: El área radar mosaico nacional, menos Canarias, es dividida en diferentes subáreas a las que se le aplica el método de CC. Los vectores correlación obtenidos para cada subárea son empleados para realizar extrapolaciones a cada uno de los píxel que conforman el área mosaico nacional mediante interpolación de dichos vectores, que están asignados en el centro de cada subárea. La imagen mosaico prevista se ve deformada al aplicar desplazamientos diferenciales de las estructuras que conforman las subáreas.

3.- PROCEDIMIENTO DESARROLLADO

Por todo lo comentado, y a la vista del análisis de los resultados de las diferentes técnicas de extrapolación analizadas en el apartado del “estado del arte”, resulta que se hace necesario aplicar otra técnica diferencial distinta a la de los centroides. Se ha elegido el método de CC para aplicarlo a estructuras convectivas amplias de imágenes regionales. Con ello se podría complementar el procedimiento de “forecast” basado en centroides para obtener los mejores resultados según el tamaño de las estructuras que se analicen. Así mismo, y con este nuevo método, se identificaría y se obtendría un movimiento diferencial de cada una de las estructuras, y no un vector extrapolación completo de toda la imagen.

Una vez establecida y elegida la metodología, la técnica de CC aplicada a estructuras aisladas, hay que proceder al desarrollo de la aplicación. Éste parte de los archivos generados por la aplicación operativa YRADAR bidimensional basada en el método del centroide. Dichos archivos (ver Anexo III) contienen toda la información necesaria para el análisis de estructuras, tales como los tamaños de las estructuras, las coordenadas que definen las regiones donde se encuentran y el tipo de asignación entre estructuras en dos momentos consecutivos. A partir de aquí se define el procedimiento básico como aquel que se va a aplicar al área o subárea de estudio para obtener la correlación.

Dadas dos áreas o subáreas (*) en $t-dt$ y en t , que contienen estructuras convectivas, la primera se desplazará según un *first-guess* y se correlaciona con la segunda. Después se realizarán 9×7 desplazamientos alrededor del *first-guess* calculando el coeficiente de correlación correspondiente a cada imagen en $t-dt$ desplazada con la imagen en t . Con todos los coeficientes calculados se construye una matriz de dimensiones 9×7 de la que extraeremos aquel desplazamiento cuyo coeficiente de correlación es máximo. En el caso en que dicho coeficiente esté en el límite de los desplazamientos permitidos, se extenderá la búsqueda a otros 9×7 desplazamientos alrededor del que era el punto de correlación máximo. Dicho desplazamiento es el que da lugar al mejor vector extrapolación.

* Utilizaremos el concepto de imagen de forma equivalente al de área, y viceversa.

Este procedimiento, aparentemente sencillo, posee varias dificultades que hay que afrontar. Dado que lo que se persigue es aplicar el método a estructuras convectivas aisladas, se hace necesario definir con exactitud las imágenes de trabajo que se van a emplear. Si como imagen entendemos el área completa del radar regional, lo que interesa no es desplazar toda la imagen, sino subimágenes (rectángulo equivalente, figura 3.1), cada una de las cuales está definida por una estructura previamente identificada. Se ha abordado la extrapolación por CC desde dos puntos de vista distintos:

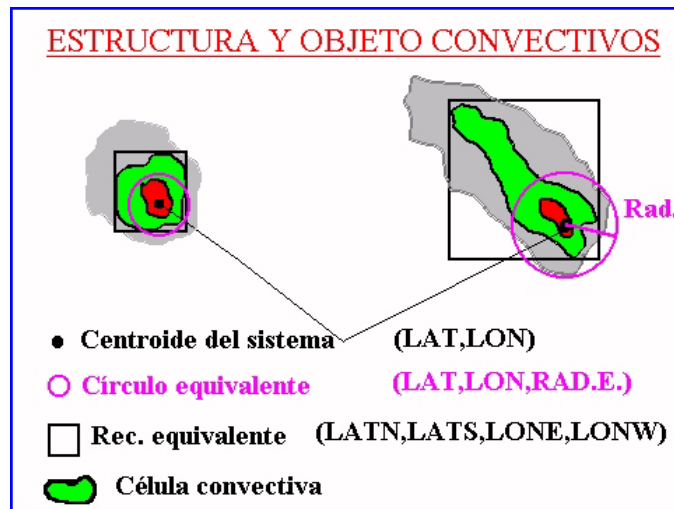


Fig. 3.1 Definición de subimagen como el rectángulo equivalente que inscribe dentro de él a la estructura considerada.

Análisis “piramidal”

Primero se le aplica el procedimiento básico, explicado al principio del apartado, a toda el área obteniendo así un primer coeficiente de correlación. Luego se dividen las áreas (la de $t-dt$ y la de t) en cuatro subáreas iguales. A cada parte de la imagen de $t-dt$ y de t se le somete de nuevo al mismo procedimiento y se obtienen otros cuatro coeficientes de correlación. Aquellas subimágenes cuyos coeficientes sean mayores al que se obtuvo con la imagen completa vuelven a dividirse en cuatro y se repite el proceso hasta que los coeficientes sean menores que el de la subárea de la que provienen o hasta un número definido de iteraciones. Aparte de ser éste un método computacionalmente lento, los resultados que se obtuvieron no eran de la calidad esperada, puesto que, a veces, trozos de una misma estructura pertenecían a subáreas diferentes, obteniéndose así, para la misma estructura, distintos vectores de extrapolación.

Análisis de estructuras

Dado que el método de CC hace uso de los archivos de la aplicación YRADAR, es posible crear subáreas definidas por las coordenadas del rectángulo equivalente de cada estructura, que sí engloban a las estructuras completas, para aplicarles el procedimiento básico. Así, se obtienen tantos vectores extrapolación como estructuras suficientemente amplias halla en la imagen (recordar que el método de CC se plantea

para extrapolar las estructuras amplias(*), solo se escogerán éstas para correlacionar). Este procedimiento se divide básicamente en dos partes:

3.1.- Identificación de estructuras, análisis de asignaciones y tamaños (comando UNION)

En cada intervalo analizado, la aplicación de CC obtiene la información generada anteriormente por el procedimiento de seguimiento y extrapolación por centroides para cada estructura (ver Anexo III para ver contenido de los archivos) y analiza las estructuras mayores que cierto tamaño umbral. Esas serán las que, de una forma u otra, se van a tratar de extrapolar por CC. A partir de aquí, es necesario definir las relaciones entre estructuras para poder aplicar el método. Todo esto se hace a través del comando UNION.

a) Relación entre estructuras

Para esta primera versión se han usado los siguientes conceptos relativos a la relación de “parentesco” entre estructuras basadas en los archivos de la aplicación YRADAR.

Estructura “madre”

Dada una estructura, en el instante t , se dice que tiene “*madre*” **sí ha sido asociada o asignada con otra en el momento anterior**, $t-dt$. Hay que tener en cuenta que, una estructura solo puede estar asociada con una “madre” y solo una.

Estructura “hermana”

Cuando una estructura no tiene “madre”, pero está muy cerca de otra que si la tiene, entonces se le asigna el vector de ésta última (por proximidad) y se consideran que son “hermanas”.

Un caso particular e importante lo constituye la división de estructuras en el que una “madre” se divide en dos. Las nuevas quedarán muy cerca entre si, solo a una de ellas se le asigna una estructura madre anterior, a la otra, por cercanía, se le asocia el vector de la primera. En este caso, diremos que las dos estructuras son “hermanas” aunque solo una de ellas posea “madre”.

b) Aplicación del método de CC según la relación entre estructuras

De sí una estructura tiene “madre” y del tamaño de ésta, dependerá la forma de aplicar el método. El tamaño y las características de las estructuras actuales y las del momento anterior se obtienen de la aplicación YRADAR del mismo modo que si hizo con las relaciones de “parentesco”.

* En la versión 1.0 no operativa se establece, por defecto, 30 píxeles como tamaño umbral para considerar que una estructura es amplia.

De esta forma ya se tienen las estructuras identificadas, se saben las relaciones entre ellas y las del momento anterior y su tamaño. El modo de aplicar las CC a cada estructura es el siguiente:

- Si una estructura es grande y tiene “madre” grande se crean dos subáreas, una conteniendo a la propia estructura y otra a su “madre”. El *first-guess* será el vector extrapolación por CC que se obtuvo en el momento anterior (como la “madre” es grande fue extrapolada por CC en la imagen anterior).
- Si una estructura es grande y tiene “madre” pero ésta es pequeña, se crea una subárea para la estructura. Como la subárea que contiene a la “madre” es muy pequeña suponemos como su subárea las mismas coordenadas que la de la estructura, pero desplazada hacia atrás según el vector extrapolación calculado por centroides. Como la “madre” es pequeña, no fue extrapolada por CC en el momento anterior por lo que se empleará como *first-guess* el viento medio obtenido por el modelo en el estrato superficie-500 hPa. A partir de ahí, se realizan los desplazamientos para obtener el vector con mejor coeficiente de correlación.
- Si una estructura no tiene “madre” pero tiene hermana el procedimiento será el mismo que en el caso en que la “madre” sea pequeña.
- Si una estructura no tiene “madre” ni “hermana” pero es una estructura grande, se le aplicará como vector extrapolación el *first-guess* tomado del modelo. Se calculará el coeficiente de correlación dado por dicho vector, pero no se desplazará en busca del mejor desplazamiento.
- Si una estructura es pequeña, no se aplica el método de CC.

(Ver Anexo correspondiente para documentación del comando y diagrama de flujo del programa).

3.2.- Extrapolación de estructuras por CC

Una vez establecidas las condiciones para realizar las CC hay que construir las matrices de datos correspondientes a cada subárea y aplicar el programa de cálculo de correlaciones cruzadas. Así mismo, es necesario obtener la información de verificación y representar los productos por pantalla. Todo esto se hace a través del comando SUBÁREAS (Ver Anexo correspondiente). Se encarga del procedimiento básico, comentado al principio del apartado, aplicado a estructuras aisladas (subáreas, no áreas completas) y de dar el producto por pantalla.

4.- VERIFICACIÓN DE RESULTADOS

Cuando se da una predicción, es muy aconsejable ofrecer algún tipo de parámetro objetivo que permita estimar su fiabilidad para poder así interpretar la calidad y habilidad del procedimiento. Además, obtener parámetros que indiquen baja fiabilidad de la predicción puede conducir a la detección y posterior mejora de errores en el método empleado. Para comparar y evaluar objetivamente las diferencias entre distintas técnicas de predicción para un mismo fenómeno, es preciso hacerlo a través de unos parámetros objetivos de verificación.

En el caso que se está tratando, la verificación de extrapolación de estructuras convectivas es complicada por la propia naturaleza del fenómeno. La convección se caracteriza por la rápida evolución de su morfología e intensidad. Así mismo, las estructuras convectivas, sufren numerosos procesos de unión y división dificultando no solo su extrapolación, sino también la verificación del método empleado para ello. Recordemos que ni la técnica de CC ni la del centroide tienen en cuenta estos procesos y extrapolan el área de la estructura sin modificar su forma o tamaño. Sin embargo, la verificación sí tiene en cuenta dichos procesos, aunque de forma indirecta, ya que se basa en una comparación entre la estructura extrapolada y la observada para un momento determinado. Con todo esto, se pretende recalcar que la verificación de métodos de extrapolación de estructuras convectivas conlleva una dificultad añadida al ser muy variable el proceso que se está verificando, asociando así a la verificación errores diferentes al de la predicción de la futura posición.

El método que se ha elegido se basa en comparar punto a punto la posición predicha y la observada. Por ello utilizaremos una tabla de contingencia (tabla 4.1) que muestra la frecuencia de predicciones, aciertos o fallos:

Éxito (hit) – Se predijo y ocurrió

Fallo (miss) – No se predijo y ocurrió

Falsa alarma (false alarm) – Se predijo, pero no ocurrió

Nulo (Correct negative) – No se predijo y no ocurrió

Tabla de contingencia				
		Predicho		
		Sí	No	Total
Observado	Sí	Éxito	Fallo	Observados
	No	Falsas alarmas	Nulo	No observados
Total	Total	Predichos	No predichos	Total

Tabla.4.1. Tabla de Contingencia para verificación

Un modelo de predicción perfecto daría solo éxitos y nulos, sin ningún fallo o falsas alarmas.

A partir de aquí pueden usarse distintas variables estadísticas para obtener la verificación. En este caso se han empleado las siguientes:

Probabilidad de detección (POD):

$$POD = \frac{\acute{E}xitos}{\acute{E}xitos + Fallos}$$

Representa la fracción de fenómenos observados que fueron predichos correctamente.

Falsas Alarmas Rate (FAR):

$$FAR = \frac{FalsasAlarmas}{\acute{E}xitos + FalsasAlarmas}$$

Mide la fracción de predicciones que no fueron observadas. Ignora los fallos

Critical Success Index (CSI):

$$CSI = \frac{\acute{E}xitos}{\acute{E}xitos + Fallos + FalsasAlarmas}$$

Mide la fracción de observaciones y/o predicciones que se predijeron correctamente. Es sensible a los éxitos. Penaliza tanto las falsas alarmas como los fallos.

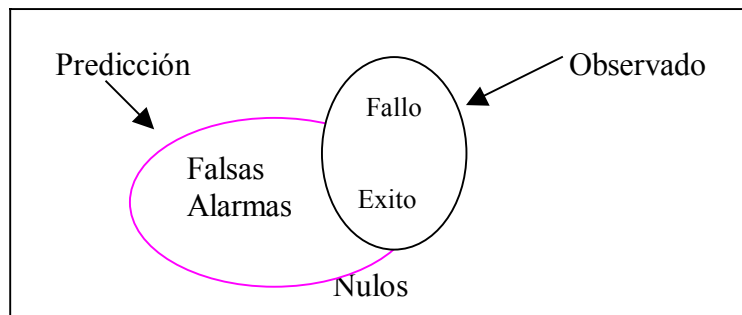


Fig. 4.1 Esquema del significado de los elementos de la tabla de contingencia. En rosa, el fenómeno predicho, en negro el observado. La intersección de ambos da lugar al espacio que viene definido por los distintos elementos de la tabla: éxitos, fallos, falsas alarmas y nulos.

En el caso que se está tratando aquí, para cada instante, se tiene un vector extrapolación mediante el método de CC y otro mediante el del centroide. Desplazando la imagen según dicho vector se tiene el área convectiva extrapolada a un determinado instante. Pasado ese tiempo se puede hacer una verificación del área extrapolada por ese vector (**no del actual**) calculado en el momento anterior mediante cada método. Se construye una tabla de contingencia en donde:

- Éxito: Tanto en la imagen actual observada como en la desplazada con el vector extrapolación, existe, en la misma posición, un eco convectivo.
- Fallo: Son aquellos puntos donde la imagen actual observada tiene un eco convectivo pero la imagen desplazada no, es decir, no se ha predicho.
- Falsas Alarmas: Aquellos puntos donde en la imagen desplazada hay un eco convectivo, pero en la observada no.
- Nulo: Puntos donde en ninguna de las dos imágenes aparece un eco convectivo.

Una vez calculados los coeficientes de verificación (POD, FAR, CSI) para cada método, se puede realizar una comparación entre ellos. En la versión 1.0 (no operativa) de este procedimiento, aparecen, en el margen derecho de la pantalla, estos coeficientes para cada uno de los métodos (CC en la izquierda y centroide a la derecha). Ver detalles en el apartado de producto.

5.- PRODUCTO. APLICACIÓN A CASOS

En este apartado se pretende revisar algunas de las situaciones estudiadas a lo largo del proyecto. Con el objetivo de observar la habilidad del método en función de los distintos tamaños y formas de las estructuras convectivas encontradas, ha sido necesario aplicar el procedimiento a situaciones que, a priori, parecen posibles limitaciones del método. Así mismo, y para comparar las dos técnicas que estamos comentando, se ha forzado el estudio de aquellos casos en que las limitaciones de uno de los métodos podrían ser las ventajas del otro. A continuación, se revisarán algunos de los casos más significativos y se tratará de familiarizar al lector con el producto del procedimiento y las distintas conclusiones que pueden obtenerse de la correcta interpretación de los parámetros.

5.1.- Producto

A continuación, se comentan y explican con ejemplos las salidas gráficas generadas por la aplicación en su primera versión experimental. Un producto de predicción inmediata ha de ser lo más accesible posible, lo que hace necesario que el formato de salida del procedimiento sea amigable y permita obtener conclusiones de inmediato.

El formato que se ha desarrollado para el producto de la técnica de CC, además de proporcionar el vector extrapolación más probable, facilita la posición predicha (por medio de contorneos) del área convectiva identificada previamente trasladadas por ese vector. Además, con el objetivo de dar una idea de la calidad del producto que se está ofreciendo, se facilitan los coeficientes de verificación de la extrapolación del momento anterior que, aunque no garantizan que en el futuro la calidad sea la misma, si da idea de cómo ha funcionado el método en extrapolaciones pasadas. Esto, junto al coeficiente de correlación, puede ayudar al predictor a hacerse una idea de cuál es la habilidad del método si se saben interpretar dichos coeficientes.

El producto del procedimiento de CC se presenta en dos formatos: por pantalla y como archivo (ver Anexo correspondiente). El primero de ellos se va a explicar a continuación sobre una figura (figura 5.1). Sólo se aplica el procedimiento de CC a las estructuras convectivas superiores a 30 píxeles (en este caso). La imagen de fondo analizada es el PPI del radar activado en el momento en que se lleva a cabo el análisis.

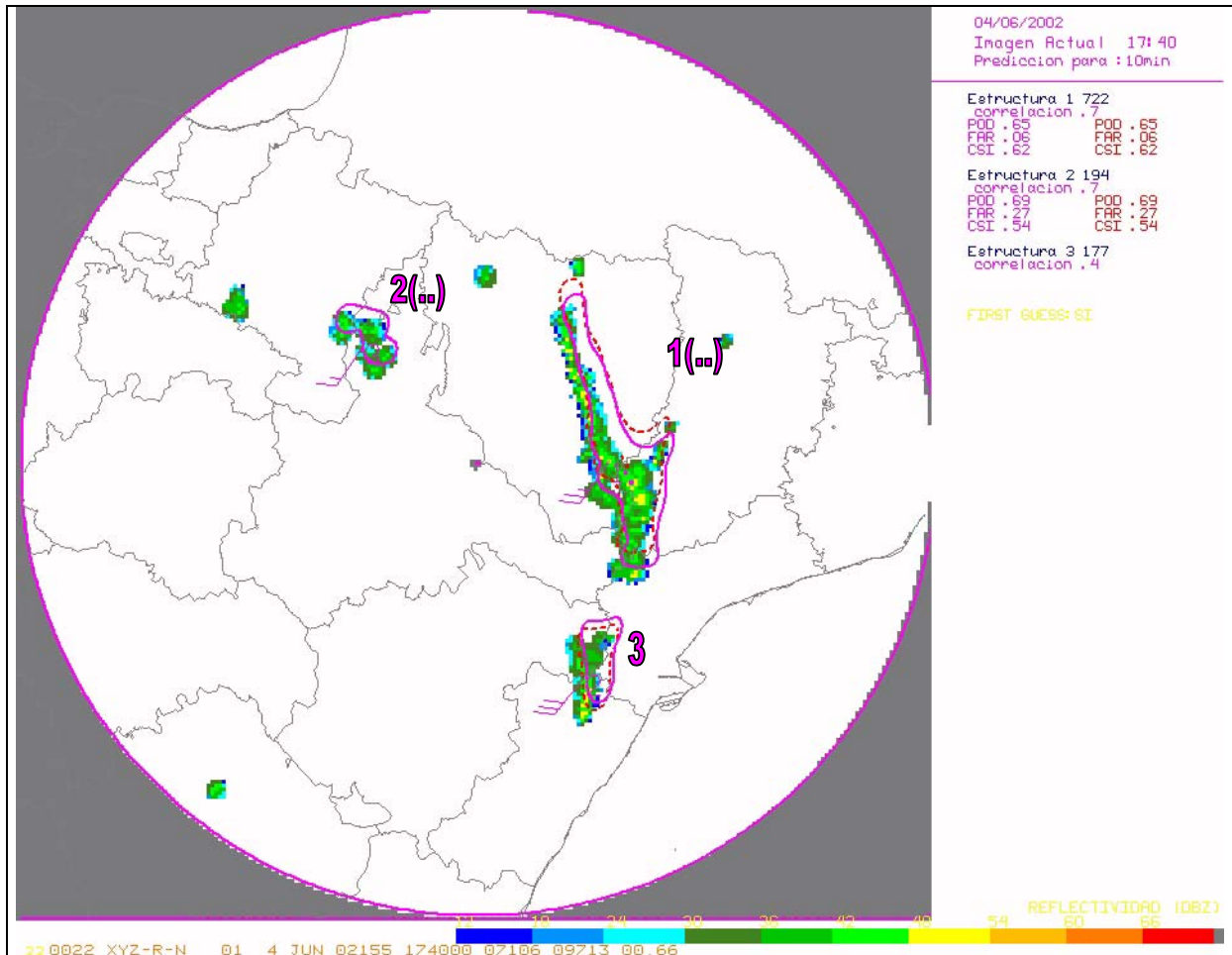


Fig. 5.1 Producto experimental en terminal McIDAS del procedimiento de CC.
Radar de Zaragoza, 4 de Junio de 2002.

Nota. Los números grandes en magenta se han incorporado para facilitar al lector el seguimiento del texto.

El margen derecho de la figura 5.1 está constituido por la columna de información de extrapolación. En la cabecera, se indica la fecha y la hora de la imagen actual. Si se ha activado la extrapolación por CC aparecerá un mensaje con el intervalo de validez de la predicción (Ej.: Predicción para: 10 min.). El resto de la columna está conformado por la información correspondiente las estructuras analizadas por CC. Cada una de ellas está designada por el número, en magenta, que aparece en el centroide de cada estructura. La información que se ofrece de cada estructura es:

- Número de estructura
- Tamaño: A la derecha del número que designa a cada estructura (en número de píxeles)

- Coeficiente de correlación con el que se ha obtenido el vector extrapolación.
- Los coeficientes de verificación: Como ya se ha comentado éstos se calculan comparando la imagen anterior extrapolada con el vector extrapolación anterior y la imagen actual.
- Si ha sido extrapolada mediante el vector *first-guess* aparece un mensaje en amarillo (FIRST GUESS:SI) debajo de los coeficientes de verificación.

El resto de la pantalla viene ocupada por la última imagen convectiva. Las estructuras que son suficientemente grandes para ser extrapoladas por CC vienen contorneadas de dos colores. En línea continua magenta se designa la extrapolación realizada por el método de CC en color rojo y discontinua, la realizada mediante el método del centroide. Dado que el procedimiento está en fase de prueba, se muestran ambas informaciones pero posteriormente habrá que elegir entre una u otra mediante un criterio de tamaño, aún por establecer. En el centroide de cada estructura, aparece dibujado el vector extrapolación, en nudos, obtenido mediante el método de CC.

Es importante recordar que los coeficientes de verificación ofrecen, en cada instante, información de la calidad de la extrapolación anterior. Si por alguna razón éste no se calculó, la verificación no tiene sentido y no se mostrará por pantalla. Existen casos en que se facilita la información de verificación para el método de centroides pero no para el de CC. Dichos casos se producen porque el método de centroides se activa para todo tipo de estructuras detectadas, sin embargo, el método de CC sólo lo hace para estructuras amplias. En las figura 5.2 y 5.3 podemos ver algunos de los casos ante los que nos vamos a encontrar al enfrentarse con la información de verificación.

El siguiente intervalo entre 11:20 y 11:30 UTC pertenece al radar de Zaragoza del 8 Julio de 2002. Estudiaremos el producto del procedimiento aplicado a la imagen de las 11:30 UTC dado que en dicho momento el análisis y verificación de la extrapolación para cada estructura, presenta muchos de los formatos que se van a encontrar normalmente en el análisis de la convección mediante este procedimiento en su versión experimental.

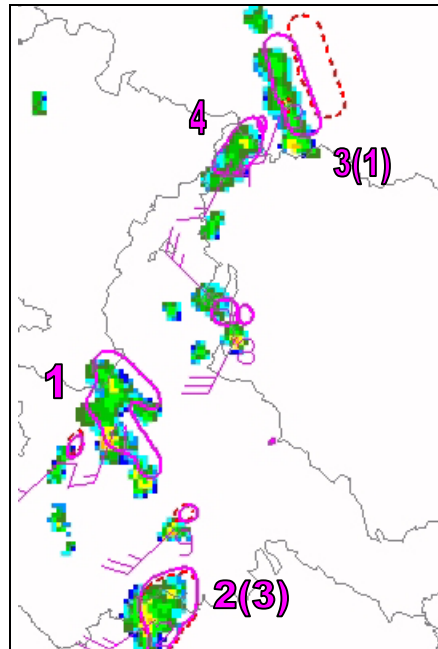


Fig. 5.2 Detalle del radar de Zaragoza a las 11:20 UTC

En la figura 5.2 podemos observar las estructuras convectivas existentes a las 11:20 UTC con sus respectivas extrapolaciones. Nos llama la atención la estructura “3” a la que se le han asignado extrapolaciones muy diferentes según el método empleado. Veamos la verificación de esta extrapolación en la figura 5.3 que muestra el análisis de estructuras diez minutos más tarde.

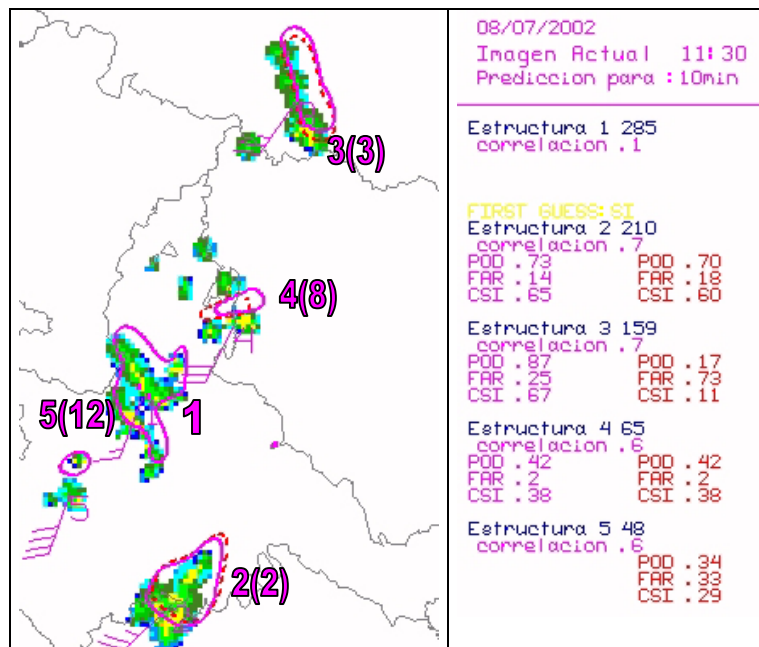


Fig. 5.3 Montaje de imagen y columna de verificación para las 11:30 UTC

Según la ausencia o no de información de verificación para cada una de las estructuras analizadas, éstas pueden clasificarse en tres tipos, a saber:

- Las que tienen coeficientes de verificación correspondiente a ambos métodos son aquellas que fueron extrapoladas por el método del centroide y por el de CC en el momento anterior, es decir, a sus “madres”. El primero de los métodos analiza todo tipo de estructuras, independientemente de su tamaño, mientras que el de CC solo extrapola aquellas que superan un tamaño umbral (30 píxeles en este caso). Por tanto, para que la estructura “madre” de la que se está analizado fuera extrapolada por ambos métodos, ésta tenía que ser grande. Este es el caso de las estructuras “2”(2), “3”(3) y “4”(8).

De ellas, la “4”(8) es especialmente interesante ya que los coeficientes de verificación de las dos extrapolaciones que lleva asociada coinciden. Esto se debe a que la “madre”, la estructura “8” en la figura 5.2, era nueva en el momento anterior y fue extrapolada de la misma manera, por *first guess*, mediante ambos métodos. La figura “3”(3) que es la que nos llamaba la atención dada la diferencia en la extrapolación según el método, lleva asociados mediante CC coeficientes de verificación mucho más favorables que mediante centroides, pudiendo concluir de esto que la extrapolación anterior fue mejor por CC que por centroides, lo que no implica que vaya a ser mejor en el futuro.

- Las que no poseen coeficientes de verificación asociado a ninguno de los dos métodos son aquellas que no existían en el momento anterior (no tienen “madre”). En función de si tienen “hermanas”, la extrapolación se llevará a cabo de forma distinta. Si no tienen “hermanas” ambos métodos las extrapolarán por *first guess* (FIRST GUESS:SI) y coincidirán ambas extrapolaciones. En el caso de que tengan “hermana” cada método procederá de forma distinta, pudiendo ocurrir que, aunque encontremos escrito FIRST GUESS:SI, las extrapolaciones no coincidan (Ver diagramas de flujo del programa). Normalmente estas extrapolaciones suelen llevar asociado un coeficiente de correlación muy bajo como se ve en el caso de la estructura “1” que es nueva.
- Las que poseen información de correlaciones mediante el método del centroide pero no de CC, existían en el momento anterior, pero por alguna razón no existe información de su extrapolación por CC. Esto puede ser debido a dos cosas:
 - Tienen “madre”, pero es pequeña, por lo tanto no fue extrapolada en el momento anterior por el método CC. Este es el caso de la estructura “5”(18) cuya madre es la 18 del momento anterior, que ni siquiera aparece en la figura 5.2 porque era muy pequeña y no se extrapoló por CC, aunque si por centroides.
 - No existe información de CC porque es la primera vez que se aplica el procedimiento o el intervalo de tiempo entre las dos imágenes analizadas anteriormente era mayor de 20 minutos y no se realizó la extrapolación. La primera pasada de CC puesto que hasta entonces no existe información.

5.2.- Aplicación a casos

Aquí se van a presentar algunas de estas situaciones, proporcionando además, algunas pautas sobre cómo interpretar estos productos, incluso en situaciones relativamente complejas.

5.2.1.- Algunas consideraciones sobre los coeficientes de verificación. 4 Junio 2002, Zaragoza

Para familiarizarse con la información que puede extraerse de los coeficientes de verificación, se tomará y comentará un intervalo de tiempo comprendido entre las 16:50 UTC y las 17:00 UTC. Para facilitar la representación del producto, se ha realizado un montaje con el detalle de la imagen que muestra las estructuras y la columna de información. Estos montajes son ejemplarizadores y no se disponen a nivel pre operativo.

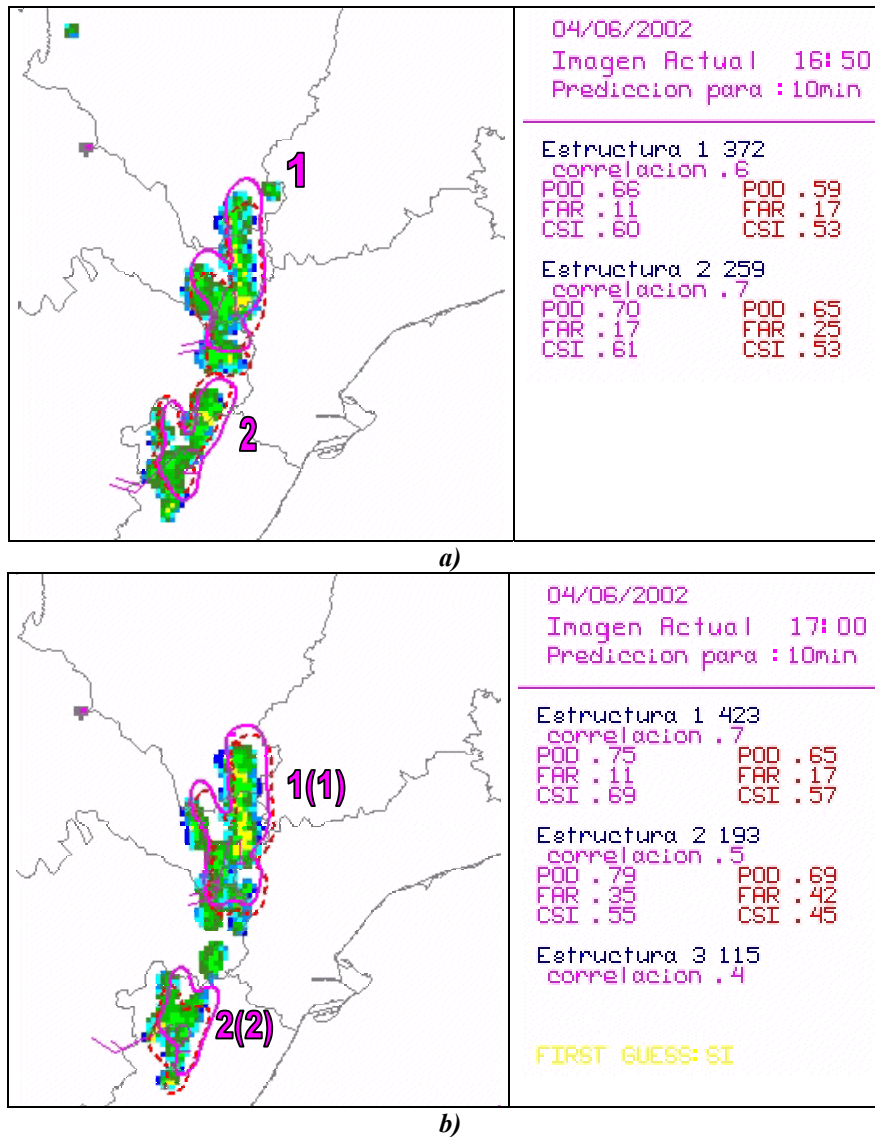


Fig. 5.4 Montaje de la columna de información del análisis de estructuras y detalle del radar de Zaragoza, 4 Junio de 2002 a las (a) 16:50 UTC y (b) 17:00 UTC.

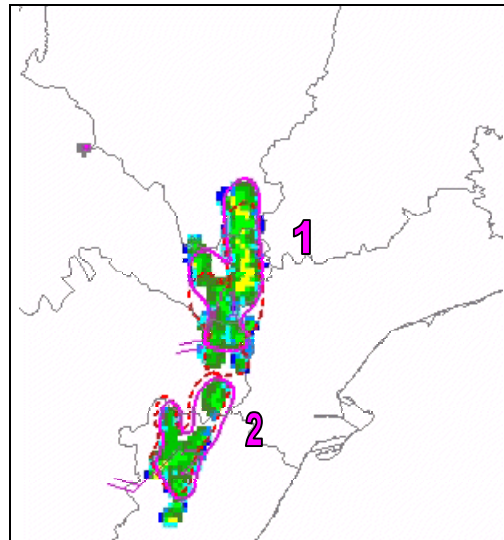


Fig. 5.5 Superposición del contorneo de las estructuras extrapoladas y de la imagen observada a las 17:00 UTC.

Si se observa la imagen de las 17:00 UTC (figura 5.4b) existen tres estructuras analizadas, aunque en la imagen solo se ven dos de ellas. Ambas, la “1”(1) y la “2”(2), han sido extrapoladas por ambos métodos ya que existe información de verificación de cada uno de ellos. Como los vectores extrapolación calculados mediante CC y centroide a las 16:50 UTC (figura 5.4a) eran distintos (los contorneos magenta y rojo no se superponen) se obtendrán distintos coeficientes de verificación. La estructura “3” que no aparece en la imagen, ha sido extrapolada con el *first-guess*, como se puede ver en el análisis de estructuras (en amarillo en el margen derecho) indicando que no fue extrapolada en el momento anterior por ninguno de las dos técnicas.

En la figura 5.5 se muestra la extrapolación realizada en la figura 5.4a (extrapolación a 10 min.) y la imagen observada de las 17:00 UTC con el objetivo de caracterizar los coeficientes de verificación. Para el método de CC encontramos $POD=0.75$, $FAR=0.11$, $CSI=0.69$, mientras que para el del centroide $POD=0.65$, $FAR=0.17$, $CSI=0.57$. Veamos lo que representan gráficamente estos coeficientes.

Las zonas donde coincide la imagen con el contorneo representan la aportación al POD (CC 0.75; Centroides 0.65). Cuanto mayor sea este coeficiente, más coincide la extrapolación y la observación, siendo esto un indicador importante de la habilidad de la técnica de extrapolación. El área que delimita el contorneo pero que no está cubierta de imagen representa las falsas alarmas, que son la aportación al FAR (CC 0.11; centroides 0.17). Este coeficiente indica que la extrapolación contiene puntos convectivos que no han sido observados, provocando un desajuste entre ambas e influyendo negativamente en la evaluación de la habilidad de la técnica. Por último, el área cubierta de imagen pero que no está dentro del área del contorneo son fallos. El resto son nulos y no aportan nada a los coeficientes de verificación. Por tanto, se comprueba que en este caso, donde las estructuras convectivas estudiadas son amplias y con forma no homogénea, el método de CC y el de centroides ofrecen distintos resultados del vector extrapolación, siendo los coeficientes de verificación más favorables para el método de CC que para el del centroide.

5.2.2.- División y formas complejas en estructuras convectivas bien tratadas por CC.

Como ya se ha mencionado, existen situaciones donde se dan procesos de fusión y división entre ellas en que la evolución de las estructuras convectivas es muy compleja. En estos casos, el método de CC da mejores resultados, en general, que el de centroides. En este apartado veremos dos de estas situaciones.

Situación del 8 de Julio del 2002, Radar de Zaragoza

En primer lugar, nos centraremos en las estructuras que se desarrollaron en las provincias de Huesca y Zaragoza entre las 10:30 y 10:50 UTC el 8 Julio de 2002. Se estudiará la extrapolación realizada a las 10:40 UTC para 10 minutos más tarde.

En la figura 5.6a se observan las estructuras existentes a las 10:30 UTC que son las que van a ir sufriendo fusiones y divisiones a lo largo del periodo de estudio. Los dos casos más interesantes de discrepancias entre técnicas de seguimiento y extrapolación por centroide y CC se pueden observar en las estructuras “3” y “2” de la figura 5.6a. En el caso de la estructura “3” dichas discrepancias provienen de un cambio en la morfología. En el caso de la estructura “2”, es una división la que da lugar a las diferencias.

En la figura 5.6b, se muestra la extrapolación para las 10:50 UTC. La estructura “1”(3) de la figura 5.6b, es extrapolada con resultados muy discrepantes. Mientras que el método de CC se basa en comparar áreas para encontrar el vector extrapolación, la técnica del centroide compara las posiciones de los centroides. Al cambiar la forma de una estructura, el área, aunque diferente, sigue manteniendo una forma y tamaño parecidos si dicha variación en la morfología no es muy grande. Sin embargo, la posición del centroide cambia radicalmente, de modo que el centroide no se desplaza de la misma forma que se desplaza el área convectiva. De aquí surgen las diferencias en el vector extrapolación entre ambos métodos.

La otra discrepancia ocurre en la estructura “4” en la figura 5.6b. Vuelve a aparecer un movimiento muy diferente según se extrapole mediante el método del centroide o el de CC. En este caso ha ocurrido una división. La estructura “2” de las 10:40 se ha dividido en la “4”(2) y la “5”, diez minutos más tarde. A la estructura “4” se le ha asignado la “2” del momento anterior y, como consecuencia, el desplazamiento del centroide en dicho intervalo de tiempo no es representativo del movimiento de traslación, sino que está fuertemente influenciado por el cambio de morfología de las estructuras y, por lo tanto, por las variaciones de la posición del centroide debidas a la distribución de reflectividades dentro de una misma estructura.

Para averiguar cuál de las dos técnicas da mejores resultados hemos de verificar las predicciones. Las figuras 5.6c y 5.6d muestran la imagen a las 10:50 UTC y los coeficientes de verificación correspondientes a la extrapolación anterior. Las discrepancias provenían de las estructuras “2” y “4” que son en las que nos vamos a centrar.

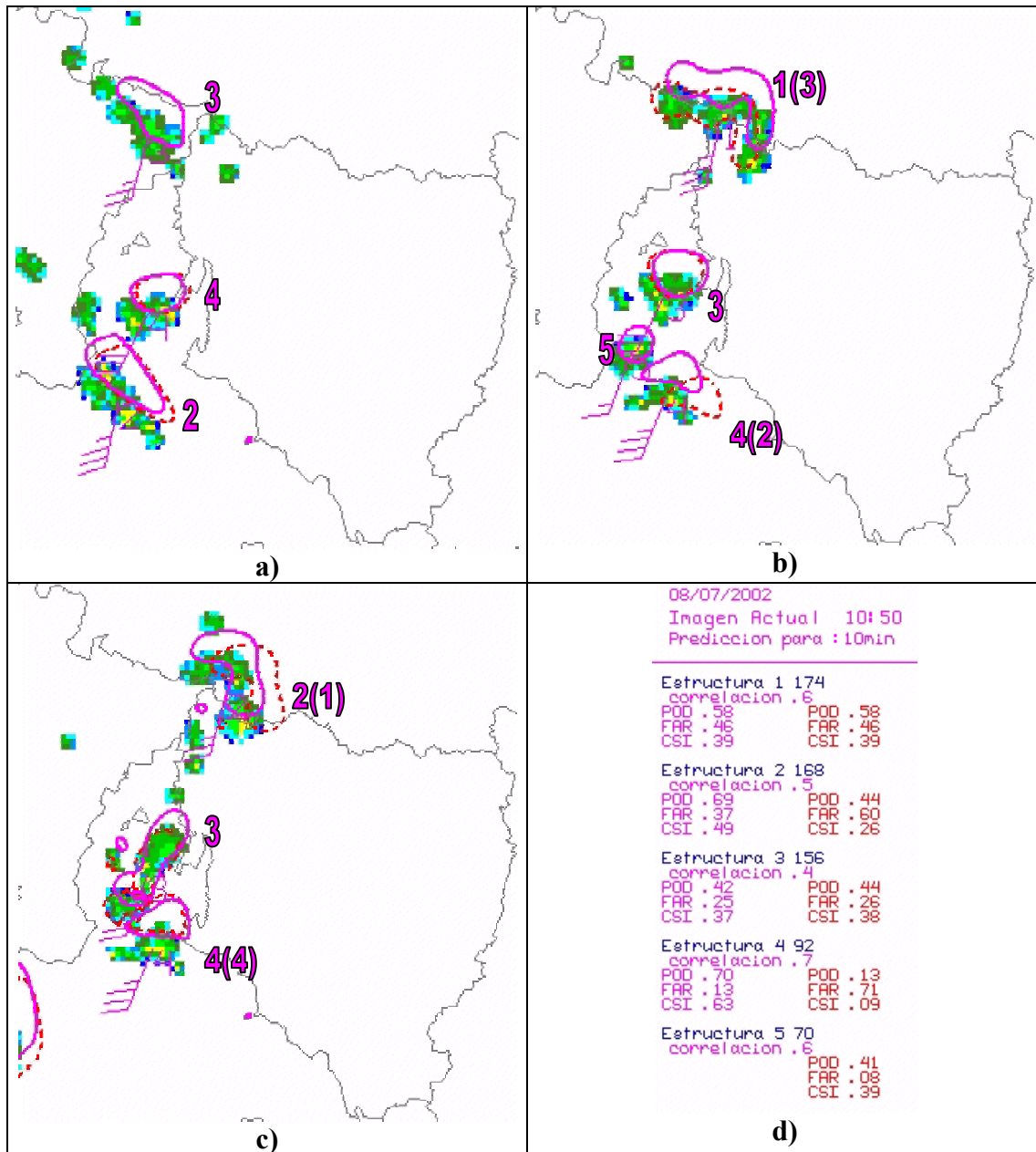


Fig. 5.6 Ídem que la figura anterior pero para el radar de Zaragoza del 8 Julio a las a)10:30, b) 10:40 y c)10:50. d) Tabla gráfica en pantalla del procedimiento de CC a las 10:50 UTC.

a) Estructura "2"				b) Estructura "4"			
	POD	FAR	CSI		POD	FAR	CSI
CC	0.69	0.37	0.49	CC	0.70	0.13	0.73
Cen	0.44	0.60	0.26	Cen	0.13	0.71	0.09

Tabla. 5.1 Verificaciones de las 10:40 UTC para las estructuras a) "2" y b) "4"

Las verificaciones de las extrapolaciones son muy diferentes, siendo, en este caso, notablemente mejores las del vector extrapolación calculado por CC para ambas estructuras. Para tener una idea más subjetiva de la calidad de los vectores obtenidos a las 10:40 UTC, observemos en la figura 5.7 la superposición de las extrapolaciones obtenidas a las 10:40 UTC válidas para las 10:50 UTC sobre la imagen observada a las 10:50 UTC.

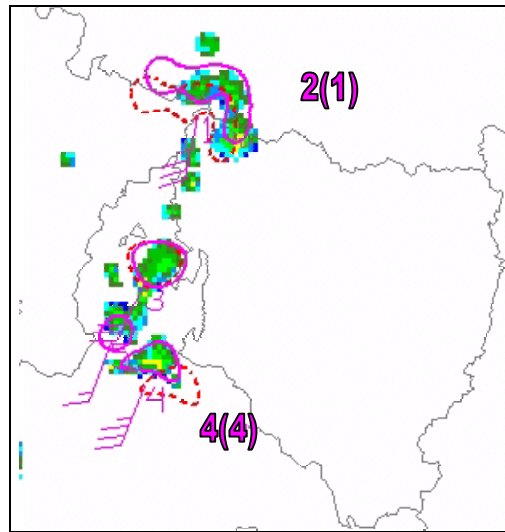


Fig. 5.7 Verificación gráfica del procedimiento. Superposición de las áreas gráficas de las 10:40 UTC extrapoladas a las 10:50 UTC con imagen de las 10:50 UTC. Detalle del radar de Zaragoza del 8 Julio de 2002.

Como se puede observar en la imagen, los contorneos de las áreas previstas y las “verificantes” casi coinciden para las CC para ambas estructuras, salvando las diferencias en formas acontecidas en los 10 minutos. Las extrapolaciones por centroides, sin embargo, no reprodujeron las futuras ubicaciones en las estructuras “2”(1) y “4”(4).

Situación del 27 de Mayo del 2002, Radar de Barcelona

Otro caso similar al que se acaba de comentar acontece el 27 Mayo en la costa de Girona de 12:20 a 12:30 UTC (figura 5.8). En ella se ve un caso típico de fusión.

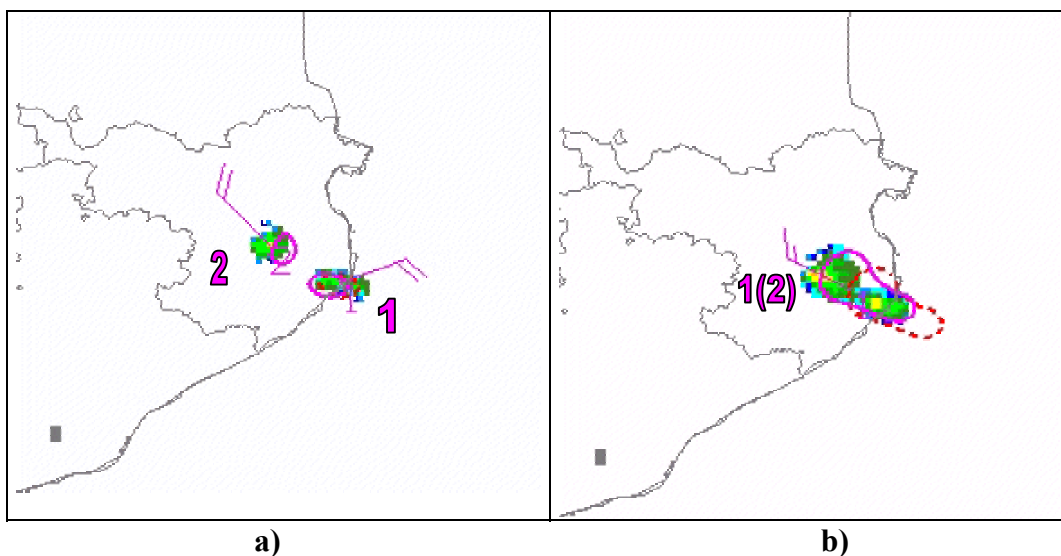


Fig. 5.8 Detalle análisis de estructuras del radar de Barcelona del 27 Mayo de 2002 para las a)12:20 y b)12:30 UTC.

Las estructuras “1” y “2” de las 12:20 UTC se unen para formar la “1”, diez minutos más tarde. De las dos estructuras existentes a las 12:20 UTC, la “2” es la “madre” de la que se forma como unión de ambas. Si se sigue la posición del centroide resulta lógico el vector resultante al emplear el método del centroide. Sin embargo, discrepa mucho del obtenido mediante el método de CC. Veamos en la siguiente imagen cuál de los dos métodos obtuvo mejores resultados de verificación.

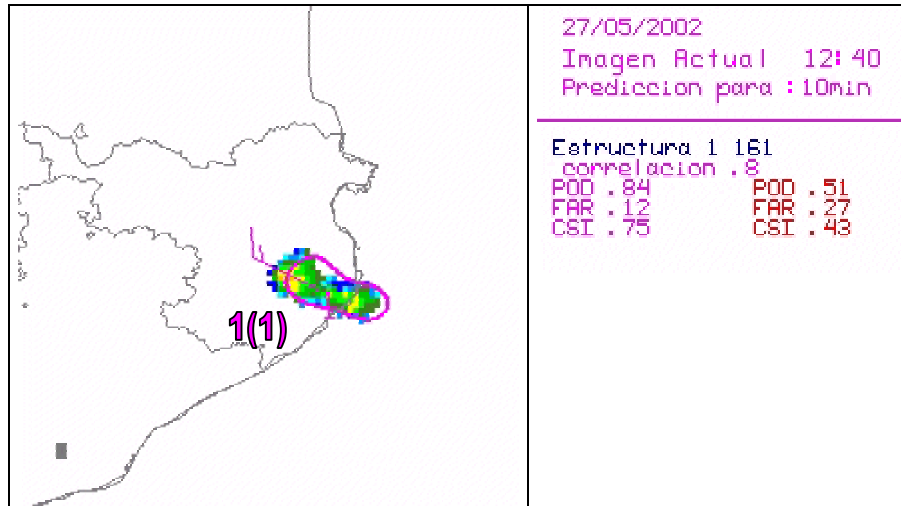


Fig. 5.9 Producto del procedimiento de CC de las 12:40 UTC.
Detalle del radar de Barcelona.

En este caso el vector extrapolación obtenido por CC ha obtenido coeficientes de verificación de mejor calidad que el correspondiente al método de centroide.

Por lo tanto, concluimos que en algunos casos en que las divisiones no son muy significativas y las formas de las estructuras convectivas no cambian muy llamativamente, el método de CC es capaz de extrapolar las estructuras convectivas de una forma muy aceptable, mejorando notablemente al método de extrapolación de los centroides.

5.2.3.- Fusiones y divisiones persistentes de estructuras convectivas. Situación del 4 de Junio del 2002, Radar de Zaragoza

La persistencia de fusiones y divisiones de estructuras convectivas relativamente grandes durante un largo intervalo de tiempo, es un caso en el que ninguno de los dos métodos de seguimiento y extrapolación funcionan todo lo bien que sería de desear. Cuando una estructura se une o se divide, la asignación es mucho más complicada que en aquellos casos en los que la estructura simplemente se desplaza, o incluso en los casos en que la estructura crece o decrece. La secuencia de imágenes del 4 de Junio de 17:50 a 18:20 UTC así lo demuestran, con la estructura “1” (figura 5.10), que proviene de una fusión.

La figura 5.10 muestra la situación a las 17:50 UTC. Como se puede observar, existen dos estructuras significativas, la “1” y la “2”. La “1” es la que va a sufrir las uniones y divisiones más significativas.

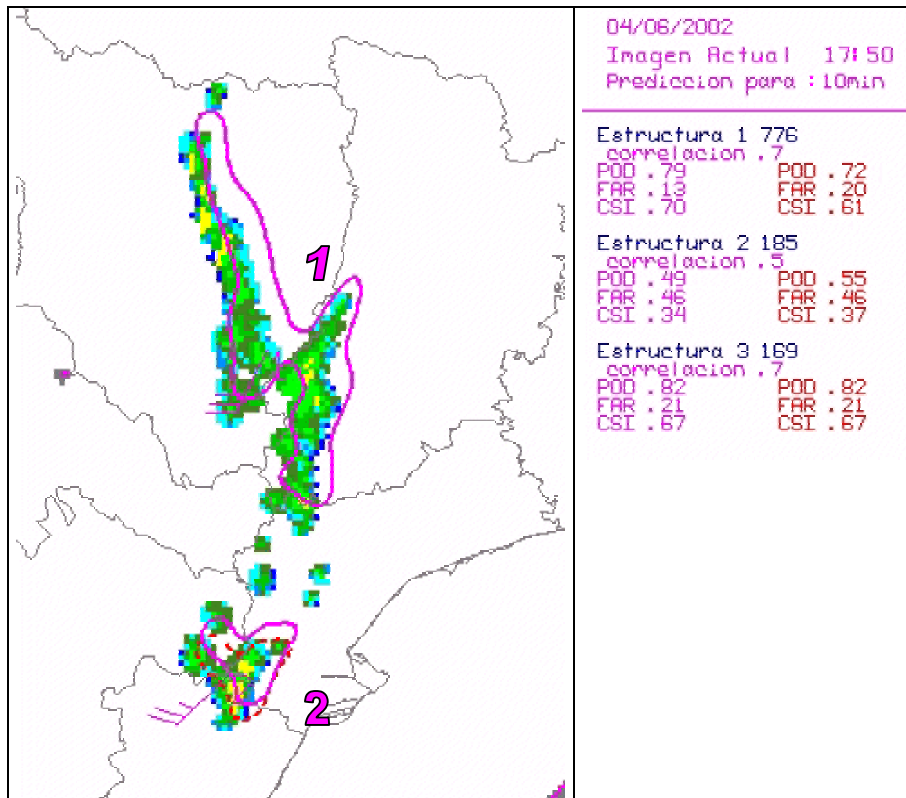


Fig. 5.10 Montaje del radar de Zaragoza del 4 Junio de 2002 a las 17:50 UTC.

En la figura 5.11, correspondiente a las 18:00 UTC, se aprecia que ha ocurrido una división de estructuras. Como ya se ha comentado, en estos casos las asignaciones son muy difíciles de realizar ya que durante ese proceso se evalúan los vectores que unen los centroides de las posibles “madres” con los de las estructuras a asignar.

Dicha evaluación se basa en que los vectores calculados tienen que ser consistentes con el viento medio de la situación, tanto en módulo como en dirección. Si el vector obtenido no es consistente, la asignación a la que da lugar se descarta. Eso es lo que le ha ocurrido a estas estructuras convectivas finales y sus centroides asociados: la posición del centroide de una estructura, antes y después de una fusión o división, es muy diferente, lo que da lugar a vectores extrapolación sin sentido meteorológico que no superan los test de consistencia.

En este caso, aparentemente, la estructura inicial “1” se divide en tres. De ellas, solo la “5”(1) tiene madre. A las otras dos no se les ha asignado “madre”, por lo que deberían ser extrapoladas por modelo. Sin embargo, solo la “3” ha sido extrapolada de esta forma (FIRST GUESS: SI, en amarillo). El hecho de que la estructura “2” no halla sido extrapolada de la misma forma que la “3” se explica a continuación.

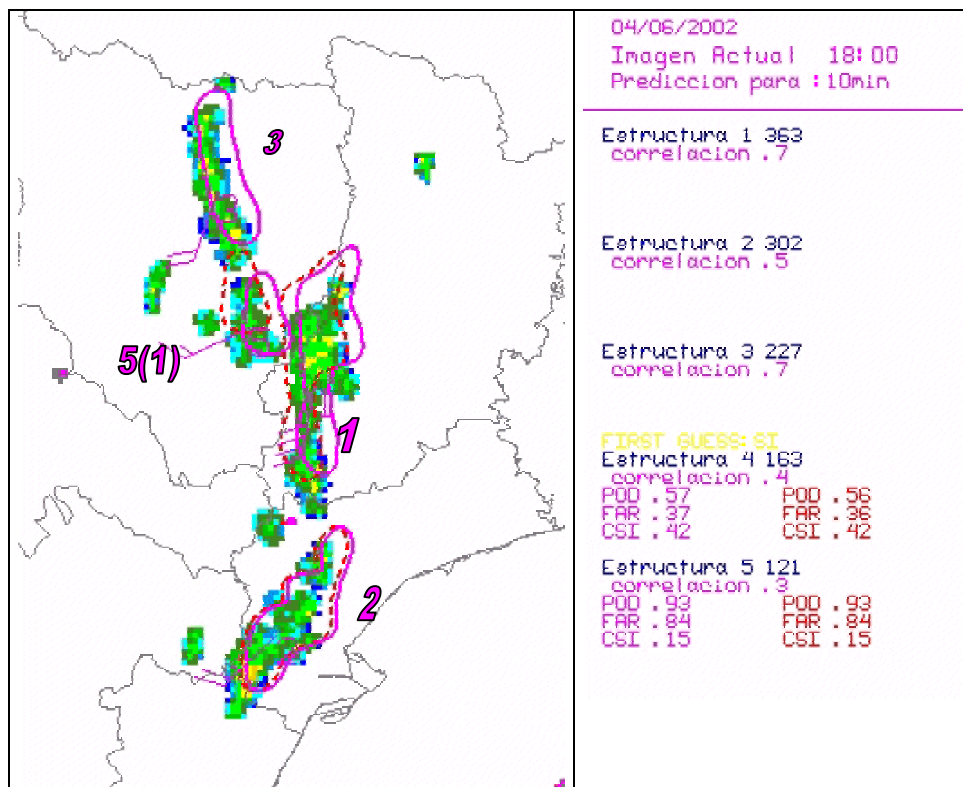


Fig. 5.11 Ídem para las 18:00 UTC.

Cuando dos estructuras están muy próximas entre sí y una de ellas no es asignada, la aplicación YRADAR considera que si existen otras próximas a ella, que han sido seguidas, entonces a la primera se le asigna el vector extrapolación medio de las segundas. El método de CC aprovecha esta característica para resolver en cierto modo el problema de las fusiones y las divisiones de estructuras. Cuando una estructura se divide en varias, solo a una de ellas, como máximo, se le asigna la “madre” de la que provienen. Normalmente, después de dividirse, las estructuras suelen quedarse muy próximas unas a las otras, por lo que se les considera “hermanas”. Cuando el procedimiento de CC encuentra una estructura sin “madre”, busca a una posible “hermana” (mismo vector de extrapolación por centroides). Si la encuentra averigua si ésta tiene “madre”, y si la tiene emplea un procedimiento que se comentó en el apartado 4 para estas estructuras.

Pese a que esta forma de extrapolar puede parecer un poco burda se observa que cuando hay casos de fusión y división se obtienen buenos resultados. La estructura “1” y la “2” que son las que han sido extrapoladas de esta manera han obtenido un coeficiente de correlación alto, 0.7 y 0.5. Esto significa que anteriormente existían una o más estructuras que al ser desplazadas coinciden relativamente bien con la actual, lo que puede ser interpretado por el predictor como una posible fusión. Como ya se verá en otros casos cuando una estructura es nueva realmente, su coeficiente de correlación suele ser muy bajo, siempre inferior a 0.4.

En la figura 5.12 encontramos otra fusión de estructuras. Aparentemente la “1” y la “5” anteriores (figura 5.12) se funden para formar la “2”, que es nueva porque no se

le asigna ninguna de las del momento anterior. Sin embargo, se encuentra que tiene una “hermana”¹ con “madre” por lo que se extrapola por el método de CC de la manera que ya se ha visto cuando las estructuras tienen “hermanas” o “madres” pequeñas.

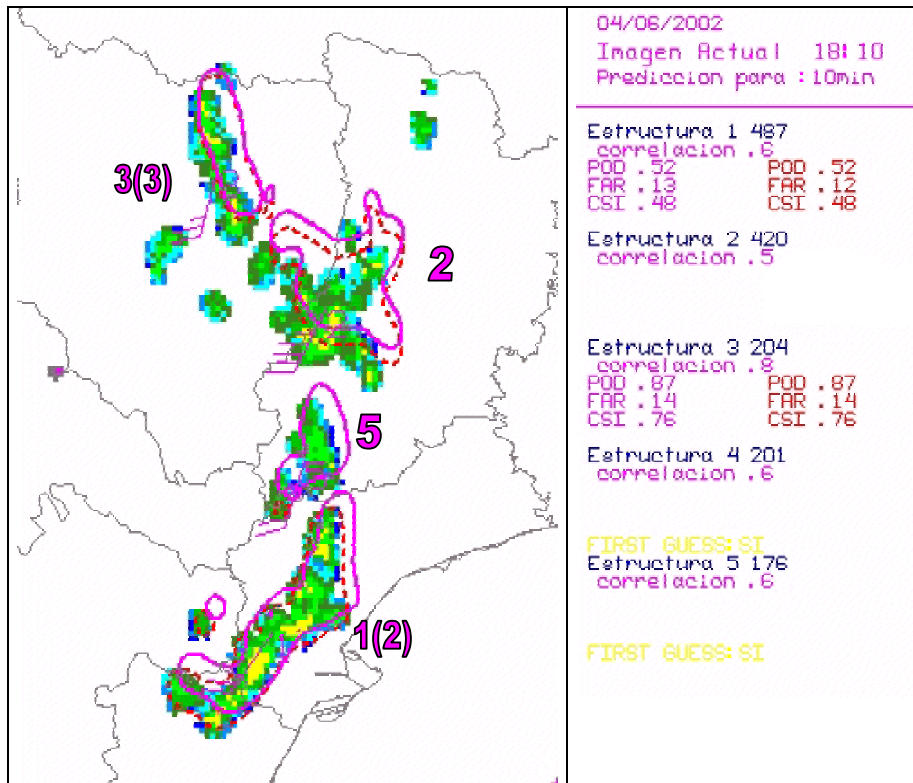


Fig. 5.12 Ídem para las 18:10 UTC.

¹ Obsérvese que en el momento anterior fue extrapolada por centroides ya que existe verificación por dicho método. El vector extrapolación se le asignó por proximidad, es decir, por ser “hermana” de otra que si tenía “madre”.

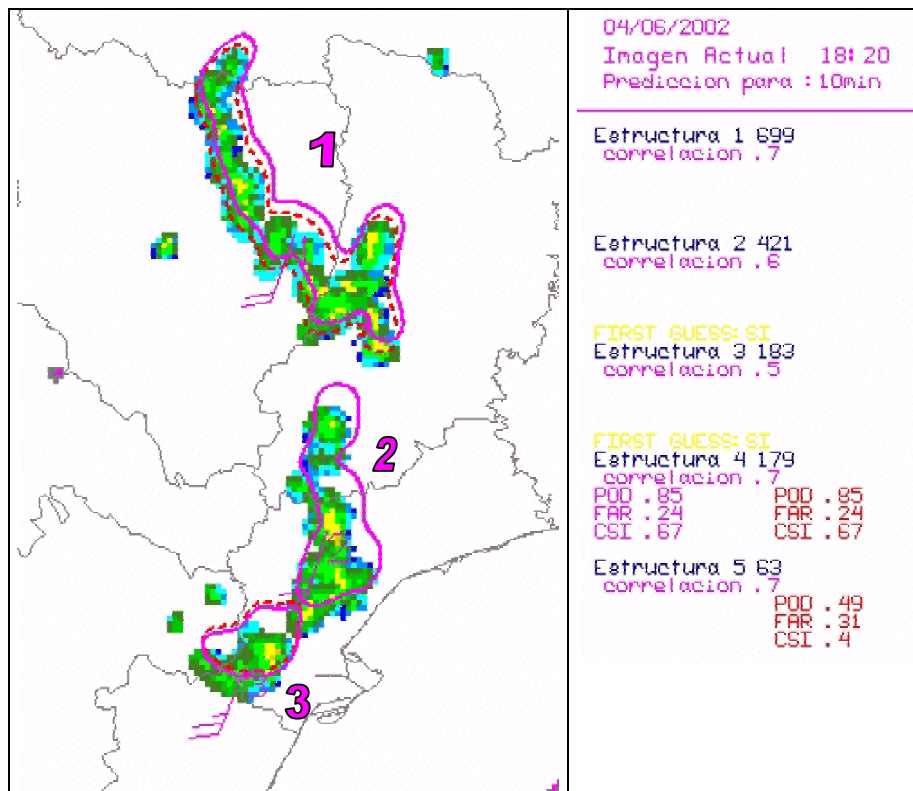


Fig. 5.13 Ídem para las 18:20 UTC.

Por último, en la figura 5.13 se observa que vuelve a haber una fusión de estructuras. Subjetivamente la “2” y la “3” se han unido para formar la “1”. Una vez más a esta estructura no le ha sido asignada “madre”, aunque si “hermana”. La estructura “1” de la figura 5.12 (momento anterior) parece haber sufrido una fusión por un lado (estructura “5” y “1” para dar lugar a la “2”) pero al mismo tiempo una división (la estructura “1” se ha dividido en la “2” y la “3”). Ninguna de estas estructuras han sido relacionadas con la del momento anterior, y es que la complejidad de los procesos no permite encontrar objetivamente las asignaciones. Ni siquiera subjetivamente podríamos asegurar cual es la relación exacta entre ellas, es por ello que tenemos que emplear frases como “parece ser” o “aparentemente”.

Para concluir, se ha visto un caso en el que las divisiones y fusiones están ocurriendo continuamente. Esto es muy normal cuando se desarrolla convección generalizada. En este caso que se ha analizado, los métodos no alcanzan a seguir correctamente la evolución de las estructuras y no manejan apropiadamente las separaciones y fusiones de estructuras. Para ello se ofrece información del coeficiente de CC y de los coeficientes de verificación, de modo que el predictor pueda interpretar lo que está viendo.

Un problema que nos encontramos en estas situaciones es que el intervalo de 10 minutos entre las imágenes radar analizadas es relativamente alto como para obtener un método de seguimiento y extrapolación fiable. En estos casos ni el propio ser humano, con cierta destreza y preparación, es capaz de asignar y evaluar subjetivamente los desplazamientos.

En otros casos menos complejos de divisiones y fusiones, el método de CC da resultados bastante aceptables con las estructuras convectivas de cierto tamaño.

5.2.4.- Ecos de tierra. Situación del 4 de Marzo del 2003, Radar de Valladolid

Cuando en una imagen radar aparece ecos de tierra, las estructuras de reflectividad recuerdan a focos convectivos cuyo movimiento es más o menos aleatorio. Normalmente los ecos de tierra pequeños se mueven erráticamente, y los grandes permanecen quietos o estáticos, aunque sufren divisiones y fusiones aparentes. Resulta aleccionador aplicar el método de CC y centroides a estos ecos y evaluar el resultado. A continuación, ilustraremos las diferencias entre los procedimientos de CC y de centroides, que aparecen ante una situación de ecos de tierra en la provincia de León entre las 11:20 y las 11:40 UTC.

En dicha región se daba una situación de estabilidad y nieblas. Debido a la orografía aparecen estructuras no meteorológicas cuyo movimiento no viene regido por la situación sinóptica, sino que, al contrario, parecen trasladarse de forma errática. Así mismo, dichas estructuras cambian su tamaño, morfología e intensidad de forma rápida.

En la figura 5.14, la estructura analizada a las 11:20 UTC tiene asociada extrapolaciones muy diferentes según la técnica empleada. Al tratar con ecos de tierra amplios, parece lógico que la estructura permanezca casi inmóvil. Esto corresponde con la extrapolación realizada por uno de los métodos, el de CC, en contraposición al otro, que traslada la estructura hacia el NNE siguiendo el movimiento aparente del centroide.

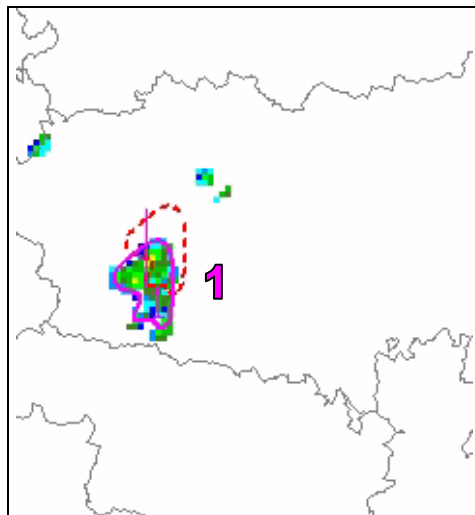
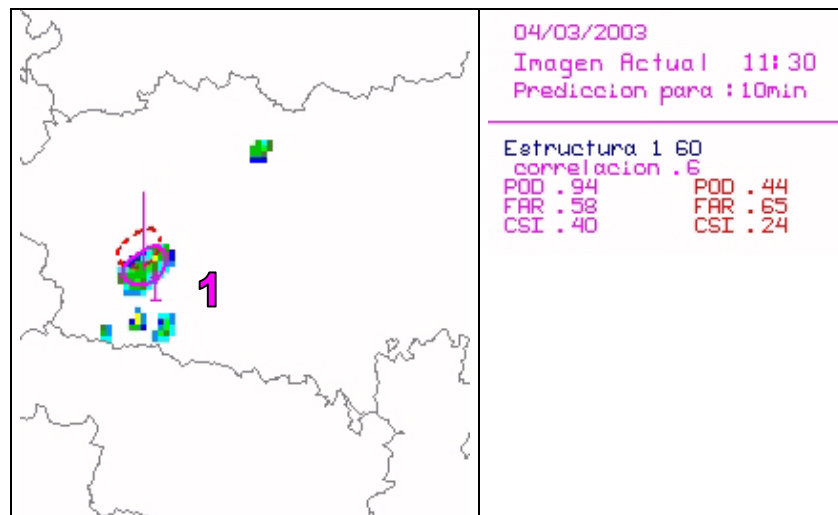
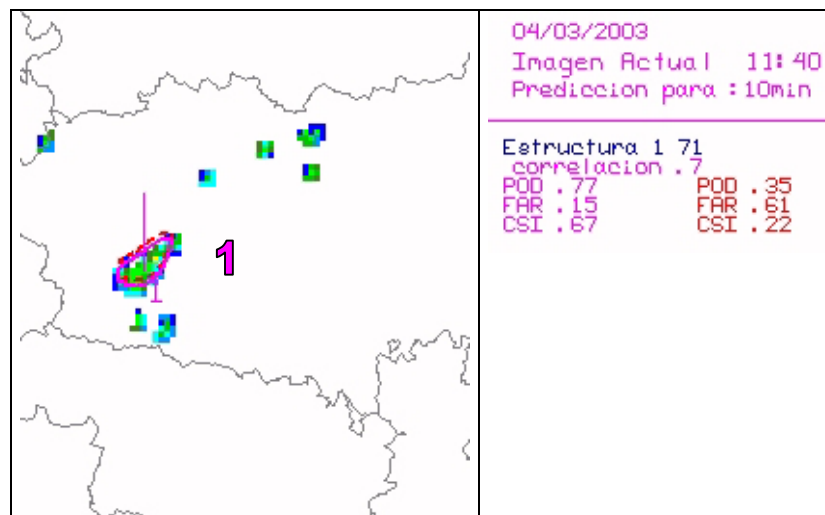


Fig. 5.14 Detalle de ecos de tierra analizados en el radar de Valladolid el 4 marzo de 2003 a las 11:20 UTC.



a)



b)

Fig. 5.15 Producto de CC del 4 Marzo de 2003
a las a) 11:30 UTC y b) 11:40 UTC. Detalle del radar de Zaragoza.

Los coeficientes de verificación corroboran lo que decíamos anteriormente. La extrapolación por CC, que mantuvo inmóvil a la estructura que se está estudiando, ha obtenido un POD de 0.94 frente a 0.44 correspondiente al método de centroides según se observa en la figura 5.15a. Sin embargo, la estructura ha disminuido notablemente de tamaño, lo que da lugar a que las falsas alarmas sean muy altas ya que, recordemos, el método no varía el área de la estructura al extrapolarla. Esto da lugar a un coeficiente CSI bajo en ambos casos. Aunque esta situación no es realmente adversa, hemos de concluir, una vez más, que el papel del predictor es muy importante a la hora de interpretar los resultados y los distintos coeficientes de verificación, puesto que un coeficiente CSI no muy alto puede corresponder a una predicción buena.

La figura 5.15a, correspondiente a las 11:30 UTC, muestra de nuevo una discrepancia entre los dos métodos comportándose el vector de extrapolación, en cada caso, de la misma manera que en el intervalo anterior. El método de centroides vuelve a trasladar la imagen para el momento siguiente mientras que las CC la mantiene quieta.

En la figura 5.15b comprobamos que la verificación de las CC vuelve a ser mejor que las correspondientes al centroide. En este caso la estructura de reflectividad no ha modificado sustancialmente su tamaño. Esto provoca que las falsas alarmas no sean ahora tan altas como en el intervalo anterior, dando lugar a un CSI más elevado.

Resumiendo, en situaciones con ecos de tierra las CC reflejan lo que ocurre de modo más fidedigno, en este caso, que el método de centroides, ya que evalúa el área de reflectividad completa y no solo el centroide que la representa y que se mueve aleatoriamente por la región de estudio produciendo movimientos erráticos. Los coeficientes de verificación así lo confirman, aunque debido a los movimientos aleatorios de los ecos de tierra y a sus constantes cambios de forma y tamaño, dichos coeficientes han de ser interpretados con atención. Aunque este caso resulta del todo anecdótico, nos muestra que para grandes estructuras, potencialmente convectivas, el método de CC tiene más habilidad en la extrapolación.

6.- CONCLUSIONES Y FUTUROS DESARROLLOS

Podemos tomar el método de centroides como técnica de extrapolación de estructuras convectivas no demasiado grandes como referencia. En los casos en que las estructuras posean formas “singulares” y/o posean un tamaño muy grande, esta aproximación deja de ser realista e introduce errores a la hora de extrapolar los objetos convectivos. Con el objetivo de ofrecer una extrapolación apropiada para este tipo de estructuras convectivas, se ha desarrollado el método de CC. De este modo, la estructura pasa a representarse por toda su área, permitiendo que sistemas convectivos amplios y singulares en su forma (alargados, curvados, etc..) sean extrapolados mejor, en general, que cuando vienen caracterizados por sus centroides. A lo largo de los casos que se han estudiado, se ha observado que el procedimiento da buenos resultados e incluso mejora al del centroide en algunos de ellos, tales como los ya comentados en que las estructuras son amplias y/o con formas no homogéneas.

Sin embargo ninguna de las dos técnicas lineales contempla la evolución de la intensidad o tamaño de ecos de reflectividad a lo largo de la extrapolación. Es por esto que ninguno de los dos métodos da buenos resultados cuando la convección se hace muy variable en el espacio y en el tiempo. Ejemplos de esta no linealidad son la unión, división, desarrollo y disipación de estructuras. Sin embargo, y debido a la representación de la estructura a través de su área, el método de CC es capaz de dar buenos resultados de la extrapolación de la posición en aquellos casos en que los fenómenos no lineales son “suaves” (no hay cambios bruscos de intensidad y tamaño en el intervalo entre imágenes).

Computacionalmente, el mayor problema del método de CC radica en que las subáreas de trabajo pueden incluir a más de una estructura, lo que provoca que en su desplazamiento las estructuras de estudio se encuentren con otras con las que no tienen relación alguna.

Con el objetivo de eliminar estas limitaciones, se está planteando abordar los problemas informáticos, que surgen al emplear este método. En la actualidad se emplea

un plano adicional en la terminal McIDAS para cálculos internos del procedimiento. Computacionalmente, se plantea prescindir del plano número 6 que actualmente es necesario para la navegación de coordenadas.

Desde el punto de vista meteorológico, se hace necesario emplear alguna técnica que sí contemple la creación, evolución y destrucción de las estructuras convectivas, desarrollando un modelo conceptual de ciclo de vida más o menos sencillo. Esta tarea no resulta, en modo alguno, inmediata.

Como objetivos más inmediatos están el de optimizar el procedimiento a nivel regional y establecer los diferentes umbrales de tamaño, reflectividad y número de estructuras analizadas. Así mismo, se está considerando aplicar el procedimiento a nivel nacional.

Actualmente, el procedimiento de CC esta en periodo de prueba en el STAP. Con el objetivo de ponerlo operativo, es necesario aplicar el método a más situaciones de interés para poder así evaluar los resultados y optimizar el procedimiento.

REFERENCIAS

- Andersson, T. and K. Ivarsson, 1991: A model for probability nowcasts of accumulated precipitation using radar. *J. Appl. Meteorol.*, **30**, 135-141.
- Austin, G.L. and A. Bellon, 1974: The use of digital weather radar records for short-term precipitation forecasting. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **100**, 658-664.
- Barclay, P. A. and K. E. Wilk, 1970: Severe thunderstorm radar echo motion and related weather events hazardous to aviation operations. *ESSA Technical Memorandum*, **ERLTM-NSSL 46**,63.
- Bellon, A. and G.L. Austin, 1978: The evaluation of two years of real-time operation of a short-term precipitation forecasting procedure (SHARP). *J. Appl. Meteorol.*, **17**, 1778-1787.
- Blackmer, R.H., R.O. Duda and E. Reboh, 1973: Application of pattern recognition techniques to digitized weather radar data. Stanford Research Institute, Menlo Park, CA, **3607**.
- Brémaud, P.J. and Y.B. Pointin, 1993: Forecasting heavy rain from cell motion using radar, *J. Hydrol.*, **142**, 373-389.
- Browning, K.A., C.G. Collier, P.R. Larke, P. Menmuir, G.A. Monk and R.G. Owens, 1982: On the forecasting of frontal rain using a weather radar network. *Mon. Weather Rev.*, **110**, 534-552.
- Chornoboy E.S, A.M. Matlin and J.P. Morgan, 1995: Automated Storm Tracking for Terminal Air traffic Control. *The Lincoln Lab. J.*, Volume 7, Issue 2.
- Collier, C G, 1980: A note concerning progress and plans for the establishment of operational networks of quantitative weather radars. *Meteorol. Mag.*, **109**, 75-77.
- Dixon, M. and G. Wiener, 1993: TITAN: Thunderstorm Identification, Tracking, Analysis, and Nowcasting-A Radar-based Methodology, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **10**, 785-797.
- Einfalt, T., T. Denoeux and G. Jacquet, 1991: The development of the SCOUT 11.0 rainfall-forecasting method. *Hydrol. Appl. of weather radar*, Ellis Horwood, England, 359-367.
- Germann, U. and I. Zawadzki, 2002: Scale-Dependence of the Predictability of Precipitation from Continental Radar Images. *International Conf. on QPF*. University of Reading, UK.
- Hallowell, R., M. Wolfson, B. Forman and M. Moore, 1999: The growth and decay storm tracker. *8th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorol.*, Dallas, TX, Amer. Meteor. Soc., 58-62.

- Handwerker J., 2001: Cell Tracking with TRACE3D – a new algorithm, *Atmos. Research*, accepted.
- Janish, J. M., 2000: A multiple scale precipitation tracking and forecast package. Preprints, *9th Conf. on Aviation, Range, and Aerospace Meteorol.*, Orlando, FL, Amer. Meteor. Soc., 399-402.
- Johnson, J.T., P.L. Mackeen, A. Witt, E.D. Mitchell, G.J. Stumpf, M.D. Eilts and K.W. Thomas, 1998: The storm cell identification and tracking algorithm: An enhanced WSR-88D algorithm. *Wea. Forecasting*, **13**, 263-276.
- Lakshmanan, V., 2000: Speeding up a large scale filter. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **17**, 468-473.
- Lakshmanan, V., R. Rabin and V. DeBrunner, 2000: Identifying and tracking storms in satellite images. *2th Artificial Intelligence Conf.*, Long Beach, CA, Amer. Meteor. Soc., 90-95.
- Lakshmanan, V., R. Rabin and V. DeBrunner: Hierarchical identification and tracking of storms in weather radar images, *J. Appl. Meteorol.*, **0**, 0, 0, Jan. submitted. (http://www.cimms.ou.edu/~lakshman/Papers/diss_geosc.pdf)
- Lakshmanan, V., R. Rabin and V. DeBrunner, 2002: Hierarchical texture segmentation of weather radar and satellite images. *European Conference on Severe Storms*, Prague, **76**, 26-30. (http://www.cimms.ou.edu/~lakshman/Papers/diss_geosc.pdf)
- Li, L., W. Schmid and J. Joss, 1995: Nowcasting of motion and growth of precipitation with radar over a complex orography. *J. Appl. Meteorol.*, **34**, 1286-1300.
- Martín, F., F. Elizaga, O. Carretero e I. San Ambrosio, 2001: Diagnóstico y Predicción de la Convección Profunda. *Nota Técnica del STAP*, **35**.
- Martín, F., O. Carretero e I. San Ambrosio, 2002: Análisis de estructuras y células convectivas mediante datos de radar regional: Aplicación YRADAR. Publicación interna del INM.
- Martín, F., 2002: Consideraciones generales sobre la aplicación de análisis de estructuras convectivas 2D a partir de datos del mosaico radar: YRADARNA. Publicación interna del INM.
- Moriyama, T. and H. Muneo, 2000: Quantitative precipitation forecasting using neural networks. (<http://www.unesco.org/phi/libros/radar/art24.html>).
- Pierce, C.E., C.G. Collier, P.J. Hardaker and C.M. Haggett, 2000: GANDOLF: a system for generating automated nowcasts of convective precipitation, *Met. Apps.*, **7**, 341-360.

Porter C.W, E. M. Kemp, J.M. Janish and D. E. Jahn, 2001: Evaluation of ARPS and GDST 1-6 Hour Forecasts. Preprints. *30th International Conf. on Radar Meteorology*, AMS, Munich, Germany, Amer. Meteor. Soc., 243-244.

Rinehart, R.E. and E.T Garvey, 1978: Three dimensional storm motion detection by conventional weather radar. *Nature*, **273**, 287-289.

Rosenfeld D., E. Amitai, and D. B. Wolff, 1995: Improved Accuracy of Radar WPMM Estimated Rainfall Upon Application of Objective Classification Criteria. *J. Appl. Meteorol*, **34**, 212-223.

Saxen, T. R., Mueller, C. K., Jameson, T. C. and Hatfield, E., 1999. Determining key parameters for forecasting thunderstorms at white sand missile range. Preprints. *29th Conf. on Radar Meteorology*, Montreal, Canada, Amer. Meteor. Soc., 9-12.

Schmid, W., 2000: Nowcasting winter precipitation with radar. Proc. *10th International Road Weather Conf.*, Davos, Switzerland, 22-24.

Seed, A.W. and T. Keenan, 2001: A dynamic and spatial scaling approach to advection forecasting. Preprints. *30th International Conf. on Radar Meteorology*, Munich, Germany, 492.

Seo, D.J. and J.A. Smith, 1992: Radar-based short-term rainfall prediction, *J. Hydrol.*, **131**, 341-367.

Song B.C, K.W. Lim and J. B. Ra, 1996: A Hierarchical Motion Estimation Algorithm Using Correlation of Motion Fields. *JW-NVMT*, **1**, 41-44.

Tsonis, A. and G.L. Austin, 1981: Evaluation of extrapolation techniques for the short-term prediction of rain amounts. *Atmosphere-Ocean*, Toronto, Canada, **19**, 54-65.

Wilson, N., A.Crook, C.K. Mueller, J .Sun and M. Dixon, 1998: Nowcasting Thunderstorms: A Status Report. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 2079–2100.

Wolf, D.E., D.J. Hall and R.M. Endlich, 1977: Experiment in automatic cloud tracking using SMS-GOES data. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 1219-1230.

Wolfson, M.M, B.E. Forman, R.G. Hallowell and M.P. Moore, 1999: The Growth and Decay Storm Tracker. *70th AMS Conf.* Dallas. TX.