

## **Análisis de la estructura de las tormentas del Valle Medio del Ebro**

A. CASTRO, J. L. SÁNCHEZ, R. FRAILE y J. L. MADRID

En este trabajo presentamos los resultados encontrados al analizar los cortes de PPI y RHI efectuados con un radar meteorológico, con el objetivo de conocer la estructura de las tormentas del Valle Medio del Ebro. Los resultados muestran la existencia de diferentes tipos de tormentas con características definidas de diámetros, superficie y volumen, así como la forma en que las células hijas se introducen en la masa tormentosa. Otro aspecto que se abordará será el de las trayectorias seguidas por las tormentas y su relación con los vientos troposféricos.

A. CASTRO, J. L. SÁNCHEZ, R. FRAILE y J. L. MADRID. Laboratorio de Física de la Atmósfera. Universidad de León.

**Palabras clave:** Tormenta. Nuevos desarrollos. Trayectorias. Vientos troposféricos.

### **INTRODUCCION**

Las tormentas son perturbaciones atmosféricas de carácter local que dan lugar a intensas descargas eléctricas y que normalmente van acompañadas por precipitaciones y vientos intensos (OMM, 1966). Asimismo, se manifiestan por una masa nubosa que se asienta sobre un bloque central llamado célula y que es una entidad dinámica caracterizada por una región donde se dan fuertes corrientes ascensionales cuyos radios oscilan, habitualmente, entre los 5 y los 40 km. (BROWNING, 1977).

Sin embargo, la estructura de estas células convectivas puede ser bastante variable y por ello se han intentado algunas clasificaciones que atienden a criterios muy generales, basados en las informaciones aportadas por radares meteorológicos.

Por otra parte, el conocimiento de la estructura que tienen y de sus características resulta de mayor interés para conocer la génesis y evolución de las tormentas. Además hay que tener en cuenta que, al ser de carácter local, presentan características bastante diferenciadas de unos lugares a otros.

El Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en colaboración con la Comunidad Autónoma de Aragón, instaló en 1984 un potente radar de la banda C y 250 kw de potencia en las proximidades de la ciudad de Zaragoza, con el objetivo, entre otros, de estudiar el comportamiento de las tormentas y de las masas nubosas en general, en el Valle Medio del Ebro.

Gracias a las series de cortes horizontales (PPI) y verticales (RHI) de las masas nubosas, efectuadas con dicho radar, sobre un área circular de un radio aproximado de 140 km., hemos podido analizar algunas características de las tormentas del Valle Medio y comprobar a lo largo de los veranos de 1984, 1985, 1986 y 1987, en qué forma guardan similitudes con las que se mencionan en la bibliografía y que corresponden a diversas partes del mundo.

Puesto que al comenzar el estudio nos encontramos con una muestra de más 1.300 masas nubosas analizadas, emprendimos los primeros pasos haciendo distinción entre las que tenían carácter tormentoso y las que no llegaron a alcanzarlo. Para ello seguimos el criterio propuesto por FOOTE and MOHR

(1979), de considerar una célula como de tormenta si el contorno de factor de reflectividad de 45 dBZ, se mantiene durante, al menos, cinco minutos.

De acuerdo con lo anterior se determinaron un total de 645 tormentas, siendo, por una parte, una muestra suficientemente elevada para ser considerada significativa desde un punto de vista estadístico y, por otra, con características muy diferentes, en algunas variables, de unos elementos a otros de la muestra. Por esta razón decidimos analizar la estructura de las tormentas atendiendo a una clasificación previa de tipos diferenciados.

En este trabajo nos vamos a referir a las características de la estructura general de las tormentas del Valle Medio del Ebro, presentando los resultados referentes a las dimensiones de las áreas de precipitación de las masas nubosas, la superficie y el volumen que ocupan. El análisis lo complementaremos con un estudio sobre la incorporación de las zonas de nuevos desarrollos a la tormenta «madre» y, finalmente, haremos una discusión sobre la influencia de los vientos de altura.

## TIPOS DE TORMENTAS ATENDIENDO A CRITERIOS RADAR

Aunque podemos encontrar en las tormentas estructuras más o menos complejas, en general tienen un comportamiento en el que, siguiendo a BYERS *et al.* (1949), podemos identificar tres estados en su evolución: el primero se identifica con el de nacimiento y en él únicamente podemos encontrar una corriente ascensional; el segundo corresponde al estado de madurez, en el que conviven la corriente ascensional y descendional, y en el tercer y último estado, donde se produce la disipación, solamente tiene cabida la corriente de descenso.

Al analizar la estructura general de una tormenta con ayuda de un radar meteorológico, se encuentra que consta de unidades convectivas que evolucionan en periodos de tiempo relativamente cortos, puesto que no suelen sobrepasar los 60 minutos de vida media (ROGERS, 1976). Dentro de la masa nubosa, en el interior de las células, se

encuentran gotas ya precipitables cuyos radios son del orden de unas 100 micras de radio.

Mediante la observación de las imágenes radar y el análisis de las precipitaciones, BROWNING (1977) propuso una clasificación basada en la estructura de las células en las que se soportan las masas nubosas. Habitualmente se considera que las células son, en primera aproximación, una estructura cerrada que se mueve según la dirección marcada por los vientos de los niveles medios.

Sin embargo, bajo ciertas condiciones extremadamente favorables a los procesos de convectividad, se pueden formar grandes tormentas asentadas sobre lo que se llama habitualmente supercélulas. Existe una amplia bibliografía referente a estas últimas (KRAUS *et al.*, 1984; JAMESON *et al.*, 1980; entre otros). En general podemos reconocer a las supercélulas porque en las imágenes del radar:

1. Los ecos tienen una forma elíptica cuyo eje mayor suele tener de 20 a 30 km. Sin embargo, la masa nubosa asociada a cada una tiene proporciones mucho mayores.
2. La formación de los nuevos desarrollos suele producirse por la parte derecha y presenta fuertes crecimientos ya que las velocidades ascensionales son superiores a los 25 m. s<sup>-1</sup>.
3. La reflectividad es muy elevada, alcanzándose 45 dBZ al menos durante 50 minutos.

La determinación de la estructura celular o supercelular de una tormenta es importante ya que, en el primer caso, se considera que es una estructura cerrada de tal forma que, si se formó en un lugar determinado y, por tanto, bajo ciertas condiciones meteorológicas o geomorfológicas, evolucionará sin recoger mayor aporte de aire del ambiente exterior a ella. En el caso de que se trate de una supercélula no se puede considerar la estructura, ni en primera aproximación, como una entidad cerrada, ya que interfieren las corrientes ascensional y de descenso, de tal forma que ésta vuelve a alimentar a la primera y además recoge aire del medio ambiente en el que se desarrolla (BROWNING, 1977).

De cara a la modificación atmosférica y a la vista de lo señalado anteriormente, la actuación con siembra de núcleos de congelación es más simple, operativamente hablando, en el primer caso que en el segundo, ya que las dimensiones de las tormentas son inferiores y el tamaño del granizo es también menor (FARLEY, 1986).

Sin embargo, al profundizar en las estructuras tormentosas descritas más arriba, se puede encontrar que en el interior de una masa nubosa permanecen alojadas, muchas veces, varias células tormentosas. La aparición de éstas puede ser progresiva o bien simultánea en el tiempo, surgiendo a expensas de la célula madre, generalmente, en su flanco derecho (MARWITZ, 1972b), o bien en zonas convectivas alejadas de ella. Estas estructuras se conocen como multicélulas y, de acuerdo con las características de sus desarrollos internos, tendremos que distinguir entre la menos intensas, denominadas simplemente *multicélulas* y las supercélulas con una estructura interna multicelular.

**TIPOS DE TORMENTAS EN EL VALLE MEDIO DEL EBRO**

Al aplicar a las tormentas del Valle Medio del Ebro los criterios de clasificación señalados, hemos encontrado los resultados que mostramos en el cuadro 1. Como vemos, de las 645 masas nubosas con carácter tormentoso que han podido ser clasificadas durante los años 1984 a 1987, hemos encontrado que una gran mayoría de ellas obedecía a estructuras que pueden ser consideradas, en primera aproximación, como sistemas cerrados ya que las de los tipos I y II representan un porcentaje de un 93,02%.

Cuadro 1.—Tipos de tormentas en el Valle Medio del Ebro.

Tipo de tormenta	Simb. grupo	Nº casos	%
Unicelular . . . . .	I	350	54,26
Multicelular . . . . .	II	250	38,76
Supercel. (unicelular) . .	III	26	4,03
Supercel. (multicel.) . . .	IV	19	2,95
Global . . . . .		645	100,0

En lo referente a las supercélulas queremos destacar, en primer lugar, su bajo porcentaje frente al total y, en segundo, al hacer una separación entre las que presentan carácter multicelular o unicelular, hemos encontrado que existe una mayor proporción del Grupo III que del IV. El resultado tiene su interés aunque para llegar a conclusiones más válidas, estadísticamente hablando, necesitaríamos un mayor número de supercélulas y un análisis particularizado de cada una de ellas.

**ESTRUCTURA GENERAL: TAMAÑO DE LAS TORMENTAS**

**Metodología**

Una vez conocida la distribución de los tipos de tormentas en el Valle Medio del Ebro, el siguiente paso que nos planteamos fue el de presentar algunos resultados directamente relacionados con la estructura general de la tormenta. En este apartado haremos referencia a aquellos relativos al tamaño que tienen. Y para ello vamos a analizar el diámetro de la parte de la masa nubosa que da lugar a precipitación, la superficie del plano longitudinal y su volumen activo.

FOOTE and MOHR (1979) y KNIGHT *et al.* (1982) consideran el tamaño de una célula como el área del contorno de los 45 dDZ a niveles medios (5-8 km.). Este área cubre según dichos autores la zona de crecimiento del granizo.

Sin embargo, en nuestro caso tenemos tormentas que pueden ser clasificadas como de carácter multicelular, por lo que nos hemos encontrado frecuentemente con zonas de factores de reflectividad elevados, que geoméricamente daban ecos en forma de «islas», pero englobados a su vez en áreas con factores superiores a 10 dBZ. Bajo estas condiciones es preferible utilizar otro criterio que el propuesto por FOOTE and MOHR o KNIGHT. Por ello hemos preferido hallar la extensión del contorno de los 10 dBZ, es decir, de toda la parte activa de la masa nubosa, sin discriminar aquellas zonas de las cuales los procesos pueden ser mucho más intensos (DONALDSON, 1961; SAUVA-GEOT, 1982).

## Resultados

En el cuadro 2 se encuentran recogidos para cada tipo de tormenta y para el total de la muestra, la media y desviación típica del diámetro máximo observado en los cortes horizontales (PPI) de cada tormenta analizada, el área correspondiente a ese PPI suponiendo que los cortes tengan forma circular y, por último, el volumen de la masa nubosa, considerada ésta como un cilindro, cuya altura es la altura del techo del RHI efectuado más próximo en el tiempo. En realidad los contornos de las masas nubosas dibujan formas variables en el tiempo, pero habitualmente mantienen contornos entre circulares y elípticos. Estas estructuras también han sido observadas en las tormentas de Colorado, KNIGHT *et al.* (1982).

## Discusión de resultados

A la vista de este cuadro, una tormenta promedio en el Valle Medio del Ebro alcanza un diámetro de 25 km., con un área de precipitación de 787 km.<sup>2</sup> y un volumen de 9.675 km.<sup>3</sup> Sin embargo, esta tormenta media admite variaciones importantes, ya que como vemos en el cuadro 2, los valores de la desviación típica, tanto para el volumen como para la superficie cubierta, fueron casi el doble de los valores medios en algunos de los tipos de tormentas. Ello da cuenta de las enormes diferencias que tienen las tormentas en cuanto a su tamaño. Los amplios intervalos de variación también son observados por BROWNING *et al.* (1977) y KNIGHT *et al.* (1982), entre otros autores, para las supercélulas.

Como podemos apreciar en el mismo cuadro anterior, existen diferencias en algunas de estas variables según se trata de un tipo u otro de tormentas. Las de carácter unicelular, como las de los grupos I y III, son las menores tanto en diámetro como en extensión o volumen. Esta característica parece coherente con el hecho de que en las tormentas multicelulares la existencia de dos o más células en su interior, determinará que su tamaño sea superior. Al comparar las tormentas supercelulares de carácter unicelular (grupo III) y multicelular (grupo IV), encontramos también diferencias de tamaño que obedecen a las mismas razones. Comprobaciones posteriores pusieron de manifiesto que las supercélulas de carácter unicelular, no son sólo las tormentas que adquirirán mayores desarrollos verticales, sino también las más intensas, aspectos que determinarán su mayor expansión y crecimiento. Resultados similares los encontró KNIGHT *et al.* (1982), aunque en contornos de 45 dBZ. CARTE *et al.* (1978), por su parte observa en South African Plateau, tormentas entre los 200 y 600 km. de diámetro en más de 300 días, así como sistemas multicelulares que superan extensiones de 50×500 km.<sup>2</sup>. En el Valle del Ebro, en cambio el máximo diámetro observado fue de unos 130 km. en una tormenta que se formó en la Cordillera Ibérica. Apenas un 3% de las supercélulas (grupos III y IV), superaron los 100 km. de diámetro.

De cualquier forma, existen grandes desviaciones estándares en todas las variables, lo que nos indica que una tormenta encuadrada en un grupo puede llegar a tener un tamaño muy variable, y que el tamaño

Cuadro 2.—Estudio de las variables diámetro, extensión y volumen de los diferentes tipos de tormentas

Tipo de tormenta	Diámetro (km.)		Extensión (km. <sup>2</sup> )		Volumen (km. <sup>3</sup> )	
	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$	$\bar{x}$	$\sigma$
Unicelular .....	16	9	269	486	2.837	5.211
Multicelular .....	36	23	1.420	2.011	17.188	25.862
Supercel. (unicelular) .....	31	19	1.021	1.545	15.390	24.402
Supercel. (multicelular) .....	42	20	1.687	1.718	22.500	26.943
Global .....	25	19	787	1.481	9.675	19.452

alcanzado por una tormenta no tiene un papel totalmente determinante de la intensidad que pueda desarrollar en su interior.

FONT (1983), en su estudio sobre la Climatología de España y Portugal, determinó que las tormentas individuales cubren extensiones que oscilan entre los 50 y los 500 km.<sup>2</sup>. En el estudio realizado para las tormentas del Valle Medio del Ebro, los resultados para las tormentas de tipo unicelular, indicaron que el 80% de las mismas cubrieron áreas comprendidas entre los 50 y los 531 km.<sup>2</sup>, luego las tormentas de este tipo parecen tener áreas similares a las promediadas en el resto de España.

**CARACTERISTICAS INTERNAS DE LAS TORMENTAS**

**Metodología**

Otra variable que resulta del mayor interés para conocer la estructura de las tormentas, es la que tiene en cuenta la forma en que se asienta la masa nubosa sobre la célula tormentosa. Para ello, y partiendo siempre de la muestra 645 tormentas, hemos estudiado la situación de las partes más activas de los ecos respecto a la dirección de desplazamiento de las tormentas.

**Resultados**

Los resultados, recogidos en el cuadro 3, revelan que la parte más activa de la célula sobre la que se asienta la estructura de la tormenta, se presentó generalmente en su parte central (387 tormentas), mientras que

en otras tormentas se hallaba claramente desplazada hacia la derecha (173 tormentas) o hacia la izquierda (85 casos).

**Discusión de resultados**

Haciendo un análisis minucioso del cuadro 3, encontramos que:

— Las tormentas de tipo unicelular (I), presentan la zona de máxima intensidad en su parte central con un 73% de los casos.

— Las multicelulares (II) tienen sus desarrollos principalmente en la parte central de la estructura global de la masa nubosa (49,2%), pero los desarrollos, surgiendo y desarrollándose en el flanco derecho respecto a su dirección de avance, experimentan un aumento importante respecto a las unicelulares, 36,4% frente al 16% de las anteriores.

— Las supercélulas, tanto si fueron unicelulares (III) como multicelulares (IV) tienen sus desarrollos localizados principalmente en su lado derecho.

Los desarrollos por la izquierda no suelen ser habituales, diversos autores afirman de forma bastante generalizada que los nuevos desarrollos se forman en el flanco derecho (SAUVAGEOT, 1982) y al sureste de la célula más madura (MUSIL *et al.*, 1976). Sin embargo, BROWNING (1977), considera que a menudo se forman en el lado izquierdo. Por su parte, CARTE *et al.* (1978) afirma que los nuevos desarrollos surgen de forma aleatoria, con una probabilidad del casi 40% para desarrollos surgiendo bien en el flanco derecho bien en el izquierdo.

En nuestra zona de estudio, 85 tormentas (13,2%) de las 645 detectadas presentaron esta peculiaridad de localizarse en la parte izquierda. Se localizaron tanto en las

Cuadro 3.—Estudio de la variable zonas de desarrollo de las células para los diferentes tipo de tormentas

Tipo de tormenta	Simb. grupo	Nº casos	Derecha	Centro	Izquierda
Unicelular	I	350	56	256	38
Multicelular	II	259	91	123	36
Supercelular (unicelular)	III	26	14	5	7
Supercelular (multicelular)	IV	19	12	3	4
Global		645	173	387	85

zonas de la Cordillera Ibérica y los Pirineos como en la zona del Valle, pero si consideramos proporcionalmente al número de tormentas que se desarrollaron en cada zona, en la zona del Valle, sobre todo en su zona más alta, dentro de las provincias de Navarra y Logroño la posibilidad de que las tormentas formadas tengan sus partes más activas desarrollándose por la izquierda es mayor (un 22,2% de las detectadas, frente al 9,9 de las localizadas en la Ibérica). Esta peculiaridad que se da en estas dos provincias, resulta de mayor interés y necesitaría de estudios posteriores puesto que actualmente en esta zona se están realizando actuaciones de lucha antigranizo y, por tanto, la localización de las zonas donde surgen los nuevos desarrollos resulta de vital importancia.

Para intentar dar una posible explicación a la formación de nuevos desarrollos en una zona o en otra, es decir, a la génesis de la convección, y a la forma en que interviene en la estructura de la tormenta, nuestro paso siguiente fue analizar el régimen de vientos en altura.

SULAKVELIDZE (1977), recoge en su libro «Forecasting of hail, thunderstorms and showers» las opiniones de diversos investigadores acerca del hecho de la influencia de la cizalladura del viento en el desarrollo de la convección. Mientras BELTISHEV, VINNICHENKO, PASTUSHKOV, WEICKMANN, entre otros, consideran que la cizalladura favorece la formación de grandes masas turbulentas que pueden iniciar la convección, otros como TURBNIKOV dicen que intensas cizalladuras inhiben la convección. WEICKMANN, además afirma que en días con cizalladura de vientos las tormentas formadas darán lugar a precipitaciones en forma de granizo. GRANDIA *et al.* (1975), también observaron tormentas unicelulares acompañadas de granizo en días con fuerte cizalladura en los niveles altos. En el Valle Medio del Ebro, hemos observado que, en los días en los cuales se registró actividad tormentosa, la cizalladura observada en los diferentes niveles era más bien alta, aunque en ciertas capas algunas veces apenas hubo cambios en la intensidad del viento, pero sí en dirección. También se formaron masas nubosas tormentosas en días de débil

cizalladura, hecho también contrastado por MILLER *et al.* (1983).

Por su parte BROWNING (1977), considera que en presencia de fuertes cizalladuras los nuevos desarrollos surgen en el flanco derecho, mientras que con vientos débilmente cizallados, los nuevos desarrollos surgen en cualquier zona de la masa nubosa. En la observación de lo que sucedió durante los días de actividad tormentosa, con respecto a la localización de los desarrollos en el interior de las masas nubosas en el Valle Medio del Ebro, vimos que:

— En los días con predominio de desarrollo situados en el flanco derecho, la cizalladura fue muy alta y de forma generalizada; los cambios de dirección del viento en altura fueron asimismo muy altos.

— En días con predominio de tormentas con los desarrollos en su parte central (tormentas generalmente unicelulares), se observaron en la misma proporción cizalladuras altas o bajas, acompañadas también de cambios de dirección del viento, la mayoría poco considerables.

— No hubo días en los cuales predominaran tormentas con sus desarrollos en el flanco izquierdo, y ningún día se observaron tormentas, unas a la derecha y otras a la izquierda. Sin embargo, cuando se dieron asociadas a tormentas de desarrollos centrales, las cizalladuras fueron bajas, y los vientos tuvieron un comportamiento aleatorio, unos días fueron cambiantes en dirección y otros no. Esto mismo sucedió en aquellos días en los cuales las tormentas tuvieron sus desarrollos por su parte derecha o por la zona central.

— Hubo un número importante de días en los cuales unas tormentas se desarrollaron por la derecha, izquierda o centro, de forma totalmente aleatoria. En estos días la cizalla fue bien alta o bien baja, en una proporción similar. Igualmente sucedió al observar los cambios de dirección del viento en los diferentes niveles, lo mismo fueron considerables, que no lo fueron.

No discrepamos en esencia con lo observado por BROWNING, respecto a las características de días de tormenta con los desarrollos creciendo en su parte derecha, pero hubo días en los cuales la cizalladura fue alta y, sin embargo, no se desarrollaron por la

derecha exclusivamente, o bien se formaron indiscriminadamente en cualquier parte de la nube.

## TRAYECTORIAS

Al tratar el aspecto de la dirección en la cual avanzaron las tormentas, vamos a considerar sólo aquellas tormentas que se desplazaron apreciablemente en el espacio, llamadas también tormentas no estacionarias, pues a las que no se movieron de su lugar de formación lógicamente no se les puede asignar una dirección de avance. De las 645 tormentas estudiadas, 556 fueron como ya vimos las no estacionarias.

En general, se considera que «la traslación de las tormentas está muy correlacionada con las velocidades del viento en las altitudes a las cuales se localizan las nubes» (BATTAN, 1973). Pero se ha observado que en el interior de las tormentas, en la zona de desarrollo de los nuevos ecos, el movimiento era menos definido (HEYMSFIELD, 1983 y KNIGHT, 1984). Por estas razones dividiremos este apartado en diversas partes:

### Trayectorias de las tormentas del Valle Medio del Ebro

Las tormentas detectadas con el radar, han sido clasificadas respecto a la dirección en la que avanzaron, de acuerdo a una rosa de 16 direcciones, tal y como podemos ver en la figura 1 y hallaremos la trayectoria de la parte más intensa de máxima reflectividad de la tormenta (BROWNING, 1977). La mayoría de las tormentas presentaron una trayectoria en línea recta, pero tal y como veremos más adelante no todas tuvieron esta característica.

Se observó en el Valle Medio del Ebro un claro predominio de trayectorias en el tercer cuadrante (64,1%, sobre un total de 556 trayectorias) con un máximo de 26,3% para tormentas desplazándose en la dirección SW-NE, siguiéndole con un 17,4% la dirección WSW-ENE, y un 17,3 en la dirección W. Estas direcciones predominantes coinciden con la trayectoria más frecuentes que en España presenta la circulación general at-

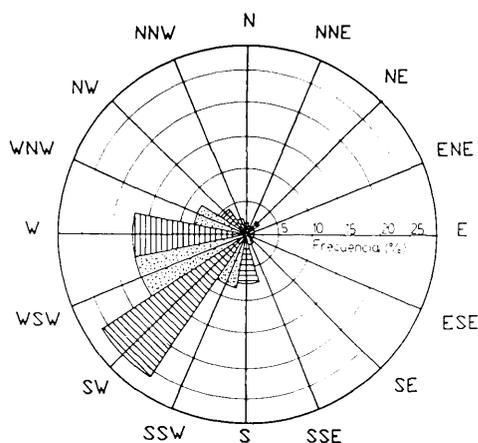


Fig. 1.—Rosa de 16 direcciones de las trayectorias seguidas por las 556 tormentas no estacionarias, detectadas en todo el área de estudio.

mosférica (FONT, 1983 y GEDZELMAN, 1985), en contraste con los vientos predominantes a baja altura, en la zona en estudio, de componentes NW-SE (cierzo) y SE-NW (conocido en la zona de estudio como «bochorno»), principalmente, durante el verano. Esto es acorde con el hecho de que las tormentas avanzan empujadas por los vientos en altura, como veremos más adelante.

### Trayectorias de los diferentes tipos de tormentas

Tal y como apreciamos en el cuadro 4, las trayectorias medias seguidas por los diferentes tipos de tormentas, no difieren entre sí. Esto ha sido contrastado por el Test de K-W (CALVO, 1987), siendo el valor del estadístico «H» de 1,38, y el nivel de significación del 50,12%.

Por otra parte tenemos que las tormentas consideradas como estacionarias fueron un total de 68 tormentas del tipo I, 20 del tipo II, del grupo III no se observó ninguna y del tipo IV, tan sólo una tormenta.

### Influencia del viento en altura sobre las trayectorias

Después de analizar cuales son las trayectorias que habitualmente siguen las tor-

Cuadro 4.—Estudio de las trayectorias para los diferentes tipos de tormenta. Test «H» de Kruskal-Wallis

Tipo de tormenta	Simb. grupo	Nº casos	Frec. (%)	$\bar{x}$	$\sigma$
Unicelular .....	I	282	52,02	11,41	2,97
Multicelular .....	II	230	40,57	11,19	2,34
Supercelular (unicelular) .....	III	26	4,38	11,00	2,81
Supercelular (multicelular) .....	IV	18	3,03	11,94	1,43
GLOBAL .....		645	100	48,81	47,77

Test de Kruskal-Wallis  $H=1,38$ , g.l.=3,  $\alpha(\%)=50,12$

mentas del Valle Medio del Ebro, vamos a determinar la posible influencia de los vientos a diferentes alturas (850, 700, 500 y 300 HPa), sobre las trayectorias de las tormentas. Los datos relativos a la dirección de los vientos fueron obtenidos de los Boletines Europeos. Trataremos en este apartado tres aspectos diferentes:

a) *Trayectorias coincidentes con los vientos en los vientos en altura a 850, 700, 500 y 300 HPa*

Se observó que:

— De los 556 casos de tormentas no estacionarias, 150 de las mismas (27,0%) tienen trayectorias coincidentes con la dirección del viento a 500 HPa y 151 (27,22%) al de 300 HPa, tal y como vemos en el cuadro 5.

— Apenas 90 (16,2%) tormentas mantienen direcciones coincidentes con el viento a 850 HPa.

— A 700 HPa coincidieron 124 tormentas (22,3%).

Luego un número importante de tormentas presentan en el Valle Medio del Ebro trayectorias coincidentes con los vientos a diferentes alturas.

b) *Trayectorias no coincidentes con los vientos a 850, 700, 500 y 300 HPa*

Respecto a las tormentas que no siguieron una dirección en su avance coincidente con

Cuadro 5.—Desviación de las trayectorias de las tormentas respecto a la dirección del viento de los 850, 700, 500 y 300 HPa

Nivel	Desplazamiento	Nº	%
850 HPa	Izquierda	148	26,6
	Derecha	318	57,2
	Sin desviación	90	16,2
700 HPa	Izquierda	210	37,8
	Derecha	222	39,9
	Sin desviación	124	22,3
500 HPa	Izquierda	201	36,1
	Derecha	205	36,9
	Sin desviación	150	27,0
300 HPa	Izquierda	247	44,4
	Derecha	158	28,4
	Sin desviación	151	27,2

los vientos en altura, se ha observado, según apreciamos en el cuadro 5 que:

— Si consideramos la dirección del viento a 850 HPa, un 57,2% de las tormentas estaban desviadas a la derecha del mismo y un 26,6% a la izquierda.

— En los niveles intermedios, de 700 a 500 HPa, el porcentaje de tormentas que manifestaron tener una trayectoria desviada hacia la derecha del viento en esos niveles fue similar al porcentaje de las desviadas a la izquierda (del orden del 38%, en ambos casos). CARTE *et al.* (1978), indican que a 500 HPa la tendencia hacia la izquierda es mayor que hacia la derecha. MARWITH (1972b), por su parte opina lo contrario.

— En cambio en los 300 HPa se observó una mayor tendencia de tormentas desviadas hacia la izquierda de la dirección del viento en este nivel (44,45), frente a un 28,4% de tormentas situadas a la derecha, en contraposición con lo que sucedía en los niveles bajos.

Al hacer un promedio de las desviaciones de las trayectorias respecto a las direcciones del viento, en cada uno de los cuatro niveles estudiados, se observó que la media se sitúa en 38° (1,7 sectores) para los niveles de 700, 500 y 300 HPa, y en los 45° (2,0 sectores, es decir, 45°), respecto del nivel de los 850 HPa. Las desviaciones típicas fueron similares, del orden de 1,7 sectores. MARTWITZ (1972a), observó desviaciones de hasta 60°, en supercélulas, y KNIGHT *et al.* (1982), de incluso más de 90°. En el Valle Medio del Ebro del orden del 10% de las tormentas estudiadas superaron los 65° en cualquier nivel.

Las menores desviaciones fueron de 22,5° (amplitud de uno de los 16 sectores de la rosa de vientos), y se dieron en 197 casos a los 700 HPa, y del orden de las 170 tormentas, para los demás niveles.

Todo lo anterior completa lo dicho acerca de la influencia de los vientos en niveles superiores a los 3 km. sobre la dirección de avance de las tormentas. El viento de superficie o próximo a ella como es el de 850 HPa, no parece ejercer tanta influencia. Esto es bastante concordante con la observación de GARCÍA DE PEDRAZA (1964), respecto a que el viento del SW entre los 500 y 700 HPa empuja a las tormentas marcando su trayectoria en el Valle del Ebro.

Resultados similares ya los apuntó BROOKS (1946), pero que la correlación sea superior con el viento a 700 HPa como dice LIGDA *et al.* (1954), o con el viento a 750 HPa como recoge SULAKVELIDZE *et al.* (1977) de un trabajo de Newton y Katz, o con el de 800 HPa que apunta CARTE *et al.* (1978), no se cumple al menos para las tormentas del Valle Medio del Ebro.

Por su parte, KNIGHT (1982), dice que debe considerarse tanto la influencia de vientos por debajo de la base de las nubes, como los vientos de los niveles en los cuales se forma y reside la tormenta a lo

largo de su tiempo de vida. A este respecto, las observaciones indicaron en superficie direcciones de viento de componente este en un 64,3% de los días de actividad tormentosa y trayectorias de las tormentas con esa componente ya vimos que apenas fueron observadas.

### c) Trayectorias respecto a la media de los vientos troposféricos

Hasta ahora hemos estudiado las trayectorias de las tormentas respecto a la dirección de los vientos a 850, 700, 500 y 300 HPa, pero ahora veremos qué comportamiento se observa en la trayectoria de las tormentas si hallamos cada día la media de los vientos troposféricos.

BROWNING (1977), considera que las tormentas unicelulares se mueven con la media de los vientos en altura y que la supercélulas mantienen trayectorias a la derecha o a la izquierda de la media de los vientos troposféricos. Mientras PHILLIPS (1973) y KRAUSS *et al.* (1984) localizan tormentas supercelulares de carácter multicelular, moviéndose a la derecha de los vientos troposféricos, GRANDIA *et al.* (1975), encuentra unicélulas moviéndose a la derecha del viento a 700 HPa. Respecto a esto en el Valle Medio del Ebro, tal y como observamos en el cuadro 6,

Cuadro 6.—Desviación de las trayectorias de los diferentes tipos de tormentas, respecto a la dirección media de los vientos troposféricos

Nivel	Desplazamiento	Nº	%
Unicelulares (I)	Izquierda	134	42,6
	Derecha	120	47,5
	Sin desviación	28	9,9
Multicelulares (II)	Izquierda	89	38,7
	Derecha	103	44,8
	Sin desviación	38	16,5
Supercélulas (unicelulares) (III)	Izquierda	13	50,0
	Derecha	13	50,0
	Sin desviación	0	0,0
Supercélulas (Multicelul.) (IV)	Izquierda	10	55,5
	Derecha	7	38,9
	Sin desviación	1	5,6

las supercélulas (grupos III y IV, considerados conjuntamente) mantienen trayectorias a la derecha de los vientos troposféricos (45,5%) y un 54,5% a la izquierda. En cambio las tormentas unicelulares no se comportaron como indica BROWNING, pues sólo un 9,9% de la 282 tormentas unicelulares detectadas siguieron la dirección de los vientos en altura. El resto se mantuvo de forma indistinta a la derecha o a la izquierda. Algo similar manifestaron las tormentas multicelulares (grupo II), aunque la tendencia hacia la derecha fue algo superior que hacia la izquierda (44,8% frente al 38, 7%).

Por otra parte, KNIGHT *et al.* (1982), también considera que las trayectorias pueden ser tanto a derecha como a izquierda de la media del viento en altura, para las tormentas en general. En el Valle Medio del Ebro también se observa que un 43,7% de las tormentas tenían su trayectoria situada a la derecha del viento medio entre los 850 y los 300 hPa y que un 44,2% estaban a la izquierda. Luego la proporción entre las que tienen trayectorias hacia la derecha de los vientos troposféricos es similar a las que tienen a la izquierda. Esto concuerda con lo observado por algunos autores, pero contrasta con las opiniones de aquellos que afirman de forma general que las trayectorias se sitúan a la derecha.

#### 4. Propagación interna de los ecos

Al observar la trayectoria de una tormenta a partir de la secuencia de PPI, se pudo apreciar que algunas de las tormentas a partir de su fase de maduración sufren un desplazamiento de sus zonas de más intensidad (es decir, de máximos factores de reflectividad), bien hacia la derecha o hacia la izquierda, respecto a la trayectoria inicial que tenían. Según BROWNING (1977), la desviación de la trayectoria se realiza hacia el lado de la tormenta que contiene a la corriente ascensional. Los cambios de dirección que experimenta el viento o bien los nuevos desarrollos que tienden a formarse a la izquierda de las células ya maduras, pueden ser los causantes de estas desviaciones en la trayectoria de las tormentas (KRAUSS *et al.*, 1984).

De las tormentas detectadas en el Valle Medio del Ebro, con desplazamiento lateral de sus trayectorias hacia la derecha se observaron 102 tormentas, hacia la izquierda 78, y tormentas con una trayectoria recta, sin desviaciones apreciables, en 465 tormentas (en estas últimas están incluidas las 89 tormentas estacionarias), como vemos en el cuadro 7. Podemos apreciar, en consecuencia, que la mayoría no cambiaron su dirección de desplazamiento.

No hemos comprobado las observaciones realizadas por KRAUSS, pues para ello sería necesario disponer de un mayor número de cortes horizontales, o PPI de las tormentas, para poder apreciar la localización exacta de los nuevos desarrollos frente a los más maduros. Sin embargo, hemos intentado ver la relación existente entre la zona donde se localizaron los nuevos desarrollos y la desviación que sufre la tormenta, llegando muchas veces a separarse de su inicial trayectoria en línea recta. Los resultados se reflejan en el cuadro 7 y se puede decir que tormentas con sus zonas más activas en su lado derecho respecto a la dirección de avance, no manifiestan generalmente desviaciones (67,1%). Las que se desplazaron hacia la derecha tuvieron una proporción similar, alrededor del 40%, de tener sus desarrollos a la derecha o en el centro. En cambio las tormentas que se desplazaron hacia la izquierda, manifiestan un comportamiento más irregular, y podemos observar cómo los

Cuadro 7.—Desplazamiento de lateral de las trayectorias de las tormentas del Valle Medio del Ebro, en función de la localización interna de sus nuevos desarrollos

Desplazamiento de la trayectoria	Localización de los nuevos desarrollos	Nº	%
Derecha	Izquierda	42	41,2
	Derecha	20	19,6
	Sin desviación	40	39,2
Izquierda	Izquierda	30	38,4
	Derecha	13	16,7
	Sin desviación	35	44,9
Sin desviación	Izquierda	101	21,7
	Derecha	52	11,2
	Sin desviación	312	67,1

desarrollos localizados en el lado izquierdo, no parecen influir de forma decisiva en desviaciones hacia la izquierda de la direccin de avance (apenas un 16,7%).

En el cuadro 8, observamos cómo se distribuyeron las tormentas del área de estudio de acuerdo con el tipo de tormenta y el desplazamiento lateral sufrido en sus trayectorias, dejando de tener unas trayectorias en línea recta. Lo más destacable es que las tormentas multicelulares (grupo II) tienen unas trayectorias que se desplazaron con mayor asiduidad hacia la derecha que hacia la izquierda (un 24,45% a la derecha y un 12,8% a la izquierda), mientras que las unicelulares (grupo I)), el número de las desplazadas a la izquierda fue mayor (6,6% y 10,6%, respectivamente).

NEWTON y FRANKHAUSER (1964) afirman que tormentas con un diámetro de los ecos de radar superiores a los 18 km. tienden a desviarse hacia la derecha del viento a niveles medios y hacia la izquierda para diámetros inferiores a los 18 km.

El diámetro medio del contorno de 10 dBZ de una tormenta, fue medido en el PPI de mayor extensión de los registrados y las tormentas con desplazamientos de sus trayectorias hacia la derecha fueron los que alcanzaron mayor diámetro medio, con 34 km., siendo el intervalo de variación también superior, pues la desviación estándar se situó en los 23 km. Los resultados obtenidos fueron:

	$\bar{x}$	$\sigma$
Derecha .....	34 km.	23 km.
Izquierda .....	26 km.	16 km.
Centro .....	23 km.	18 km.

Cuadro 8.—Estudio del desplazamiento lateral de las trayectorias para los diferentes tipos de tormenta

Tipos de tormentas	Desplazamiento	Nº	%
Unicelulares (I)	Izquierda	37	10,6
	Derecha	23	6,6
	Sin desviación	290	82,8
Multicelulares (II)	Izquierda	32	12,8
	Derecha	61	24,4
	Sin desviación	157	62,8
Supercélulas (unicelulares) (III)	Izquierda	6	23,1
	Derecha	11	42,3
	Sin desviación	9	34,6
Supercélulas (Multicelul.) (IV)	Izquierda	3	15,8
	Derecha	7	36,8
	Sin desviación	9	47,4

Se llegaron a observar tormentas de hasta 128 km. de diámetro, aunque no son muy habituales tormentas de tales dimensiones. El 80% de las tormentas con desplazamiento hacia la derecha mostraron diámetros entre 12 y 58 km., las de desplazamiento hacia la izquierda entre 10 y 44 km., mientras que las que mantuvieron su trayectoria en línea recta, entre 8 y 44 km., también en un 80% de los casos.

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores de este trabajo desean expresar a don Domingo Cadahía, a don Manuel Dávila y a don Felipe Aparicio las facilidades prestadas por la Subdirección de Sanidad Vegetal para la realización del mismo.

**ABSTRACT**

CASTRO, A.; J. L. SÁNCHEZ, R. FRAILE, J. L. MADRID (1989): Análisis de la estructura de las tormentas del Valle del Medio Ebro. *Bol. San. Veg. y Plagas*, 15: (2): 149-160.

In this paper we presentt the results found analysing the PPI and RHI sequences made by a meteorological radar in order to understand the structure of storms on the Ebro Central Valley. The results show different types of storms with characteristics defined in terms of diametre, surface, volume and way to introduce the daughter cells in the mature cloud. Another aspect to discuss is the trajectory of the storms and its relation with the tropospheric winds.

**Key words:** Storms, Trajectories, Tropospheric winds.

## REFERENCIAS

- BATTAN, L. (1973): *Radar observation of the Atmosphere*. The University of Chicago Press.
- BROOKS, H. R. (1946): A summary of some radar thunderstorms observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, vol. 27, 557-563.
- BROWNING, K. A. (1977): The structure and mechanisms of hailstorms. In: *Hail: A review of hail. Science and Hail Suppression. Meteorol. Monogr.*, vol. 16, 38, 1-43.
- BYERS, H. R. and BRAHAM, Jr. R. R. (1949): *The Thunderstorm*. U.S. Dept. of Commerce. Washington D.C. 287 pp.
- CALVO, F. (1987): *Estadística Aplicada*. Ed. Deusto. Bilbao.
- CARTE, A. E. and HELD, G. (1978): Variability of hailstorms on the South African Plateau. *J. of Appl. Meteor.*, vol. 17, 3, 365-373.
- DONALDSON, R. J., Jr. (1961): Radar reflectivity profiles in thunderstorms. *J. Meteor.*, vol. 18, 292-305.
- FARLEY, R. D.; ORVILLE, H. D. and ENGLISH, M. (1986): Numerical simulations of the seeding of feeder cells. Alberta hailstorm case of 26 July 1983. Preprints 10th Conf. Wea. Mod. Arlington. VA. 78-83.
- FONT, T. I. (1983): *Climatología de España y Portugal*. INM.
- FOOTE, G. B. and MOHR, C. G. (1979): Results of a randomized hail suppression experiment in northeast Colorado: Part VI. Post hoc stratification by storm intensity and type. *J. Appl. Meteor.*, vol. 18, 1589-1600.
- GARCÍA DE, P. L. (1964): La predicción del tiempo en el Valle del Ebro. Servicio Meteorológico Nacional. Publicación A-38.
- GEDZELMAN, S. D. (1985): *Atmospheric Circulation Systems. Handbook of Applied Meteorology*. A. Wiley-Interscience Publication. Chap. 1, 22 pp.
- GRANDIA, K. L. and MARWITZ, J. D. (1975): Observational investigations of entrainment within the weak echo region. *Monthly Weather Review*. Vol. 103, 3, 227-234.
- HEYMSFIELD, A. J. (1983): Case study of a hailstorm in Colorado. Part IV: Graupel and hail growth mechanisms deduced through particle trajectory calculations. *J. of Atm. Sci.*, vol. 40, 6, 1482-1509.
- JAMESON, A., R. and HYMSFIELD, A. J. (1980): Hail growth mechanisms in a Colorado storm. Part I: Dual-Wavelength Radar observations. *J. of Atm. Sci.* vol. 37, 8, 1763-1778.
- KNIGHT, A. C.; SMITH, P. and WADE, C. (1982): Storm Types and Some Radar Reflectivity Characteristics. Hailstorms of the Central High Plains. Vol I: The National Hail Research Experiment. Vol. I, 81-93.
- KNIGHT, A. C. (1984): Radar and other observations of two vaulted storms in North-eastern Colorado. *J. of Am. Sci.*, vol. 41, 2, 258-271.
- KRAUSS, T. W. and MARWITZ, J. D. (1984): Precipitation processes within an Alberta supercell hailstorm. *J. of Atm. Sci.*, vol. 41, 6, 1025-1034.
- LIGDA, M. G. H. and MAYHEW, W. A. (1954): On the relationship between the velocities of small precipitation areas and geostrophic winds. *J. Meteor.*, vol. 11, 421-423.
- MARWITZ, J. D. (1972a): The structure and motion of severe hailstorms: Part I. Supercell storms. *J. Appl. Meteor.*, vol. 11, 166-179.
- MARWITZ, J. D. (1972b): The structure and motion of severe hailstorms: Part II. Multicell storms. *J. Appl. Meteor.* vol. 11, 180-188.
- MILLER, L. J. and DYE, J. E. (1983): Dynamical-Microphysical evolution of a convective storm in a weakly-sheared environment. Part II: Airflow and precipitation trajectories from Doppler radar observations. *J. of Atm. Sci.*, vol. 40, 9, 2097-2109.
- MUSIL, D. J.; MAY, E. L.; SMITH, P. L., Jr., SNAD, W. R. (1976): Structure of an evolving hailstorm. Part IV: Internal structure from a penetrating aircraft. *Mon. Weather Rev.*, vol. 104, 5, 596-602.
- NEWTON, L. J. and FRANKHAUSER, J. C. (1964): On the movements of convective storm with emphasis on size discrimination in relation to water-budget requirements. *J. Appl. Meteor.*, vol. 3, 651-688.
- OMM, (1966): *Vocabulario Meteorológico Internacional*. NO. 182. TP. 91.
- PHILLIPS, B. B. (1973): Precipitation characteristics of a sheared, moderate intensity, supercell-type Colorado thunderstorm. *J. of Appl. Meteor.*, vol. 12, 1354-1363.
- ROGERS, R. R. (1976): *Física de nubes*. Ed. Reverté.
- SAUVAGEOT, H. (1982): *Radarmeteorologie. Teledeteccion active de L'atmosphere*. Ed. Eyrolles. Paris (France).
- SULAKVELIDZE, G. K.; GLUSHKOVA, N. I. and FEDCHENKO, L. M. (1977): *Forecasting of hail, thunderstorms and showers*. Ed. Ketterpress Enterprises. Jerusalem.

(Aceptado para su publicación: 6 febrero 1989)