

Influencia de la orografía y de la inestabilidad convectiva en la distribución espacial de lluvias extremas en Cataluña

M. C. LLASAT BOTIJA

Departamento de Física de la Atmósfera, Astronomía y Astrofísica. Facultad de Física. Avda. Diagonal 647, 08028-Barcelona

RESUMEN

Se han estudiado metódicamente todos los episodios de inundaciones que han afectado a Cataluña en la última mitad de siglo, especialmente el de noviembre de 1982, insistiendo en la distribución espacial de la lluvia y su conexión con la orografía. Para ello, a partir de los radiosondeos de Palma de Mallorca se ha analizado la inestabilidad convectiva obteniéndose los ascensos mínimos necesarios para la inestabilización. Asimismo, se han trazado las líneas de corriente en la baja troposfera lo que ha permitido conocer la dirección del flujo dominante. Se incluye también alguna información de carácter hidrológico.

Palabras clave: Lluvia. Orografía. Inundaciones. Inestabilidad convectiva. Líneas de corriente.

ABSTRACT

All the flash flood events in Catalonia in the last half century have been methodically studied, with special emphasis on the November 1982 event. The relationship between the space distribution of the rainfall and the orography has been analysed. On the basis of the Palma de Mallorca radiosonde ascents, the convective instability has been ascertained and the minimum necessary ascent for the instabilization has been obtained. Streamlines in the lower troposphere have been drawn, which has enabled us to ascertain the dominant flow direction. Some hydrological information has also been included.

Key words: Rain. Orography. Floods. Convective instability. Stream lines.

INTRODUCCIÓN

Los episodios de inundaciones en la costa mediterránea española se han transformado en un fenómeno casi anual en la última década, afectando bien a Levante, bien a Cataluña, y más ocasionalmente, a Andalucía Oriental. Concretamente en los últimos veinticinco años se han registrado nueve episodios en Cataluña (López Bustos, 1964; García y Carrasco, 1958; Font, 1983; Miró-Granada, 1984; Novoa, 1981; López, 1964), de los cuales, cinco, se han producido entre 1982 y 1988 (Cailleau y Santurette, 1983; García *et al.*, 1982; Albertosa, 1983; Novoa, 1985; Puigdefàbregas, 1983; Llasat, 1987).

Tales situaciones se registran principalmente en otoño, iniciándose las lluvias al atardecer. Las precipitaciones máximas registradas en 24 horas superan siempre los 150 mm, no siendo extraño alcanzar los 250 mm. El episodio puede durar desde unas horas (septiembre de 1962) hasta casi una semana (octubre de 1987).

Un estudio detallado de cada una de ellas ha permitido establecer un modelo de la situación meteorológica que caracteriza este tipo de episodios (Llasat, 1989). El análisis simultáneo de la distribución espacial de la lluvia, pone en evidencia el papel que la peculiar geografía catalana desempeña y su interacción con determinados factores meteorológicos.

Parte de las observaciones y resultados aquí presentados proceden de la tesis doctoral «Episodios de lluvias

copiosas en Cataluña: génesis, evolución y factores coadyuvantes» defendida por la autora en la Universidad de Barcelona (1987).

MÉTODO Y MATERIAL

Se han analizado en forma individual los episodios de inundaciones en Cataluña, estableciéndose posteriormente las características comunes. El análisis individual comprende:

- Determinación de la situación meteorológica (superficie, niveles de presión standard, imágenes de satélite...). Para los episodios de 1962 y 1971 se ha utilizado el Täglicher Wetterbericht (Boletín diario del Deutscher Wetterdienst) y para los restantes el Boletín Meteorológico Europeo, elaborado por el mismo servicio. Asimismo se ha utilizado el Boletín Meteorológico Diario del Servicio Meteorológico Nacional (a partir de 1979, Instituto Nacional de Meteorología, I.N.M.) y el Bulletin Quotidien de Renseignements, publicado por la Direction de la Météorologie.

- Partes diarios de Barcelona, El Prat, Tarragona, Lérida, Gerona, Palma, Ibiza, Tortosa, Turó de l'Home, Perpignan, La Molina, Figueras y Observatorio Fabra.

- Estudio de la inestabilidad y contenido en vapor de agua, en la troposfera, en base a la información dada por los radiosondeos de Palma de Mallorca proporcionados por el Centro Meteorológico Zonal de Baleares. Se analizan detalladamente los diversos tipos de estabilidad de estratificación (ascensos elementales, ascenso de una partícula y ascensos en bloque).

- Trazado de las líneas de corriente (proporcionan la dirección del viento en un instante dado).

- Recopilación de datos de lluvia de toda la Península, a partir de las estaciones completas.

- Recopilación de la información proporcionada por las estaciones pluviométricas de Cataluña, Sur de Francia y Aragón, proporcionados por el I.N.M. (España) y la Direction de la Météorologie (Francia). Análisis de las bandas de los pluviógrafos.

- Análisis de la distribución espacial de la lluvia y su relación con la orografía para lo que se ha utilizado, entre otros, el «Mapa topográfico de Catalunya» publicado por el Institut Cartogràfic.

- Síntesis.

Los comentarios geomorfológicos correspondientes al episodio de 1982, proceden del Informe del Servei Geològic de Catalunya (Puigdefàbregas, 1983).

CONCEPTOS BÁSICOS SOBRE LA ESTABILIDAD DE ESTRATIFICACIÓN

Es sabido que para que una partícula ascienda es necesario que esté más caliente que el entorno, o bien, que un factor externo (como por ejemplo una montaña), fuerce el ascenso. La curva que se obtiene uniendo los estados sucesivos por los que la partícula pasaría a lo largo de su ascenso es conocida como curva de evolución y su pendiente se representa con las letras τ o γ según el aire esté saturado de vapor de agua o no. Por otro lado la curva obtenida inscribiendo los datos de presión y temperatura en cada nivel, proporcionados por el radiosonda, es conocida como curva de estado, representándose su pendiente con la letra α .

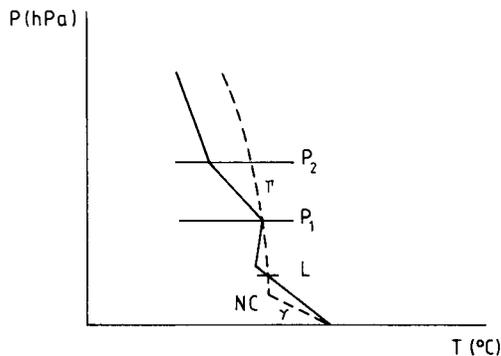
La inestabilidad por ascensos elementales tiene en cuenta la respuesta de un estrato a la penetración de una partícula en su seno. Según los movimientos verticales estén favorecidos o impedidos, se tratará de inestabilidad ($a > g$) o estabilidad ($a < g$), respectivamente. Si ello depende de que el aire esté húmedo o no, se le designa como inestabilidad condicional.

La inestabilidad por ascenso de una partícula considera la posibilidad o no de que una partícula ascienda libremente y, en tal caso, hasta donde. Ésta se puede interpretar a partir del área comprendida entre la curva de estado y la curva de evolución, ya que ésta representa la energía cedida o consumida por la partícula en su ascenso.

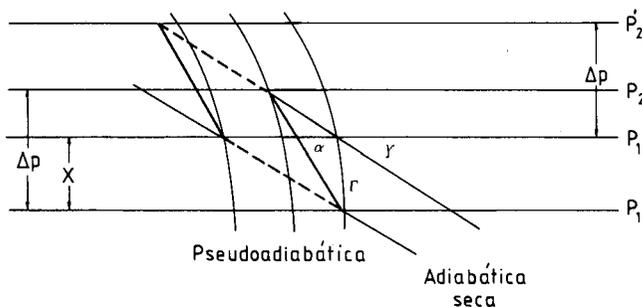
En relación con el papel que pueda desempeñar la orografía se encuentra que la más importante es la inestabilidad convectiva por ascensos en bloque. Este es un tipo de inestabilidad dentro del caso general de estabilidad de estratificación por ascensos en bloque. Para comprenderla supóngase un estrato de aire, no saturado, que en las condiciones actuales no permite apenas el desarrollo de nubes ya que hay inestabilidad condicional o estabilidad ($a < g$). Supóngase ahora que se le fuerza a ascender en bloque hasta un nivel en el que se satura e inestabiliza, dando lugar inmediatamente a la formación de masas de cúmulos o, incluso, de cumulonimbos (fig. 1). El ascenso necesario para que esto se produzca puede ser más o menos grande, según las condiciones, siendo necesario calcularlo para cada estrato. En la figura 2 se muestra un caso en el que una masa de aire estable, se inestabiliza casi en su totalidad al verse obligada a remontar una montaña.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO Y DE LOS PRINCIPALES EPISODIOS

Emplazada al noreste de la Península Ibérica, Cataluña se caracteriza por una orografía accidentada,



a



b

Figura 1. a) Curva de estado ficticia (línea continua) y curva de evolución que seguiría una partícula de aire que ascendiese adiabáticamente desde la superficie. Primero lo haría según una adiabática seca (gradiente α) y una vez se saturase, según una pseudoadiabática (gradiente τ). Por debajo de L está más fría que el ambiente (sondeo a la izquierda) y es necesario darle energía o forzar el ascenso. Por encima de L ascenderá libremente. b) Aspecto de la curva de estado representativa de un estrato atmosférico, cuando éste ascienda una distancia x . Al principio el aire no está saturado, $\alpha < \gamma$ y hay estabilidad. Tras el ascenso se satura y $\alpha > \tau$, habiendo inestabilidad.

Figure 1.- Fictitious sounding (continuous line) and ascent curve followed by a parcel of air displaced adiabatically, from surface (discontinuous line). First, it would follow a dry adiabatic (gradient γ) and after saturation, a pseudoadiabatic line (gradient τ). Under L it is colder than the environment (the ascent curve is on the left of the sounding) and it is need, to give it some energy or to force the ascent. b) Final state of part of the sounding that represents an atmospheric layer, after it ascends a x distance. First, the air is non saturated and there is stability ($\alpha < \gamma$). Then, it is saturated and there is instability.

marcada, principalmente, por tres cadenas montañosas (Litoral, Prelitoral y Pirenaica) y dos depresiones (Litoral y Central). Tanto la costa como las cadenas litoral y prelitoral están orientadas, en su mayor parte, en dirección suroeste-noreste (fig. 3). En el Pirineo, aunque su eje esté dirigido en dirección oeste-este, algunas montañas y sierras están orientadas, también, paralelamente a la costa.

La isla de Mallorca se encuentra emplazada al sureste de Cataluña, lo que permite la utilización de los radiosondeos efectuados en Palma para caracterizar la masa de aire que luego incidirá sobre aquella (Llasat, 1987).

Episodio del 25 de septiembre de 1962

Las lluvias, que afectaron a toda España produciéndose inundaciones más locales (Palma, Madrid...), sucedieron a un largo periodo de sequía. En Cataluña, las primeras lluvias se registraron en la provincia de Tarragona durante la noche del 24, prolongándose de forma intermitente y débil hasta la tarde del 25 en que se registraron tormentas en toda la región. Las máximas intensidades se alcanzaron entre las 11 y las 12 de la noche. Si bien más debilitadas, las lluvias se prolongaron hasta el día 27. El balance definitivo fue de 441 muertos, 374 desaparecidos, 213 heridos y 2.650 millones de pérdidas materiales.

El análisis de las isoyetas (fig. 4) muestra cómo en gran parte de Cataluña se superaron los 50 mm en 24 horas. La provincia más afectada fue Barcelona, (Martorelles, Ma, 250 mm) en donde la práctica totalidad de la lluvia se recogió en una hora, alcanzándose una intensidad máxima de 6 mm/min (360 mm/h). Se desbordaron los ríos Besós y Llobregat, con caudales de 1870 m³/s (en su tramo final) y 1550 m³/s (Martorell, Mr), respectivamente.

A partir del radiosondeo de Palma se observa una capa muy húmeda (próxima al 90%) y cálida, en niveles bajos, en tanto que la masa de agua precipitable entre la superficie y 300 hPa es de 40 mm (un 131% del valor medio). El ascenso mínimo necesario para la inestabilización es de unos 450 m para los primeros 100 hPa (es decir, para el estrato de unos 870 m de espesor situado junto al suelo).

El viento en la baja troposfera era del este-sureste en Cataluña, lo que facilitaba la incidencia perpendicular a la línea de la costa y el aporte de aire húmedo y cálido procedente del sur del Mediterráneo. El hecho de que Cataluña estuviese situada al borde del anticiclón centroeuropeo favoreció este tipo de circulación así como la acumulación de vapor de agua en las capas bajas de la atmósfera. En altura se produjo una entrada de aire frío del noroeste, que favoreció la inestabilización.

Episodio del 20 al 23 de septiembre de 1971

Las lluvias se iniciaron a primeras horas de la mañana del día 20, con excepción de las zonas montañosas en las que llovió durante todo el día anterior prolongándose posteriormente hasta el día 24. Previamente se habían registrado precipitaciones considerables (tanto acuosas como sólidas) en el norte de la Península. Las tormentas violentas se extendieron al Sur de Francia, aunque la máxima en 24 h en Perpignan fue de 95,9 mm, el día 21. Se desbordaron los ríos Tordera y Llobregat, para el que se midieron los mayores caudales del siglo (3.080 m³/s a su paso por

Martorell, con una elevación de diez a doce metros por encima de su cauce normal). El balance fue de 7.000 millones de pérdidas y 19 víctimas mortales.

El día 20 las lluvias se produjeron en toda Cataluña y parte de Aragón si bien las máximas en 24 horas se recogieron en la provincia de Barcelona (Esparraguera, Es, 308 mm). Durante los días sucesivos las máximas fueron de 177 mm (La Batlloria, LB), 285 mm (Cadaqués, Ca) y 158,6 mm (Cardedeu, Cr), respectivamente. La figura 5 muestra que las lluvias afectaron principalmente a toda la zona costera, desde el Baix Ebre (Perelló, Pe, 313 mm) hasta el Alt Empordà (Cadaqués, 390,6 mm). La información de las

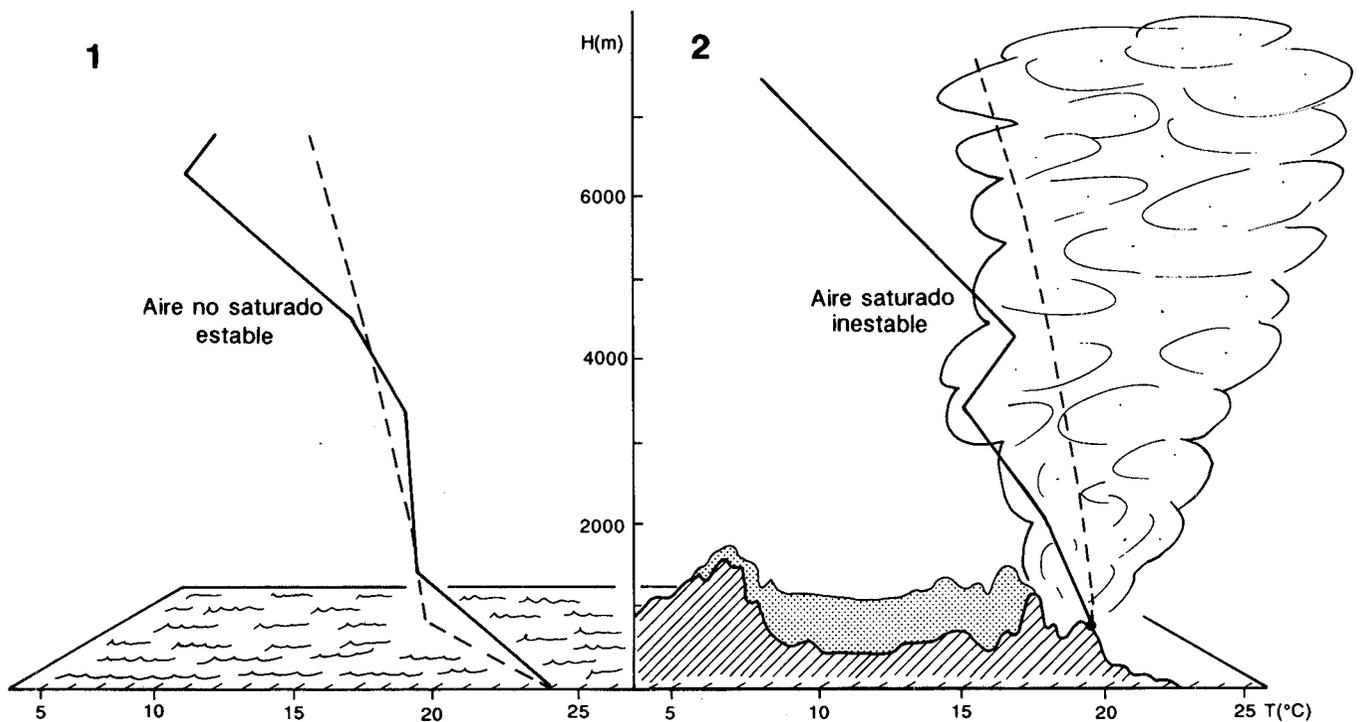


Figura 2.- 1) Curva de estado representativa de la masa de aire situada sobre el mar, al sureste de Cataluña. Se trata de aire no saturado, estable, en cuyo seno no se formarán nubes. La línea discontinua representa la curva de evolución que seguiría una partícula que ascendiese adiabáticamente desde el nivel del mar. 2) Aspecto que adquiere la curva de estado de la masa de aire anterior cuando alcanza las primeras estribaciones montañosas y experimenta un ascenso en bloque de 700 m. El aire se ha saturado y hay inestabilidad a todos los niveles lo que favorece la convección y el desarrollo de cumulonimbos. Una partícula situada en la base ascenderá libremente (el ejemplo corresponde al 19 de octubre de 1977, expresando la escala vertical en altitudes).

Figure 2.- 1) Sounding of the air mass situated to the southeast of Catalonia above the Mediterranean Sea. It is unsaturated, stable air, without cloud formation. The discontinued line represents the ascent curve followed by a parcel of air displaced, from sea level, vertically and adiabatically with respect to its environment. 2) Aspect of the above air mass sounding when it reaches the first mountains and the layers of air become unstable on being lifted bodily 700 metres. The air becomes saturated and there is instability at all the levels, which favours convection and cumulonimbus development. A parcel located on the basis will lift freely.



Figura 3.- Mapa de Cataluña en que se representa algunas características orográficas y la red fluvial. Se indican además todos los puntos mencionados en el texto.

Figure 3.- Map of Catalonia with some orographic features and the fluvial network. All the points mentioned in the text are shown.

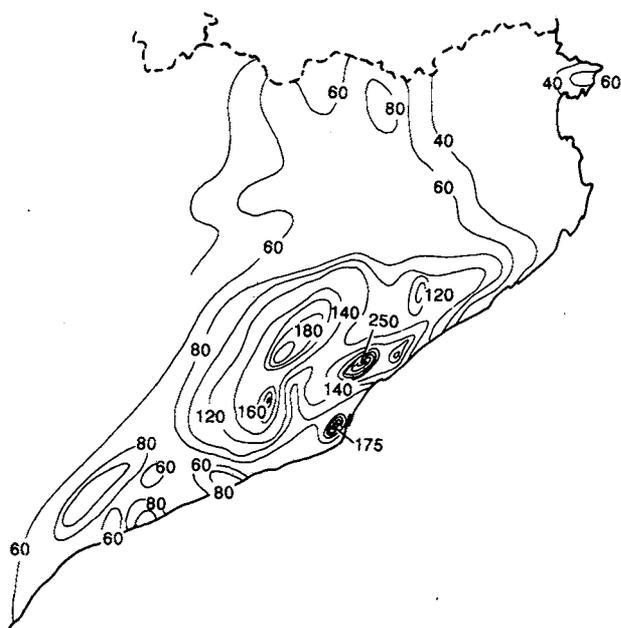


Figura 4.- Configuración de las isoyetas del día 25 de septiembre de 1962. El intervalo utilizado es de 20 mm.

Figure 4.- Isohyets of precipitation recorded on September 25th, 1962. The interval between them is 20 mm.

estaciones completas sugiere un movimiento del sistema convectivo hacia el Oeste, o bien, la formación de nuevas células al oeste de las primitivas.

Este episodio de inundaciones es el único, en Cataluña, que conjuntamente al de 1986, se caracteriza por la presencia de una gota de aire frío. Ésta, procedente del suroeste de Irlanda se situó los días 20 y 21 sobre el norte de Castilla, y el día 22, más reducida y debilitada, sobre Galicia. Sobre Cataluña dio vientos muy fuertes, del SW en altura y del SE en la baja troposfera, lo que permitió el aporte de aire cálido en todos los niveles, muy húmedo, además, en los niveles bajos.

Las altas presiones y la subsidencia permitieron el almacenamiento de vapor de agua sobre el Mediterráneo, impidiendo que los cúmulos se desarrollasen con carácter general.

Episodio de los días 18 y 19 de octubre de 1977

Las lluvias se iniciaron en la madrugada del día 18 y se prolongaron hasta la noche del día 19. El día 18 llovió copiosamente en las cabeceras de las cuencas de los ríos gerundenses (Camprodón, Cm, 272 mm) y al día siguiente, con mayor intensidad en los tramos

bajos de éstos, acentuando el efecto de las lluvias precedentes. Como consecuencia se produjeron avenidas en los ríos Ter y Fluvià (el caudal máximo fue de 1200 m³/s). En este caso es destacable la diferencia entre las cantidades recogidas en Cadaqués y Rosas, Ro, (276 y 260 mm) y Port de la Selva, PS, (34,6 mm). La lluvia máxima totalizada en 48 horas (fig. 6), fue de 385 mm (Vilanova de Sau, VS). En el resto de la región las lluvias fueron poco importantes. Durante estos días también se registraron inundaciones en el Departamento de los Pirineos Orientales, en Francia. Afortunadamente, no hubo pérdidas humanas.

El día 17 ya se registraba inestabilidad convectiva en los primeros 1500 m, con ascensos mínimos comprendidos entre 80 y 600 m. Los días 18 y 19 se extendía a lo largo de los 4000 primeros metros y los ascensos requeridos oscilaban en torno a los 300 m.

Durante estos días se produjo una marcada advección de aire cálido, húmedo en la baja troposfera y seco en la alta, con vientos de componente este en superficie.

Episodio de los días 6 a 10 de noviembre de 1982

Las tempestades producidas los días 6,7 y 8 de noviembre de 1982 en Cataluña, los Pirineos y el sur de Francia son las más graves registradas desde 1940 en esta zona. El efecto devastador no sólo fue debido a la lluvia sino también al viento que alcanzó velocidades de más de 170 km/h en el Sur de Francia, con lo que provocó un oleaje que anegó gran parte de los pueblos costeros del Golfo de León. El resultado fue, sólo en Cataluña, de catorce muertos y 45 mil millones de pesetas en pérdidas.

La zona más afectada fue la de los Pirineos Centrales y Orientales (fig. 7), en donde se llegaron a recoger 408 mm en 24 horas en Vallcebollere (Va) y Ossejà (Os). Entre los días 6 y 8 se totalizaron 556 mm en La Molina (LM) y 610 mm en Py (Py), aunque es muy posible que tales cifras se superasen pero que no fuesen registradas. Las lluvias también afectaron al resto de la Península, especialmente en el Sur en donde se superaron en 24 horas las precipitaciones medias mensuales. Asimismo, en Francia se extendieron a las regiones de Le Gard, L'Herault, La Lozère y L'Ardèche. En el macizo del Aigoual se registraron entre los tres días 548,5 mm.

La lluvia duró entre 48 y 60 horas sin interrupción, prolongándose en algunos lugares hasta los días 9 y 10 aunque muy debilitada. Las máximas cantidades se recogieron entre las 13 y las 24 UTC del día 7. La distribución fue prácticamente la misma a lo largo de todo el episodio, observándose la formación de numerosas tormentas multicelulares con escaso movimien-

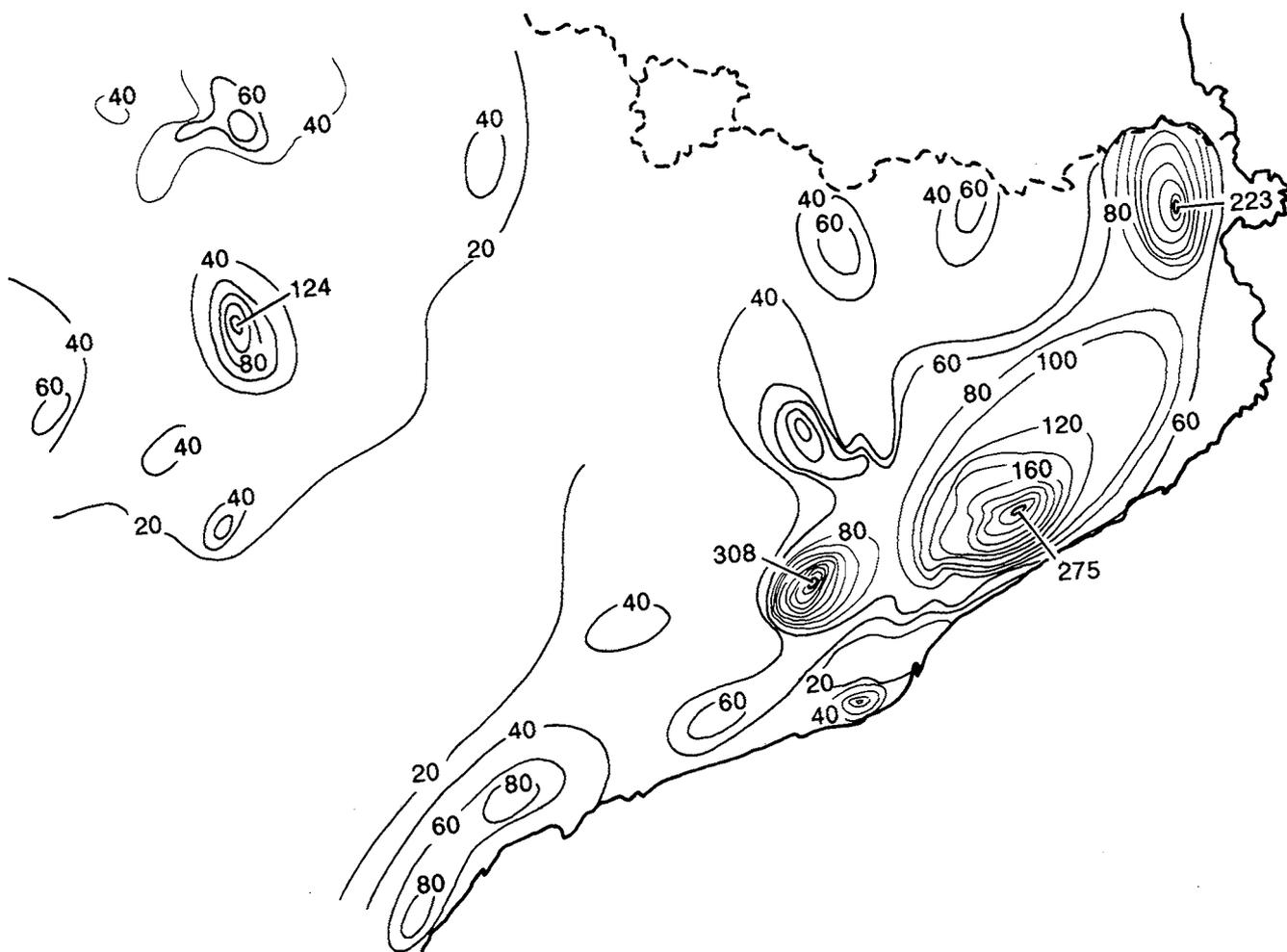


Figura 5.- Configuración de las isoyetas del día 20 de septiembre de 1971. El intervalo utilizado es de 20 mm.

Figure 5.- Isohyets of precipitation recorded on September 20th, 1971. The interval between them is 20 mm.

to de traslación o bien, con un ciclo vital «pulsante» (esto pudo ser comprobado gracias a la gran cantidad de datos de que se dispuso). Estos núcleos presentan una forma aproximadamente elíptica con el eje mayor orientado de Suroeste a Noreste o de Sur a Norte. Por otro lado el gradiente medio de precipitación (variación de la cantidad de lluvia en función de la distancia) suele ser mayor en la parte norte, debido al efecto de las montañas.

Tanto el día 6 como el 7, las máximas precipitaciones en la parte española (214 y 408 mm, respectivamente) se registraron en las cabeceras de los ríos Llobregat y Segre. En la cabecera del Cinca se totalizaron entre los dos días 412 mm, en tanto que sobre las cabeceras del Noguera Pallaresa y del Noguera Ribagorzana, oscilaron en torno a los 300 mm. Como consecuencia de ello el día 8 se produjeron las más importantes

avenidas (tabla I). En la cuenca del Llobregat el máximo caudal que se registró a la entrada del embalse de La Baells fue de 1250 m³/s, el día 7 a las 22 horas, manteniéndose entre las 17 horas de este día hasta las 2 de la mañana del día 8 por encima de los 1000 m³/s. Aun así, el caudal máximo que salió fue de 810 m³/s, lo que muestra el papel regulador que desempeñó el embalse. Lo mismo ocurrió con la presa de Oliana, en el Segre, donde se registró una entrada media de 1886 m³/s entre las 22 y 23 horas del día 7, y una salida de 1700 m³/s.

El río Segre experimentó un aumento de nivel de 13,7 m en Organyà que produjo un ascenso súbito en el pantano de Oliana, de 10,9 m como consecuencia del cual se produjo un terremoto de intensidad II-III en la escala de Mercalli modificada (Puigdefàbregas, 1983).

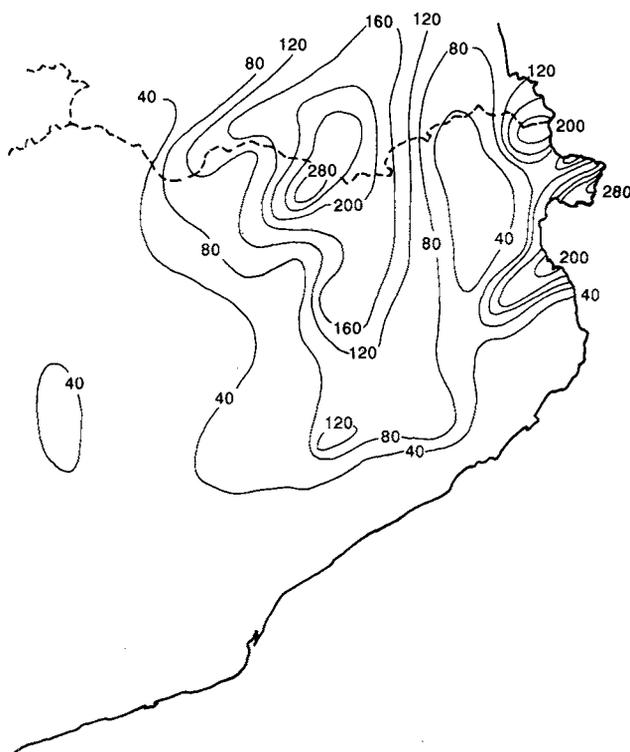


Figura 6.- Configuración de las isoyetas de los días 18 y 19 de octubre de 1977. El intervalo utilizado es de 40 mm.

Figure 6.- Isohyets of amount precipitation recorded on October 18th and 19th, 1977. The interval between them is 40 mm.

Además de las avenidas, la lluvia continuada dio lugar a la saturación de las formaciones superficiales de las vertientes pirenaicas, produciéndose deslizamientos y coladas de barro. Los más importantes tuvieron lugar en la Coma (Co), en la vertiente derecha del Cardener, donde recorrió unos 560 m en nueve horas y, en Pont de Bar (PB), donde destruyó todo el pueblo.

Los radiosondeos de Palma de Mallorca demuestran que los ascensos mínimos necesarios para la inestabilización de gran parte de la troposfera, eran superiores a 1000 m, motivo por el cual las principales lluvias no tuvieron lugar en la costa (como es el caso de los restantes episodios).

La situación se caracterizó por la presencia de un potente anticiclón en centroeuropa y una profunda depresión al noroeste de Galicia, que dió fuertes vientos de componente sur sobre el Mediterráneo. El grueso del episodio tuvo lugar cuando éstos viraron hacia el este. Debido a la advección cálida y húmeda, la masa de agua precipitable entre 1000 y 300 hPa llegó a ser del 202% del valor medio en esa época del año, que es el valor más alto registrado hasta este momento, en episodios de inundaciones.

Episodio del 6 al 8 de noviembre de 1983

El episodio se inició al anochecer del día 6 y las zonas afectadas por las lluvias más intensas fueron esencialmente las mismas a lo largo de todo él (fig. 8). En esta ocasión las lluvias se registraron en las laderas meridionales de las cordilleras litoral y prelitoral y, en particular, en Barcelona en donde se alcanzó en el curso de los días 6 a 8 de noviembre una precipitación máxima de 347 mm (la máxima en 24 horas fue de 220 mm). En la provincia de Gerona se superaron los 100 mm en bastantes lugares, alcanzándose los 236 mm en Castellfollit de la Roca (CR). Aunque en Tarragona y Lérida llovió menos, las cantidades fueron en algunos puntos también considerables, como en Riner Xixons (RX) en donde se recogieron 90 mm.

La inestabilidad condicional y convectiva se extendió a casi la totalidad de la troposfera, con ascensos mínimos necesarios para la inestabilización, comprendidos entre 300 y 1500 m. El viento en la baja troposfera era del sureste y del suroeste en la alta, característica ya observada en los episodios anteriores.

INTERPRETACIÓN

En el episodio de 1962, la inestabilidad convectiva por ascensos en bloque muestra como el día 25 bastaba una montaña como el Tibidabo (situada en las afueras de la ciudad de Barcelona a 7,5 km del mar y 414 m de altitud) para producir la inestabilización de la capa más baja de la troposfera e incluso, la propia elevación

Tabla I. Principales avenidas registradas el día 8 de noviembre de 1982.

Table I. Main floods recorded during November 8th, 1982.

Río	Estación	Cuenca (km ²)	Avda.máx. (m ³ /s)
Segre	Puigcerdà	297	600
Segre	Seu d'Urgell	1.233	1.000
Segre	Oliana	2.700	2.000
Noguera-P	Pobla de Segur	1.950	620
Noguera-P.	Camarasa	2.820	1.300
Noguera-R.	Pinyana	1.757	180
Ter	Ripoll	738	1.000
Ter	Sau-Roda	1.523	1.300

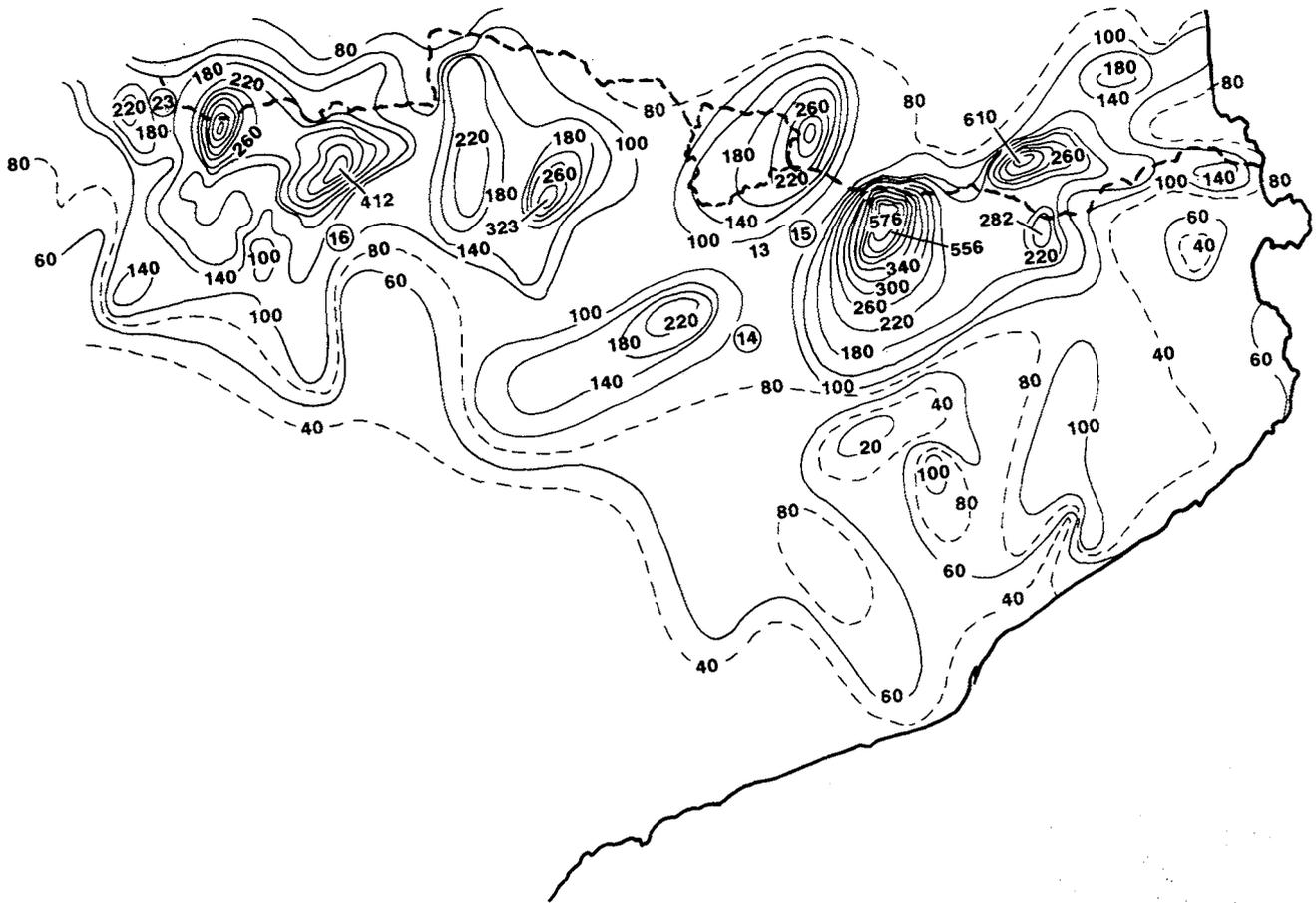


Figura 7.- Configuración de las isoyetas de los días 6 a 8 de noviembre de 1982. El intervalo utilizado es de 40 mm.

Figure 7.- Isohyets of the amount of precipitation recorded from November 6th to 8th, 1982. The interval between them is 40 mm.

debida al paso mar-tierra ya era tal vez suficiente. Por otro lado, se produjo un encauzamiento de la masa de aire a través de las cuencas de los ríos Besós y Llobregat, registrándose las máximas lluvias al pie de las primeras estribaciones montañosas. El hecho de que se tratase de una invasión del este-sureste dio lugar a que apenas se registrasen precipitaciones sobre la costa norte de Gerona, orientada en sentido norte-sur.

En el de 1971, se produjo un intercambio de calor y humedad en el sentido mar-aire, en tanto que en la media y alta troposfera el aire era muy seco. Así, el aire que incidía sobre Cataluña, presentaba una inesta-

bilidad potencial (convectiva y condicional) considerable. Por otro lado, el aire que había sobre la Península y que había sido arrastrado por la gota, era húmedo y frío. Se produjo entonces la interacción de dos masas de aire muy contrastadas, lo que favorecía el ascenso vertical, al que había que sumar el efecto de las cadenas litoral y prelitoral. En este episodio se registró una cierta convergencia en superficie, con vientos de componente este y noreste. La localización del máximo pluviométrico indica una penetración por el valle del Llobregat en tanto que los máximos secundarios se registraron al pie de las sierras de Rodes, Montseny y Montsant.

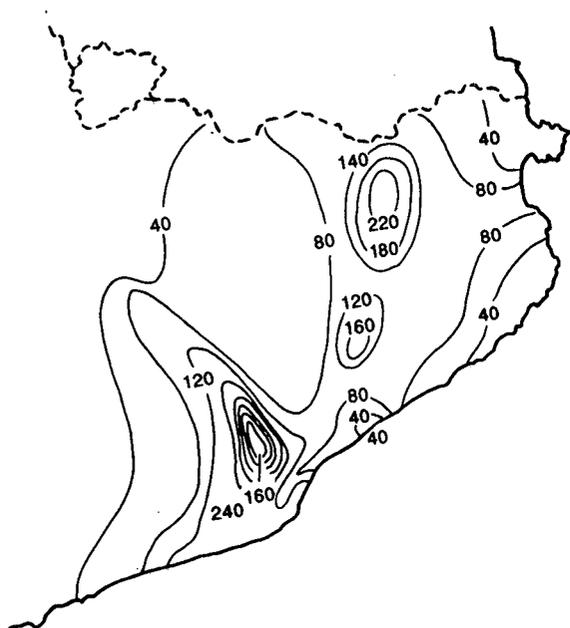


Figura 8.- Configuración de las isoyetas de los días 6 a 8 de noviembre de 1983. El intervalo utilizado es de 40 mm.

Figure 8.- Isohyets of the amount of precipitation recorded from November 6th to 8th 1983. The interval between them is 40 mm.

En cuanto al episodio de 1977, el día 18 el viento era principalmente del este produciéndose una penetración por los Valles del Ter y del Fluvià que explicaría en gran parte las fuertes lluvias registradas en el Ripollés y la comarca del Osona. El día 19 las montañas de la costa bastaron para desarrollar los cumulonimbos y desencadenar las lluvias. El hecho de que en el norte de Cataluña, ese día, la incidencia fuera del sureste, justifica el que apenas lloviese en Port de la Selva, que queda en la parte norte, a sotavento de la sierra de Rodes.

Como ya se ha dicho, en el episodio de 1982 la distribución fue prácticamente la misma a lo largo de todo el episodio y en ella intervinieron como factores favorables para la producción de las lluvias más intensas, la proximidad al mar, la altura de las cimas montañosas y la orientación adecuada de las laderas. Así, dado que el flujo incidente procedía del sureste el ascenso de la masa de aire sería más forzado en las laderas orientadas en dirección suroeste-noreste. Por

otra parte, los ascensos mínimos necesarios para la inestabilización eran superiores a los de los otros episodios, lo que requería alturas superiores a 1000 m. Por último, en su avance hacia el interior, la masa de aire fue descargando parte de su contenido en agua, por lo que, cumpliéndose las condiciones anteriores, una mayor proximidad a la costa intervendría positivamente.

El episodio de 1982 es el más cuantioso registrado en la segunda mitad de siglo, en Cataluña, pero no el de mayor intensidad de lluvia (que sería el de 1962, si bien las intensidades instantáneas extremas se suelen registrar en situaciones de no inundación), lo que podría explicar la ausencia de nuevas cárcavas o abarancamientos en las vertientes, a diferencia de lo ocurrido en los lechos fluviales (Gallart y Clotet Perarnau, 1988).

Por último, en el episodio de 1983, los ascensos mínimos necesarios volvían a ser inferiores a los 1000 m y las principales lluvias se produjeron en las estribaciones de Sant Llorenç del Munt, situado a unos 25 km de la línea de la costa y con una altitud máxima de 1025 m. La incidencia era marcadamente perpendicular a la línea de la costa, y sólo el paso de mar a tierra ya fue suficiente para forzar un ascenso de centenares de metros.

DISCUSIÓN

El análisis de la inestabilidad convectiva a partir de los radiosondeos de Palma, principalmente en episodios posteriores tales como los de 1987 o 1988, corroboran los resultados anteriores. En ambos casos las precipitaciones más importantes se registraron en la zona litoral y en ambos, los ascensos necesarios para la inestabilización de la baja troposfera eran inferiores a 1000 m.

Por otro lado, el importante papel de la incidencia perpendicular a la línea de la costa o a las montañas se encuentra también en los episodios de inundaciones en Levante (fig. 9) o en el ya analizado de 1971, en el que el día 19 se produjeron importantes lluvias en el norte de la Península, donde la gota de aire frío forzaba flujo del norte. También se observa en los de 1982 y 1983 en los que la entrada de aire húmedo y cálido del sur dio lugar a fuertes lluvias en el sur de Andalucía.

La localización geográfica permite que las masas de aire procedentes del Este o del Sureste se abastezcan de vapor de agua en su paso por el Mediterráneo. En algunas ocasiones se produce, además, una bifurcación del chorro subtropical, dirigiéndose su ramal septentrional hacia el sur del Mediterráneo Occiden-

tal. Asimismo, la proximidad del golfo de León favorece la ciclógenésis (Jansà, 1964). Por otra parte, la cadena pirenaica actúa como una barrera que, conjuntamente a una situación de bloqueo fuerza la incidencia de la perturbación una y otra vez sobre el mismo sitio (episodios de 1982 y 1987).

Con respecto a la elevación que el paso mar-tierra pueda forzar (debido a diferencias de temperatura, rugosidad...) varía según las condiciones, pudiendo llegar a ser de unos 300 m. El hecho de que en numerosas ocasiones se registren fuertes lluvias en el delta del Llobregat invita a pensar en el papel que los deltas pueden desempeñar en la precipitación. Así, uno de los lugares de España en donde la relación número de días de tormenta por día de lluvia es mayor, es en el delta del Ebro (Llasat y Puigcerver, 1985).

Los resultados anteriores no explican, sin embargo, la distribución detallada de la lluvia. Hay que tener en cuenta otros factores tales como fuentes de vapor de agua, calor o núcleos de condensación o características topográficas locales.

Ni la orografía ni la localización geográfica son suficientes para justificar este tipo de episodios. Es evidente que es necesario recurrir al estudio de los factores meteorológicos que intervienen así como, en el caso de inundaciones, a los aspectos hidrológicos.

CONCLUSIONES

Atendiendo a que generalmente los episodios de inundación en Cataluña se producen por invasión de aire mediterráneo procedente del sur, el uso de los radiosondeos de Palma permite conocer, entre otras cosas, la existencia y extensión vertical de la inestabilidad convectiva. Según el valor de los ascensos mínimos necesarios para la inestabilización, las lluvias más intensas tendrán lugar en el litoral (alturas inferiores a 600 m) o en las zonas prepirenaicas y pirenaicas (alturas superiores a 1000 m). En todos los casos es necesario que tal inestabilidad se extienda a gran parte de la troposfera baja y media.

Dado que en estas situaciones el Mediterráneo queda al borde de un anticiclón (por tanto hay inversión de subsidencia) y que, en general, se produce una invasión de aire muy cálido (permite evaporar más agua), se acumulan grandes cantidades de vapor de agua que suelen permanecer almacenadas hasta su llegada a la costa.

La incidencia sobre Cataluña, en la baja troposfera, suele ser del sureste, es decir, perpendicularmente a la costa y a la cadena litoral, lo que favorece el desarrollo

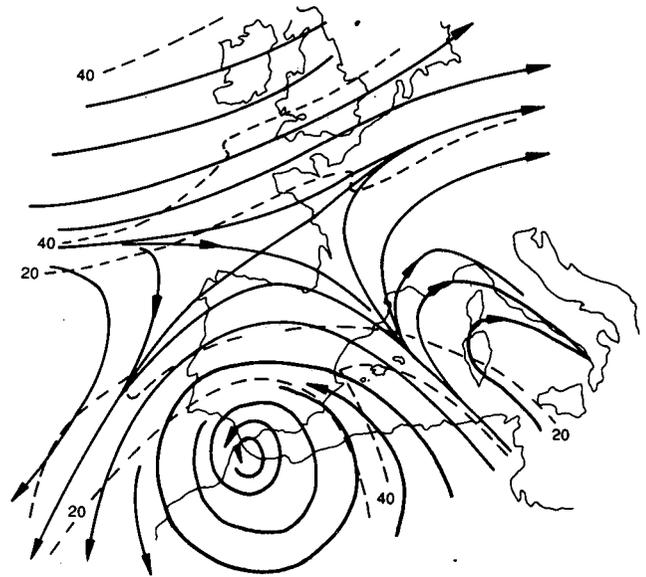


Figura 9.- Configuración de las líneas de corriente e isotacas a las 00 UTC del día 19 de octubre de 1982, en el que se produjeron inundaciones en Levante. Obsérvese la lengua de aire húmedo y cálido que incide perpendicularmente a la costa, a 850 hPa.

Figure 9.- Stream lines and isotachs at 00 UTC on October 19th 1982 during which floods in the Levant took place. Notice the warm moist air flow which impinges at right angles upon the coastline and coastal mountain ranges, at 850 hPa.

de las nubes. En el caso de que la componente sea más del este o más del sur se refleja en la distribución de los máximos, si bien hay que tener siempre en cuenta el efecto local (orientación de la montaña más próxima,...). Por ejemplo, los episodios del este afectan más al norte de la región, orientada en sentido norte-sur.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a los Centros Meteorológicos Zonales de Barcelona y Palma de Mallorca, así como a M. Boutin, Director del Centro Meteorológico de Perpignan y al Dr. Clemente Ramis, por toda la información proporcionada sobre los diversos episodios. También quiero expresar mi gratitud a la Dra. N. Clotet Perarnau y al Dr. F. Gallart por la revisión y comentarios realizados sobre el presente artículo. Mi especial agradecimiento al Dr. M. Puigcerver, que fue catedrático de Física del Aire hasta 1988, por la dirección de mi tesis y por la cuidadosa corrección de las líneas de corriente.

BIBLIOGRAFÍA

- ALBENTOSA, L., 1983: Las lluvias excepcionales en Cataluña en noviembre de 1982. *Estudios Geográficos*, 44: 227-273.
- CAILLEAU, C. Y SANTURETTE, P., 1983: *Têmpete des 6, 7 et 8 Novembre 1982*. Note de Travail du Service Météorologique Métropolitain, n.10. Ministère des Transports. Direction de la Météorologie.
- FONT, I., 1983: Algunas observaciones sobre las lluvias excepcionales en la vertiente mediterránea española. *Estudios Geográficos*, 44: 55-59.
- GALLART, F. Y CLOTET PERARNAU, N., 1988: Some Aspects of the Geomorphic Processes Triggered by an Extreme Rainfall Event: the November 1982 Flood in the Eastern Pyrenees. *Catena*, 13: 79-95.
- GARCÍA, V. Y CARRASCO, A., 1958: *Lluvias de intensidad y extensión extraordinaria causantes de las inundaciones de los días 13 y 14 de octubre de 1957 en las provincias de Valencia, Castellón y Alicante*. S.M.N. Serie A n. 30, 67 pp.
- GARCÍA, F., FONT, R. Y RIVERA, A., 1982: *Situación atmosférica causante de las lluvias torrenciales durante los días 19 al 21 de octubre de 1982 en el Levante Español*. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 88 pp.
- LÓPEZ BUSTOS, A., 1964: Resúmenes y conclusiones de los estudios sobre avenidas del Vallés en 1962. *Estudios Hidrográficos*, 44: 11-29.
- LLASAT, M.C. Y PUIGSERVER, M., 1985: Un intento de aplicación a la Península de un modelo empírico de precipitación. *Rev. de Geofísica*, 41: 135-144.
- LLASAT, M.C., 1987: *Episodios de lluvias copiosas en Cataluña: génesis, evolución y factores coadyuvantes*. Publicacions de la Universitat de Barcelona, n. 40, 543 pp.
- LLASAT, M.C., 1989: Episodios de lluvias fuertes en Cataluña: Aspectos sinópticos. *En Aspectos estadísticos y sinópticos de las precipitaciones intensas en Cataluña*, Memorias de la Real Academia de Ciencias y Artes de Barcelona, 7, pp. 239-261.
- NOVOA, M., 1981: *Precipitaciones extremas en la cuenca del Pirineo Oriental. Causas, efectos y previsión*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Dir. Gral. de Obras Hidráulicas. Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental, 149 pp.
- NOVOA, M., 1985: Las Avenidas en Cataluña. *Tecnología del Agua*, V (19): 43-47.
- PUIGDEFABREGAS, C., 1983: *Efectes geomorfològics dels aiguats del Novembre de 1982*. Publicacions del Servei Geològic de Catalunya. Generalitat de Catalunya. Informe 1, 237 pp.

Recibido, septiembre 1989