LOS CICLONES MEDITERRANEOS Y SUS IMPACTOS EN ESPAÑA

Agustín JANSÀ CLAR
Dr. en Ciencias Físicas, Meteorólogo del Estado jubilado
agustí.jansa@gmail.com

NOTA PRELIMINAR: El presente artículo es una versión adaptada –con más contenido gráfico– del trabajo original del autor, incluido como uno de los capítulos de la obra colectiva: Fenómenos meteorológicos adversos en España. *Carlos García-Legaz y Francisco Valero (eds.). Consorcio de Compensación de Seguros (2013).*

RESUMEN

El Mediterráneo es una zona con alta frecuencia de ciclones, muchos de ellos autóctonos. La frecuencia es especialmente importante cuando se incluyen hasta los más pequeños y débiles ciclones. En la primera parte de este capítulo se caracterizan los ciclones mediterráneos, atendiendo a su frecuencia, localización, tipología, espesor e intensidad, prestándose especial atención a la zona mediterránea españolao cercana a España. En la segunda parte se revisan los posibles impactos de estos ciclones sobre el tiempo en España, con especial atención al tiempo adverso, como lluvias fuertes y vientos fuertes. El capítulo termina con unas breves conclusiones. Aunque los ciclones más intensos casi siempre producen impactos importantes, algunos de los impactos más críticos, como algunas lluvias intensas, no son proporcionales a la intensidad de los ciclones, sino que a veces están inclusoasociados a ciclones débiles.

Palabras clave
Ciclones, depresiones, Mediterráneo, tiempo de alto impacto, lluvia intensa, vientofuerte.

ABSTRACT

The Mediterranean region is an area with high frequency of cyclones, many of them native in the same region. The frequency is especially important if small and weak cyclones are also included. In the first part of this chapter the Mediterranean cyclones are characterised, taking into account the frequency, location, typology, thickness and intensity, with especial attention to the Spanish zone or near it. The second part is devoted to review possible impacts of the cyclones on Spain, with especial attention to high impact weather, namely heavy rain or strong wind. The chapter ends with some brief conclusions. Although the most intense cyclones almost always produce high impact, some of the most critical impacts, like some of theheavy rain events, are not proportional to the intensity of the cyclones, but sometimes are associated even to weak cyclones.

Key words
Cyclones, depressions, Mediterranean, high impact weather, heavy rain, strong wind.

1. CICLONES MEDITERRANEOS: FRECUENCIA, CARACTERIZACION, TIPOLOGÍA

Aclaremos que en este capítulo el término ciclón se toma como equivalente a centro de circulación ciclónica, depresión o centro de baja presión, con independencia de que se trate de perturbaciones débiles o fuertes, pequeñas o grandes, superficiales oprofundas.

1.1. Frecuencia

Lo primero que cabe preguntarse es si son muchos o pocos los ciclones que se forman o aparecen en el Mediterráneo y cómo son. La primera es una pregunta sin respuesta absoluta, ya que la frecuencia depende de cómo definamos los ciclones,de la técnica de detección, del tipo de análisis meteorológico considerado, etc.

Cuando se utilizan análisis subjetivos o manuales es frecuente definir como ciclón toda zona de presión baja en la que se ha podido dibujar una isobara cerrada. El número de ciclones así definidos es función de la escala del mapa usado y del espaciado entre isobaras adoptado. Un mapa de escala grande, con espaciadoamplio entre isobaras, da menos detalle y permite detectar menos ciclones que un mapa de escala pequeña, con un espaciado menor.

Un estudio clásico, basado en análisis subjetivos, y referido a todo el Hemisferio Norte, es el de Petterssen (1956). El detalle de los mapas usados es muy poco, de modo que el número de ciclones detectados es pequeño, pero es destacable que el Mediterráneo occidental aparece como la región más ciclogenética del Hemisferio, en invierno.

FIG. 13.6.2. Percentage frequency of cyclone centers in squares 100,000 km² in winter (1899 to 1939).

Radinovic y Lalic (1959), considerando un área que cubre gran parte del Mediterráneo occidental, contabilizaron 40 ciclones (de escala sinóptica) al año, la mayoría de formación autóctona (74%) y algunos con una duración en el área demás de un día. Radinovic (1965) refinó el recuento, usando mapas más detallados, y desplazó el área objeto de estudio más al este, centrándola en la antigua Yugoslavia,encontrando 116 presencias ciclónicas al año, usando cuatro mapas al día.

Fig. 4.3.3 Number of cyclone centres observed at synoptic hours (in six hours intervals) during the period 1951-1960 (Radinović, 1965b).

No son muy incongruentes las cifras que publica la obra clásica del Meteorological Office británico (H.M.S.O., 1962) sobre el Mediterráneo. En ella se indica la presenciade 60 ciclones al año en el Mediterráneo occidental, 51 en el central y 28 en el oriental, además de 14 en el norte de África. En Radinovic (1987) pueden encontrarse más detalles y referencias a otros estudios estadísticos.

Las cifras de presencia ciclónica se multiplican si refinamos la escala espacio-temporal, sin salirnos del método subjetivo y de los análisis manuales. Radinovic (1978), usando mapas de escala 1:5.000.000 y un espaciado entre isobaras de 2 hPa, con análisis cada tres horas, encontró más de 2.000 centros ciclónicos en un área bastante reducida. Con la misma escala de mapa y el mismo espaciado entreisobaras, pero con dos mapas al día y un área muy distinta, la ibérico-mediterránea, Genovés y Jansà (1989) encontraron 511 centros ciclónicos en un año, aceptando como ciclones incluso algunas configuraciones sin isobara central cerrada.

Fig. 4.4.1 Frequency distribution of low pressure mesosystems in considered area in 1975. (Radinović, 1978).

Al pasar de los análisis manuales a los objetivos, basados en modelos numéricos de predicción, la ambigüedad no se supera. El número de ciclones encontrados en cada análisis depende del método objetivo de detección que se establezca, con loscondicionantes que se consideren, y de la resolución espacial del propio análisis.

Alpert et al. (1990) realizaron el primero estudio de frecuencia y caracterización de los ciclones mediterráneos con base objetiva. En principio se definía como centro ciclónico cualquier mínimo en el campo de geopotencial a 1000 hPa, por débil que fuera. A pesar de que la baja resolución de los análisis usados (equivalente a 2,5º X 2,5º de latitud-longitud, unos 250 km kilómetros de rejilla) el número de centros ciclónicos encontrado resultó muy elevado, 14 por análisis, si bien hay que decir que el área considerada era muy extensa, mucho más que el puro Mediterráneo. Al exigirun gradiente de presión mínimo alrededor del centro de 0,5 hPa/500 km el número de centros ciclónicos se reduce, sobre todo en verano y de noche.

Aunque bastantes estudios posteriores, referidos al Mediterráneo, usando análisis objetivos, han identificado los ciclones como mínimos de presión o de geopotencial (por ejemplo Trigo et al., 1999; Maheras et al., 2001; Picornell et al., 2001 o Campins et al., 2011), en algún otro caso (como Flocas et al., 2001, siguiendo a Sinclair, 1997) los ciclones se han definido como máximos de vorticidad (o de circulación ciclónica).

La resolución del análisis, incluyendo su posible suavizado, y la existencia de condicionantes restrictivos afecta mucho al número de ciclones o centros ciclónicos detectados. En Picornell et al. (2001), con referencia sólo al Mediterráneo occidental, se utilizaron análisis objetivos del sistema HIRLAM, con una resolución de 0,5º X 0,5º de latitud-longitud, unos 50 km de rejilla. Esta resolución es mucho más alta que la usada por Alpert et al. (1990), por lo que cabría esperar muchos más ciclones por unidad de área, pero se impuso una restricción relativamente fuerte, descartándose los centros ciclónicos que no tuvieran gradientes de presión de al menos 0,5 hPa/100 km, en al menos seis direcciones alrededor del centro. En esas condiciones, en el Mediterráneo occidental, con cuatro análisis al día, se detectan algo más de 2000 centros ciclónicos al año, lo que corresponde a unos 1000 ciclones individuales, con una duración media de unas 12 horas. Estos números están bastante de acuerdo con lo que se obtiene a partir de análisis subjetivos mesoescalares (Radinovic, 1978; Genovés y Jansà, 1989; Campins et al., 2000).

Figure 4. Mean number of cyclones per year (contours every 10) for (a) winter, (b) spring, (c) summer and (d) autumn. The values were counted in 2° × 2° squares and interpolated with the kriging method

En una serie de estudios realizados en el marco MEDEX (http://medex.aemet.uib.es),se decidió suavizar los campos de presión a nivel del mar, mediante un filtro de Cressman de 200 km (Cressman, 1959), antes de realizar la detección y descripción de los ciclones, a fin de obtener campos derivados más tratables que usando camposoriginales. Pero ello produce un importante efecto sobre el recuento de ciclones. En un muestreo realizado por Gil et al. (2003) (Ver figura

siguiente), usando análisis operativos sin suavizar del Centro Europeo de Predicciones a Plazo Medio (CEPMPM), resulta que se encuentran 2910 centros ciclónicos por año en el Mediterráneo occidental, con cuatro mapas diarios, lo que es relativamente congruente con los resultados anteriores más detallados, pero, si se utilizan campos suavizados por filtrado, el número de centros ciclónicos se reduce drásticamente, hasta 437 por año. Hay que suponer que el filtrado elimina sólo ciclones pequeños y/o débiles.

Número de ciclones detectados por año, a partir de análisis del CEPMPM, suavizados (izquierda) y no suavizados (derecha) (Según Gil et al., 2003)

Considerando un área extensa, todo el Mediterráneo y alrededores, aun usando una resolución relativamente baja (unos 125 km) y campos suavizados, el estudio de Campins et. al. (2011), basado en los reanálisis ERA-40 (Uppala et al., 2004), todavía localiza más de 1800 centros ciclónicos por año, lo que corresponde a cerca de 800 ciclones individuales, al tener éstos una vida media algo superior a 12 horas.

CLIMATOLOGY OF MEDITERRANEAN CYCLONES USING THE ERA-40

Figure 2. Mean number of cyclone centres in 2.25° × 2.25° latitude–longitude boxes. Contour intervals: 5, 10, 20, 40 and 60 centres/year.

J. CAMPINS *et al.*

Figure 6. Seasonal mean number of cyclone centres in 2.25° × 2.25° latitude–longitude boxes, for (a) summer, (b) autumn, (c) winter and (d) spring. Contour intervals: 2.5, 5, 10, 20 and 40 centres per season.

En definitiva, según la resolución, escala o detalle de los análisis de partida y según las restricciones que se impongan en la definición de ciclón, en el Mediterráneo entero e incluso en el Mediterráneo occidental hablaremos de decenas, centenares o incluso de miles de apariciones ciclónicas o centros ciclónicos al año. Naturalmente, no todos los ciclones detectables son iguales, ni en cuanto a estructura, ni en cuanto a origen, ni en cuanto a intensidad o tamaño.

1.2. Caracterización y tipología

Si consideramos todos los ciclones mediterráneos detectables, que pueden ser incluso miles en un año, no es de esperar que todos sean borrascas típicas de lazona templada, asociadas a ascendencia y mal tiempo general, ni mucho menos. La mayoría de los centros ciclónicos mediterráneos son pequeñas o débiles perturbaciones superficiales de presión, sin desarrollo vertical.

En la figura de la página 7 y en los diversos estudios climatológicos ya citados, llama la atenciónla alta concentración de centros ciclónicos en ciertas áreas. También llama la atención que la desaparición de centros por suavización (filtrado) es especialmente sensible en áreas concretas. Todo ello sugiere que los factores geográficos (orografía y distribución de tierra y mar) juegan un papel muy relevante en la génesis y mantenimiento de los centros ciclónicos mediterráneos.

De hecho, la singularidad geográfica del Mediterráneo –un mar cerrado, rodeado en gran parte de altas montañas- es seguramente la clave de la alta concentración de centros ciclónicos que presenta la zona, en general, y que presentan determinadas áreas de la zona, en particular.

Concretando, el área del golfo de Génova, al sur de los Alpes, es la de mayor concentración de ciclones y ciclogénesis del Mediterráneo, al menos cuando se usan mapas suavizados o de poco detalle. Es a las perturbaciones en esa zona a las que se asocia el máximo hemisférico detectado por Petterssen (1956). La zona sigue presentando una alta frecuencia relativa de ciclones incluso usando los análisis más detallados, si bien otras zonas ganan frecuencia relativa al detallar.

Tanta significación tiene la elevada concentración de perturbaciones ciclónicas en el golfo de Génova e inmediaciones que se han llegado a tomar como casi equivalentes los conceptos de "ciclón mediterráneo" y "ciclón de Génova o alpino", pensando, sobre todo, en ciclones relativamente grandes. El factor orográfico para ese tipo de ciclones ha sido repetidamente evidenciado. Estudios clásicos en este sentido son los de Radinovic (1965) y Buzzi y Tibaldi (1978). Radinovic (1987), por su parte,considera necesario hablar en el Mediterráneo de un tipo ciclónico C (orográfico), junto a los tipos ciclónicos A y B de Petterssen y Smebye (1971). El factor orográfico es relevante para los ciclones de Génova, pero ello no excluye que los frentes o las perturbaciones de niveles superiores jueguen un papel clave, en particular en aquellos ciclones de Génova que llegan a ser algo más que perturbaciones de pequeña escala.

Al aumentar la capacidad de detección aparece un segundo máximo de frecuencia, con una magnitud incluso comparable a la del máximo de Génova. Es el máximo de Chipre, en el Mediterráneo oriental. Aunque los ciclones potentes pueden frecuentar el área, Alpert et al. (1990) destacan que ese máximo es más destacado en verano y de noche. El porcentaje de ciclones de Chipre que desaparecen al suavizar los mapases muy elevado, como puede verse en la figura de la página 7. De ambas cosas se deduce que muchas de esas depresiones son suaves y de tipo térmico, asociadas a un mar relativamente cálido. De hecho, la singularidad térmica, concretamente cálida, aparece en el Mediterráneo como la segunda causa asociada a la presencia de centros ciclónicos, junto a la orografía.

En el Mediterráneo occidental más próximo a España, dejando aparte la zona de Génova, se observan máximos de frecuencia importantes, especialmente en losmapas de mayor detalle, sin suavizado. Por ejemplo, el sur del Pirineo presenta un máximo destacado (ver figura de la pág. 7, derecha, según Gil et al., 2002, además de Genovés y Jansà, 1989; Campins et al., 2000; Picornell et al., 2001). Otras zonas conacumulaciones significativas de centros ciclónicos son el

interior de la Península y las zonas marítimas situadas entre la costa africana y la Península, Argelia, Alborán, Palos. El Mar Balear, la costa levantina y catalana y el golfo de León presentan una frecuencia de depresiones menor que las otras áreas citadas, pero no despreciable.

La gran mayoría de las perturbaciones ciclónicas situadas al sur de los Pirineos sonde tipo orográfico, superficiales, y suficientemente poco importantes como para desaparecer con el suavizado o la pérdida de resolución. Este tipo de perturbación, asociada a flujo general de componente norte a través del Pirineo, es orográfica, de sotavento, correspondiendo a la parte negativa del "dipolo" orográfico de presión asociado al rozamiento global de la cordillera. Está incluida una componente térmica importante, con aire frío a barlovento y aire cálido a sotavento (Bessemoulin et al., 1993).

Aparte de las de Pirineos, muchas otras depresiones mediterráneas de escala relativamente pequeña, incluyendo bastantes de las localizadas en las zonas marítimas de Argelia, Alborán o Palos, así como algunas situadas en las costas levantina o catalana, son también bajas orográficas de sotavento, al menos en una fase inicial (Genovés et al., 1997; Campins et al., 2000). Es posible, no obstante, queen bastantes de las bajas de Argelia-Alborán-Palos el factor puramente térmico (la existencia de un núcleo cálido, por advección o diferenciación tierra-mar) sea determinante o importante.

Los centros ciclónicos que sin duda tienen carácter térmico, salvo excepciones, son los situados en el interior de la Península Ibérica. Su gran estacionalidad, con un acentuado máximo en verano y más concretamente a primera hora de la tarde, lo corrobora (Hoinka y Castro, 2003; Campins et al., 2000; Picornell et al., 2001; Campins et al., 2006a; Campins et al., 2011).

1.3. Espesor e intensidad

Una manera simple de discriminar entre los centros ciclónicos, tratando de identificar los que podrían fácilmente ser consideradas borrascas típicas de zona templada, es atender a su espesor. De una borrasca típica, asociada a ascendencia generalizada y "mal tiempo", podríamos esperar que fuese profunda, con un gran espesor vertical, alcanzando la circulación ciclónica los límites de la tropopausa.

En los trabajos realizados en el marco MEDEX, encaminados a construir catálogos de ciclones (http://medex.aemet.uib.es), se incluyó la estructura vertical de los centros ciclónicos detectados. Una vez detectado un centro ciclónico en superficie, se buscaba su posible presencia (y descripción) en niveles progresivamente superiores. El último nivel al que se identificaba un mínimo de geopotencial o un máximo de vorticidad determinaba el espesor vertical del centro ciclónico. Así tendríamos ciclones superficiales (detectados hasta 850 hPa, pero no más arriba), ciclones profundos (alcanzando los 300 hPa) o ciclones intermedios (los restantes).

Aun considerando sólo los centros ciclónicos detectables con análisis suavizados, es decir, una vez eliminados los más pequeños o débiles, una gran parte de los que quedan son superficiales, concretamente el 51%, según Campins et al. (2006a), o el 42%, según Campins et al. (2011).

Siguiendo a Campins et al. (2011), muchos de los centros superficiales son térmicos u orográficos con fuerte componente térmica, como lo sugiere el hecho de que su porcentaje es mucho mayor en verano (62% de todos los centros) que en invierno (26%), mientras el porcentaje de centros profundos es mayor en invierno (55%) queen verano (21%).

Hay notables diferencias de espesor según la zona. Los centros de Génova einmediaciones son

superficiales sólo en un 27% y profundos en un 55%. En cambio, los del interior de la Península Ibérica son superficiales en un 59% y profundos en un27% y los de Argelia-Alborán-Palos son superficiales en un 52% y profundos en un 33%. (Campins et al., 2011).

Figure 4. Total number of cyclone centres for (a) all the database, (b) shallow, (c) middle-depth and (d) deep ones. Contour interval 50 cyclone centres (25 for middle-depth centres)

Un detalle importante (Campins et al., 2011) es que, considerando ciclones de duración superior a 6 horas, el porcentaje de los que son profundos aumenta con la madurez del ciclón: es menor en la fase inicial que en la fase madura. Ello viene a corroborar la idea de que parte, al menos, de los ciclones mediterráneos más significativos son el resultado del acoplamiento entre un germen superficial, orográfico o térmico, de escala relativamente pequeña, y una perturbación macroescalar de niveles atmosféricos altos. La geografía peculiar del Mediterráneo permitiría la generación de muchos gérmenes ciclónicos, algunos de los cuales acabarían en ciclones bien desarrollados (Genovés y Jansà, 1991; Jansà, 1997). Aparte de ello, en algunos de los ciclones más desarrollados habría también una significativa contribución de los factores diabáticos, en particular, la liberación de calor latente (Homar et al., 2002, o Genovés y Jansà, 2003, por ejemplo).

La intensidad o importancia de los ciclones puede ser muy relevante, pensando en los ciclones mismos y en sus impactos. Hay diversas opciones para definir la intensidad o importancia de un ciclón, como la presión en el centro o el gradiente de presión, la laplaciana de la presión o la vorticidad en torno a ese centro. Para construir bases de datos de ciclones en el marco MEDEX (http://medex.aemet.uib.es) se adoptó la opción de Sinclair (1997), tomando la circulación geostrófica total (CG) como intensidad o importancia del ciclón. La CG es la vorticidad integrada para todo el dominio ciclónico, es decir, para toda el área con vorticidad positiva (o circulación ciclónica). A igualdad de tamaño de ciclón, la intensidad será mayor

cuanta más vorticidad haya, lo que también supone más gradiente de presión. Pero a igualdad de vorticidad o gradiente los ciclones mayores se considerarán más intensos o importantes y vice-versa. Una unidad práctica de intensidad o circulación geostrófica total es 1 UCG = 10^7 m^2 s^{-1}.

Clasificar los ciclones como débiles, moderados o intensos en función del valor de la CG es subjetivo, sin duda, pero parece razonable llamar débiles a los ciclones de menos de 2 UCG e intensos a los de 6 o más UCG (Picornell et al., 2001). En Campins et al. (2006a), Campins et al. (2011) u Homar et al. (2007) se reserva el calificativo de intensos para los ciclones con 7 o más UCG.

Son muchos los ciclones débiles que se detectan cuando se usan análisis de resolución relativamente alta y sin suavizar (filtrar). Para Picornell et al. (2001), dónde se usa una base de datos no suavizada, son débiles el 53% de los ciclones. Con el suavizado la frecuencia de ciclones débiles baja al 16% (Campins et al., 2006a), llegando a sólo el 8% cuando también se reduce la resolución (Campins et al., 2011). Como era de esperar, muchos de los ciclones más débiles desaparecen al relajar la resolución de los análisis y al suavizar.

Los ciclones intensos son siempre escasos, concretamente, el 6,3% de todos los ciclones en Campins et al. (2011); si nos restringimos a los que, además de ser intensos, duran 24 horas o más viene a haber unos 30 al año en todo el Mediterráneo (Homar et al., 2007). La distribución puede verse en la siguiente figura.

Distribución de ciclones intensos, con 24 horas de duración o más, en el momento de mayor intensidad. Se representa en número de ciclones durante el periodo 1957-2002, ERA-40, en retículosde 2,25º X 2,25º lat/lon (De Homar et al., 2007)

El proceso de maduración de los ciclones, normalmente con descenso de presión y aumento de tamaño, requiere tiempo y espacio, de modo que los ciclones intensos tienden a aparecer separados, hacia mar abierto, de las zonas de generación en el momento de mayor intensidad. Los ciclones nacidos en Génova son los que dan lugar a ciclones intensos con mayor frecuencia, pero esos ciclones intensos, en el momento de más intensidad, están desplazados

“aguas abajo” de la zona de generación, en pleno Tirreno o en pleno Adriático. En esos lugares es donde aparecen los máximos de frecuencia de ciclones intensos, como se ve en la figura de la página anterior.

En el interior de África hay otro importante máximo de ciclones intensos, que es explicable por la gran extensión de los ciclones de sotavento y térmicos allí generados. En el Mediterráneo central y oriental hay máximos secundarios significativos. El Mediterráneo más occidental, más cercano a la Península Ibérica, muestra escasa frecuencia de ciclones intensos, aunque se insinúa un máximosecundario hacia Baleares. En esa zona tenemos alrededor de tres ciclones intensos y duraderos al año, en promedio (Homar et al., 2007).

El carácter plenamente marítimo, buscando amplias áreas, se acentúa si nos fijamos en los ciclones extremos, de intensidad excepcional (Genovés et al., 2006). A partir de análisis ERA-40 suavizados, los seis ciclones más intensos del periodo 1957-2002 se han visto centrados en el Tirreno y en el Mediterráneo central. El séptimo, todavía con más de 12 UCG, estuvo centrado en Illes Balears en su momento más maduro.

Fig. 1. Tracks of all the cases from their first detection until their respective maximum developments. The circumferences are proportional to circulation, according to Table 1.

Podemos terminar este apartado diciendo que, en general, los ciclones superficiales son más

pequeños y menos intensos que los ciclones profundos (Campins et al., 2006a).

2. IMPACTOS

En la España influenciada por el Mediterráneo no son raros los fenómenos meteorológicos de alto impacto social, como lluvias fuertes o vientos fuertes. Una muestra de episodios de este tipo, para un periodo de diez años, puede verse en la base de datos de MEDEX (http://medex.aemet.uib.es). No se pretende dar aquí una climatología específica de ese tipo de fenómenos. Lo que se intenta es relacionarlos con los ciclones o centros ciclónicos mediterráneos. Se puede anticipar que no hay una proporcionalidad pura y universal entre la intensidad de un ciclón y la violencia de los fenómenos meteorológicos que se le asocian, aunque parece obvio que los ciclones más intensos tienen que tener efectos significativos.

2.1. Impacto de los ciclones intensos

Los ciclones extratropicales intensos y profundos combinan una fuerte divergencia en niveles atmosféricos altos, con una fuerte convergencia en niveles bajos, dando lugar a ascendencia vigorosa del aire, de modo que se forman lluvias importantes. La presión baja en el centro, por otro lado, junto con el fuerte gradiente de presión asociado, suponen vientos fuertes. Los ciclones extratropicales intensos y profundos producen, por tanto, temporales combinados significativos de viento y lluvia.

Es paradigmático el temporal mediterráneo de 10-11 de noviembre de 2001. Está asociado al séptimo ciclón más intenso de todo el Mediterráneo, en todo el periodo ERA-40 (1957-2002), y es el más intenso de todos los detectados en el Mediterráneo más occidental, cercano a España (Genovés et al., 2006). Las lluvias fueron muy copiosas, provocando inundaciones y cientos de muertes en Argel (Hamadache et al., 2003), y cantidades de más de 250 mm en Mallorca; esas

lluvias son efecto, pero también causa coadyuvante del gran desarrollo de la perturbación (Genovés y Jansà, 2003). El viento en tierra superó los 150 km/h, afectando los vientos muy fuertes a una gran extensión marina, lo que provocó olas (analizadas) de hasta once metrosde altura significativa. En Illes Balears, la combinación de viento fuerte y lluvia fuerteprovocó la caída de centenares de miles de árboles. Este temporal se generó en el norte de África, avanzando sobre el Mediterráneo. Análogamente ocurrió con el también muy intenso temporal de 22 de diciembre de 1979, cuya intensidad, aunquealgo inferior a la del de noviembre de 2001, superó también las 12 UCG.

Aunque no son muy frecuentes y tienden a tener carácter marítimo (como indica la figura 2), los temporales combinados de viento y lluvia asociados a ciclones mediterráneos intensos pueden afectar a tierras mediterráneas españolas, en particular Illes Balears, Cataluña y Comunidad Valenciana, incluso varias veces al año,al menos en las zonas más costeras.

La intensidad definida por la CG tal vez no siempre sea la mejor magnitud para medir el daño potencial de una perturbación ciclónica. Una de las alternativas es usar la presión en el centro del ciclón como indicador de la intensidad. Considerando como muy importantes los ciclones con menos de 990 hPa en el centro, con análisis ERA-40 suavizados, entre 1957 y 2002, en la zona más occidental del Mediterráneo aparecen 37 casos, la mayoría en mar (http://medex.aemet.uib.es). Es razonableque esos ciclones tengan un impacto potencial fuerte sobre tierras españolas. En particular, de la serie indicada, la presión más baja corresponde al ciclón de 1 de diciembre de 1959, con 975 hPa. “La Vanguardia” de Barcelona de día 2 le dedica lassiguientes palabras: “Furioso temporal de lluvia, viento y nieve en la noche del lunes

al martes. Son importantes los daños registrados en todo el país a consecuencia del huracán, que en algunos lugares fue de 140 km". El segundo ciclón en el ranking depresiones bajas fue el de 30 de enero de 1986, con 980 hPa y una nevada paralizante en Cataluña (Jansà y Vázquez, 1991). Los dos ciclones anteriormente citados presentan CG altas, particularmente el primero (11,51 UCG y 7,78 UCG, respectivamente), pero no son las máximas en la zona. Por el contrario, el gran temporal de noviembre de 2001, con la máxima CG en el Mediterráneo más occidental, muestra una presión central baja, de 993,6 hPa, pero no extrema. En el temporal de diciembre de 1979, coincide que, además de ser uno de los de mayor CG en el Mediterráneo más occidental, es también uno de los de presión central más baja, con 985 hPa.

Los análisis de baja resolución (incluyendo aquí los de 50 km de rejilla), sobre todo si están suavizados por filtrado, es normal que sobreestimen la presión central, en particular cuando el tamaño del ciclón es pequeño. Los "medicanes" (a los cuales se dedica un capítulo específico en este libro), son un caso particular. Por ejemplo, el medicane que el 12 de septiembre de 1996 pasó sobre Mallorca con una presión central de unos 992 hPa (Gili et al., 1997), fue detectado por ERA-40 y HIRLAM-INM suavizados, pero con presiones centrales de sólo 1002 y 1000 hPa, respectivamente. Existen otros ciclones mediterráneos pequeños e intensos, que no son medicanes; por ejemplo en 2010 se detectaron tres de ellos con menos de 990 hPa, en las inmediaciones de Balears, produciendo lluvia intensa y/o viento fuerte (Jansà et al., 2011). Todavía sabemos poco sobre la frecuencia y distribución de los ciclones pequeños intensos, pero los análisis actuales, con resoluciones de pocos kilómetros y técnica mejorada, sin duda aportarán información próximamente. En cualquier caso, hay que suponer que los medicanes y demás ciclones pequeños intensos aumentan la incidencia de los temporales combinados de lluvia y viento respecto de lo que seha dicho en los párrafos anteriores.

2.2. Ciclones y lluvias fuertes

Hay diversos mecanismos para generar lluvias fuertes, que no son necesariamente excluyentes; desde intensas tormentas aisladas, generadas localmente y asociadas a gran inestabilidad, hasta grandes sistemas convectivos de mesoscala, fijados por circulaciones apropiadas en niveles altos y bajos (Doswell, 1982; Doswell et al., 1996; Rivera y Riosalido, 1986; Riosalido, 1997; Romero et al., 2000; etc.). Un ingrediente interesante para que la lluvia totalice grandes cantidades de agua en relativamente poco tiempo es una corriente sostenida de bajo nivel, cálida y húmeda, desestabilizadora y alimentadora. La masa de aire mediterránea, relativamente cálida y húmeda, sobre todo en otoño, puede proporcionar la materia prima necesaria para esa corriente. La presencia de una depresión en la zona, por otra parte, puede organizarla y ponerla en marcha. Una convergencia al final de esa corriente, con aire frío encima, completa un modelo conceptual que podría ser, en principio, descriptivo de muchos casos de lluvia fuerte mediterránea (siguiente figura, Jansà, 1997).

Arriba: Modelo conceptual de lluvia fuerte organizada un por ciclón (izquierda) (Jansà, 1997). Presión a nivel del mar el 10 de junio de 2000, a 06 UTC, con inundaciones en Montserrat, Cataluña (derecha) (http://medex.aemet.uib.es). Abajo: Experimento numérico relativo a la lluvia récord del sur de Valencia de 3-4 de noviembre de 1987, con más de 800 mm en 24 h. En la pasada de control (izquierda) un centro ciclónico en Palos-Alborán- Argelia crea y orienta un flujo de aire muy definido contra la zona de lluvia fuerte; al rebajar la orografía (hasta el 30%) el ciclón casi desaparece y el flujo mediterráneo pierde organización (derecha) (De Jansà et al., 1991)

Parece fácil identificar ese modelo conceptual en numerosos casos particulares de sistema convectivo o lluvia fuerte en todo el Mediterráneo occidental (Jansà et al., 1991; Jansà et al., 1996).

En Jansà et al. (2001) se ha intentado un chequeo sistemático y estadístico del modelo conceptual citado. Tomando 60 mm/día como umbral de lluvia fuerte, se hananalizado todos los casos observados en el periodo 1992-1996 en gran parte del Mediterráneo occidental, incluyendo toda el área costera mediterránea española (dividida en provincias e islas). A pesar de lo corto de la serie, los casos son bastante numerosos y, en concreto, se superan los treinta casos en Girona, Barcelona, Valencia, Alacant y Mallorca. Para cada uno de los casos, se ha explorado una base de datos de ciclones, tratando de localizar algún centro ciclónico cercano al lugar de la lluvia fuerte. La base de datos de ciclones está basada mayoritariamente en análisis subjetivos finos, complementados con análisis HIRLAM-INM sin suavizar. El resultado es que hay un centro ciclónico simultáneo a la lluvia fuerte, a 600 km de distancia o menos, en el 94-100% de los casos, salvo en Andalucía mediterránea, donde se baja hasta el 69% (Málaga). A pesar de lo altos que son los porcentajes encontrados (para la mayor parte del territorio), pueden no ser demostrativos de relación directa entre ciclón y lluvia fuerte, sino que pueden ser resultado de la casualidad, dado que la base de datos usada contiene muchos ciclones, sin excluir los débiles o pequeños. Pero hay dos factores que apuntan a una verdadera relación. Primero, la localización de los centros ciclónicos simultáneos a la lluvia fuerte no es cualquiera,

sino que es predominantemente compatible con el modelo conceptual descrito antes; para Cataluña, Comunidad Valenciana-Murcia y Baleares el centro ciclónico se sitúa preferentemente hacia el sur de la zona de lluvia fuerte, forzando un flujo mediterráneo de Levante, cálido y húmedo, hacia ella. Segundo, si se toma una muestra aleatoria de días, con o sin lluvia, el porcentaje de presencia ciclónica cercana baja de casi el 100% a sólo el 60-70% (excluyendo Andalucía).

Figure 3. *Location of the closest cyclone centre in the case of heavy rain at different sites. From left to right and from top to bottom the sites are France-W, France-E, northern Italy and Ticino, Catalonia, the Balearic Islands, Corsica, Valencia-Murcia, Algeria, Sardinia and Andalusia. Black dots indicate the heavy rain site and the most frequent location of the cyclone centre. The size of the axis of the ellipse indicates the dispersion in the location of cyclone centres.*

Cabe añadir que los ciclones asociados a lluvias fuertes no son siempre intensos (Jansà et al., 2001). De hecho, al suavizar los campos, eliminando los ciclones más débiles o pequeños, el porcentaje de simultaneidad entre lluvia fuerte y centro ciclónico cercano disminuye sensiblemente. Excluyendo Andalucía, se pasa de cerca del 100% a alrededor del 70%. La disminución, además, no es la misma para todos los lugares. La mayor disminución se da en Comunidad Valenciana y Murcia, donde se pasa del 99% al 57% (Campins et al., 2002). La menor disminución, en cambio, ocurre en Illes Baleares, dónde la frecuencia de simultaneidad de lluvia fuerte y centro ciclónico cercano se mantiene alta (86%) aún después de suavizar los campos. Suelen ser centros ciclónicos muy próximos y, además, frecuentemente profundos (de gran espesor) (Campins et al., 2006b). Cataluña está es una situación intermedia, pasando el porcentaje de simultaneidad entre lluvia fuerte y ciclón de cerca del 95%, cuando se consideran todos los ciclones, al 78% si se suavizan los campos, eliminando los ciclones más débiles o pequeños (Campins et al., 2007).

% centro ciclónico dentro de un radio de 600 km en torno al centro de la región		
	Lluvia fuerte	Aleatorio
Catalunya	95	64 (GI)
València-Múrcia	99	70 (VA)
Balears	99	69 (PM)

(Jansa et al., 2001)

Lluvia fuerte

Aleatorio

(Campins et al., 2002)

Campins et al 2006b – Illes Balears - HR

Campins et al 2007 – Catalunya - HR

En resumen, las lluvias fuertes en Illes Balears son casi siempre simultáneas a una presencia ciclónica cercana, de hecho muy cercana, y, además, el centro ciclónico tiene cierta entidad, siendo pocas veces débil o superficial. Las lluvias fuertes en Cataluña están mayoritariamente asociadas a ciclones centrados hacia el Mar Balear, que suelen ser moderados; hay casos de

coincidencia entre lluvia fuerte y centro ciclónico débil, pero puede no existir relación directa; finalmente, hay casos en que la lluvia fuerte puede estar ligada a centros ciclónicos lejanos, no mediterráneos, que fuerzan un flujo vigoroso del sur contra los Pirineos (Campins et al., 2007). En las regiones de Valencia y Murcia, que es donde hay más episodios de lluvia fuerte, ésta es casi siempre simultánea a una presencia ciclónica cercana, con centro preferentemente localizado hacia la zona marítima de Argelia-Alborán-Palos, siendo amplio el rango de intensidad de los ciclones involucrados. Muchos de esos ciclones son débiles y superficiales, de modo que incluso desaparecen con el filtrado de los campos, sin embargo pueden ser suficientes para organizar el flujo, de acuerdo conel modelo conceptual antes expuesto (figura de la página 17).

2.3. Ciclones y vientos fuertes

Que dentro de los ciclones intensos, con fuertes gradientes de presión, hay vientos fuertes es algo que no necesita demostración. Algunos de los temporales de viento fuerte en el Mediterráneo y sus costas se pueden asociar con ciclones intensos cercanos. Pero, en relación al Mediterráneo español, sabemos que los ciclones intensos son poco frecuentes en la zona, de modo que la frecuencia de temporales de viento asociados a ciclones intensos cercanos no puede ser alta en la zona. También se pueden asociar los vientos fuertes con ciclones cercanos de presión central muy baja, aunque tengan menos CG (por su reducido tamaño), pero tampoco son muchos.

Sin embargo, la incidencia del viento fuerte en el Mediterráneo español, al menos en algunas de sus zonas, es importante. El sistema de vientos Mistral-Tramontana, sin duda el de mayor relieve de todo el Mediterráneo, da lugar a muy frecuentes temporales marítimos en zonas próximas a España, incluyendo áreas del territorio español, como el NE de Cataluña y de Baleares (H.M.S.O., 1962; Jansà, 1987; Campins et al., 1995). En puntos de esas zonas (como el Faro de Capdepera o el Cap Begur) no es difícil superar los 100 km/h, incluso los 130 km/h. Aunque haysimultaneidad en muchos casos, el viento fuerte afecta más frecuentemente al norte de Cataluña que al norte de Baleares. También el Cierzo en el valle del Ebro se asocia frecuentemente con el sistema Mistral-Tramontana, presentando, también, alta frecuencia (Riosalido et al., 1986; Jansà, 1997). Otros vientos fuertes, sobre todo de Poniente y Levante, pueden afectar a muchos otros puntos del Mediterráneo, pero son mucho más ocasionales.

Los vientos fuertes en Illes Balears (con rachas de 25 m/s en general o de 33 m/s en los lugares de más viento) se pueden asociar a ciclones en el 98% de los casos, aunque suelen ser ciclones algo lejanos, hasta 1500 km, preferentemente localizados hacia la zona de Génova-Tirreno-Adriático, en coincidencia con la zona donde los ciclones mediterráneos intensos son más habituales (figura de la pág. 12). No obstante, en el 34% de los casos de viento fuerte en Illes Balears el ciclón asociado está cerca, a menos de 600 km. En general los ciclones asociados a viento fuerte en Illes Balears son intensos (con CG alrededor de 7) y profundos (Campins et al., 2006b).

En Cataluña sólo se puede establecer simultaneidad entre ciclón y viento fuerte en un 64% de los casos. Entonces el ciclón suele estar centrado hacia el sur deCataluña (Mar Balear) o hacia Génova o proximidades (Campins et al., 2007). Hay muchos casos de Tramontana fuerte simultánea en Cataluña y Baleares que están ligados a intensos ciclones de Génova-Tirreno-Adriático, pero también hay casos en los que el viento fuerte de Tramontana es bastante local en Cataluña, sin conexión con baja definida importante. Lo que sí hay en ambos casos es un flujo del norte sobre el Pirineo, formando un dipolo orográfico de presión (Bessemoulin et al., 1993)- El fuerte gradiente de presión asociado a la componente positiva (anticiclónica) del dipolo orográfico proporciona aceleración local del viento en el límite oriental del Pirineo (Campins et al., 1995; Campins et al., 1997). La componente negativa del mismo dipolo, que se manifiesta como depresión al sur del Pirineo (figura de la pág. 7), proporciona aceleración local para el Cierzo (Riosalido et al., 1986).

Campins et al 2006b – SW –Illes Balears

Campins et al 2007 – SW - Catalunya

Pequeñas depresiones orográficas y costeras pueden proporcionar aumentos de gradiente y aceleraciones locales, como en algunos Ponientes del golfo de Valencia y Baleares (Jansà, 1997), aunque a veces el ciclón motor principal del viento fuerte hay que ir a buscarlo fuera del Mediterráneo, lejos de la zona de viento fuerte (Nissen et al., 2010).

K. M. Nissen et al.: Cyclones and Mediterranean wind storms

Fig. 6. Position of cyclone causing wind storm in the Mediterranean region. Location shown at time of highest wind speed. The colour coding and size of the circles reflect the strength of the cyclones via $\nabla^2 p$.

Nissen et al 2010

3. CONCLUSIONES

En el Mediterráneo, incluso en el Mediterráneo español o cercano a España, hay muchos ciclones, en particular si incluimos los ciclones débiles, pequeños y superficiales, muchas veces orográficos o térmicos. Una parte de los ciclones mediterráneos son intensos y producen impactos combinados importantes en los lugares donde se ubican, pero los ciclones intensos son pocos en el Mediterráneomás occidental, de modo que tampoco son muchos los temporales combinados fuertes de viento y lluvia en esa zona, aunque algunos pueden ser muy importantes.

Por contraste, los ciclones mediterráneos intensos se concentran en la zona de Génova-Tirreno-Adriático, desde donde tienen un impacto importante a distancia en tierras españolas, contribuyendo a la alta incidencia de vientos fuertes de Tramontana y Cierzo.

Los ciclones débiles o moderados no producen, generalmente, impactos muy acusados directamente, pero en circunstancias adecuadas se convierten en un desencadenante clave de episodios de lluvia intensa, a través de la organización de un flujo alimentador. De hecho, la gran mayoría de lluvias fuertes en el Mediterráneo español están ligadas a ciclones mediterráneos, no necesariamente intensos, a veces moderados o débiles. El porcentaje relativo de ciclones débiles asociados a lluvia fuerte, frente a los moderados o intensos, es importante para la Comunidad Valenciana-Murcia, siendo menor para Cataluña y, sobre todo, para Baleares.

4. AGRADECIMIENTOS

Lo expuesto en este capítulo es resultado del trabajo realizado por muchas personas,en particular por los miembros del grupo de AEMET en Illes Balears dedicado a la Meteorología Mediterránea, especialmente Ana Genovés, Joan Campins y María Ángeles Picornell. Ese trabajo se ha ido haciendo en el marco de varios proyectos internacionales, como el WMO-MCP, el PYREX, el MAP y, sobre todo, el MEDEX.

REFERENCIAS

Alpert, P.; Neeman, B. U. y Shay-El, Y. (1990). Climatological analysis of Mediterranean cyclones using ECMWF data. Tellus, 42A, pp. 65-77.

Bessemoulin, P.; Bougeault, P.; Genovés, A.; Jansà, A. y Puech, D. (1993). Mountain Pressure Drag during PYREX. Beitr. Phys. Atmosph., 66, pp. 305-325.

Buzzi, A. y Tibaldi, S. (1978). Cyclogenesis in the lee of the Alps: a case study. Quart. J. R. Met. Soc., 104, pp. 271-287.

Campins, J.; Jansà, A.; Benech, B.; Koffi, E. y Bessemoulin, P. (1995). PYREX Observation and Model Diagnosis of the Tramontane Wind. Meteorol. Atmos. Phys., 56, pp. 209-228.

Campins, J.; Calvo, J. y Jansà, A. (1997). The Tramontane Wind: Dynamic Diagnosis and HIRLAM Simulations. INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Universitat de les Illes Balears y Ministerio de Medio Ambiente. ISBN-84-7632-329-8, pp. 503-508.

Campins, J; Genovés, A.; Jansà, A.; Guijarro, J.A. y C. Ramis (2000). A catalogue and a classification of surface cyclones for the Western Mediterranean. Int. J.Climatol., 20, pp. 969-984.

Campins, J.; Jansà, A.; Genovés, A. y Picornell, M.A. (2002). Heavy rain and cyclones in the Western Mediterránean. EGS 2002 General Assembly, Nize. (Presentación sin publicar).

Campins, J.; Jansà, A. y A. Genovés (2006a). Three-dimensional structure of Western Mediterranean cyclones. Int. J. Climatol., 26, pp. 323-343.

Campins, J.; Jansà, A. y Genovés, A. (2006b). Heavy rain and strong wind events and cyclones in the Balearics. Advances in Geosciences, 7, pp. 73-77.

Campins, J.; Aran, M.; Genovés, A. y Jansà, A. (2007). High impact weather and cyclone simultaneity in Catalonia. Advances in Geosciences, 12, pp. 115-120.

Campins. J.; Genovés, A.; Picornell, M.A. y Jansà, A. (2011). Climatology of Mediterranean cyclones using ERA-40 dataset. Int. J. Climatol., 31(11), pp. 1596- 1614.

Cressman, G. (1959). An operational objective analysis system. Mon. Wea. Rev., 87(10), pp. 367-374.

Doswell, C.A. (1982). The operational meteorology of convective weather, Vol I, Operational mesoanalysis. NOAA Tech. Mem. NWS NSSFC-5, 157 pp.

Doswell, C.A.; Brooks, H.E. y Maddox, R.A. (1996). Flash Flood Forecasting: An Ingredients-Based Methodology. Weather and Forecasting, 11, pp. 560-581.

Flocas, H.A.; Maheras, P.; Karakostas, T.S.; Patrikas, I. y Anagnostopoulou, C.(2001). A 40-year climatological study of relative vorticity distribution over the Mediterranean. Int. J. Climatol., 21, pp. 1759-1778.

Genovés, A. y Jansà, A. (1989). Statistical Approach to Mesoscale Non-Alpine West Mediterranean Cyclogenesis. WMO/TD No. 298, pp. 77-85.

Genovés, A. y Jansà, A. (1991). The use of potential vorticity maps in monitoring shallow and

deep cyclones in the Western Mediterranean. WMO/TD No. 420, pp. 55- 65.
Genovés, A.; Jansà, A. y Estarellas, C. (1997). First evalutation of orographic factor in Western Mediterranean cyclones. INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Universitat de les Illes Balears y Ministerio de Medio Ambiente. ISBN-84-7632-329-8, pp. 273-282.
Genovés, A. y Jansà, A. (2003). Diabatic processes contribution to the November 2001 storm. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca, Spain, October 2002. Universitat de les Illes Balears. CD-ROM, ISBN-84-7632-792-7.
Genovés, A. ; Campins, J. y Jansà, A. (2006). Intense storms in the Mediterranean: a first description from the ERA-40 perspective. Advances in Geosciences, 7, pp. 163- 168.
Gil, V.E.; Genovés, A.; Picornell, M.A. y Jansà, A (2003). Automated database of cyclones from the ECMWF model: preliminary comparison between West and East Mediterranean basins. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca,Spain, October 2002. Universitat de les Illes Balears. CD-ROM, ISBN-84-7632-792-7.
Gili, M.; Jansà, A.; Riesco, J. y García-Moya, J.A. (1997). Quasi-tropical cyclone on 12th September in the Balearics. INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Universitat de les Illes Balears y Ministerio de Medio Ambiente. ISBN-84-7632-329-8, pp. 143-150.
H.M.S.O. (1962). Weather in the Mediterranean. Volume 1. General Meteorology. Meteorological Office, London. 362 pp.
Hamadache, B.; Terchi, A. y Brachemi, O. (2003). Study of the meteorologicalsituation which affected the west and the center of Algeria in general and Bab-el- Oued in particular on the 10th November 2001. Proceedings of the 4th EGS Plinius Conference held at Mallorca, Spain, October 2002. Universitat de les Illes Balears. CD-ROM, ISBN-84-7632-792-7.
Hoinka, K. y Castro, M. (2003). The Iberian thermal low. Quart. J. R. Met. Soc., 129, pp. 1491-1511.
Homar, V. ; Ramis, C. y Alonso, S. (2002). A deep cyclone of African origin over the Western Mediterranean: diagnosis and numerical simulation. Ann. Geophys., 20, pp. 93-106.
Homar, V.; Jansà, A.; Campins, J.; Genovés, A. y Ramis, C. (2007). Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 7, pp. 445-454.
Jansà, A. (1987). Distribution of the Mistral. A satellite observation. Meteorol. Atmos. Phys., 36, pp. 201-214.
Jansà, A. y Vázquez, L. (1991). Situación meteorológica del 30 de enero de 1986. Segundo Simposio Nacional de Predicción, Madrid 20-22 Noviembre 1990. Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, pp. 19-27.
Jansà, A.; García-Moya, J.A. y Rodríguez, E. (1991). Numerical experiments on heavyrain and Mediterranean cyclones. WMO/TD No. 420, pp. 37-47
Jansà, A.; Genovés, A.; Riosalido, R. y Carretero, O. (1996). Mesoscale cyclones vs heavy rain and MCS in the Western Mediterranean. MAP Newsletter, 5, pp. 24-25.
Jansà, A. (1997). A general view about Mediterranean meteorology: cyclones and hazardous weather. INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Universitat de les Illes Balears y Ministerio de Medio Ambiente. ISBN-84-7632-329-8, pp. 33-42.
Jansà, A.; Genovés, A.; Picornell, M.A.; Campins, J.; Riosalido, R. y Carretero, O. (2001). Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach. Meteorol. Appl., 8, pp. 43-56.
Jansà, A.; Campins, J.; Picornell, M.A. y Guijarro, J.A. (2011). Intense small cyclonic vortices in the Mediterranean. 13th Plinius Conference on Mediterranean storms. (Presentación sin publicar).
Maheras, P.; Flocas, H.A.; Patrikas, I. y Anganostopouolou, C. (2001). A 40 year objective climatology of surface cyclones in the Mediterranean region: spatial and temporal distribution.

Int. J. Climatol., 21, pp. 109-130.
Nissen, K.M.; Leckebusch, G.C.; Pinto, J.G.; Renggli, D.; Ulbrich, S. y Ulbrich, U. (2010). Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, pp. 1379-1391.
Petterssen, S. (1956). Weather Analysis and Forecasting. Volume 1. Motion and motion systems. Mc Graw Hill, New York. 428 pp.
Petterssen, S. y Smebye, S.J. (1971). On the development of extratropical cyclones.
Quart. J. R. Met. Soc., 97, pp. 457-482.
Radinovic, D. y Lalic, D. (1959). Cyclonic activity in the West Mediterranean. Memories 7, Federal Hydromet. Institute, Belgrade. 57 pp.
Radinovic, D. (1965). Cyclonic activity in Yugoslavia and surrounding areas. Arch. Met. Geoph. Bioklim., A 14, pp. 392-408.
Radinovic, D. (1978). Numerical model requeriments for the Mediterranean area. Riv.Met. Aer., 38, pp. 191-205.
Radinovic, D. (1987). Mediterranean cyclones and their influence on the weather and climate. WMO PSMP Rep. Series, no. 24, Geneva. 131 pp.
Riosalido, R.; Vázquez, L.; Gordo, A. y Jansà, A. (1986). Cierzo: Northwesterly wind along the Ebro Valley as a meso-scale effect induce don the lee of the Pyrenees mountain range: a case study during ALPEX Special Observing Period. Scientific Results of the Alpine Experiment (ALPEX), Vol. 2. WMO/TD – No. 108, pp. 565-575.
Riosalido, R. (1997). Mesoscale convective systems in the Western Mediterranean, a satellite view. INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean. Universitat de les Illes Balears y Ministerio de Medio Ambiente. ISBN-84-7632-329-8, pp. 353-359.
Rivera, A. y Riosalido, R. (1986). Mediterranean convective systems as viewed by Meteosat. A case study. 6th Meteosat Scientific Users Meeting, Amsterdam 25-27 November 1986, EUMETSAT, pp. 101-104
Romero, R.; Doswell, C.A. y Ramis, C. (2000). Mesoscale Numerical Study of Two Cases of Long-Lived Quasi-Stationary Convective System over Eastern Spain. Mon. Wea. Rev., 128, pp. 3731-3751.
Sinclair, M.R. (1997). Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. Weather and Forecasting, 12, pp. 595-612.
Trigo, I.R.; Davies, T.D. y Bigg, G.R. (1999). Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. Journal of Climate. 12, pp. 1685-1696.
Uppala, S.; Kallberg, P.; Hernández, A.; Saarinen, S.; Fiorino, M.; Li, X.; Onogi, K.; Sokka, N.; Andrae, U. y Bechtold, V.D.C. (2004). ERA-40: ECMWF 45-year reanalysis of the global atmosphere and surface conditions 1957-2002. ECMWF Newsletter, 101,pp. 2-21.