



Sistemas de predicción por conjuntos en el Mediterráneo

32

DOI: [10.31978/014-18-009-X.32](https://doi.org/10.31978/014-18-009-X.32)

VÍCTOR HOMAR SANTANER, AGUSTÍ JANSÀ CLAR Y ROMUALDO ROMERO MARCH
Grupo de Meteorología, Departamento de Física, Universitat de les Illes Balears

El Mediterráneo occidental es un rincón endiabladamente original, demasiado autárquico, demasiado particular y demasiado complicado. Hemos de seguir estudiándolo si queremos adivinar algún día con mayor éxito que hoy las reacciones de su carácter caprichoso.

J. M. JANSÀ GUARDIOLA, 1964

El peculiar mundo mediterráneo (un mar profundo, relativamente cálido buena parte del año, y rodeado de montañas) genera una meteorología específica, en algunos aspectos más predecible que la meteorología de los grandes espacios abiertos, pero de muy difícil predicción en otros aspectos, particularmente los relacionados con fenómenos adversos, frecuentemente asociados a configuraciones de pequeña escala. Para ese tipo de fenomenología la predicción por conjuntos puede ser imprescindible, al menos para acotar incertidumbres, y puede exigir planteamientos particulares.

Palabras clave: sistemas de predicción por conjuntos aplicados en meteorología mediterránea, lluvias mediterráneas intensas, medicanes, aplicación de SPC para predicción de inundaciones.

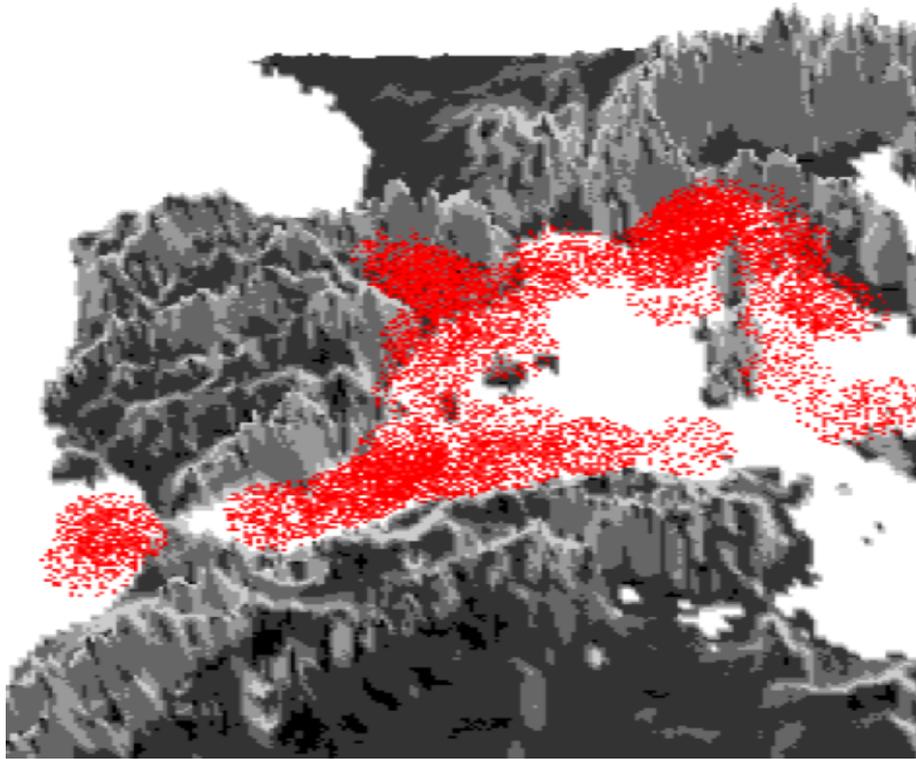


Figura 32.1: Localizaciones preferentes de bajas de sotavento y otras depresiones de pequeña escala en el Mediterráneo occidental. No se han incluido las bajas térmicas continentales típicas del verano.

32.1 Perspectiva histórica de la predecibilidad meteorológica mediterránea

La cita que introduce este capítulo alude directamente a una predecibilidad singularmente baja en el Mediterráneo en relación a otros lugares o regiones. Once años más tarde, el prestigioso meteorólogo de la U.S. Navy americana, ELMAR REITER, escribía algo similar: «*la predicción del tiempo en la región mediterránea, una tarea exigente incluso para el meteorólogo local, puede a menudo convertirse en una experiencia muy frustrante para el foráneo, que puede no darse cuenta de los intrincados y complejos efectos modificantes que la topografía local puede tener en la región sobre los sistemas meteorológicos de escala sinóptica*». Ya existían en los años 1960 y 1970 algunos modelos numéricos de predicción del tiempo, pero eran muy simplificados, con importantes carencias de procesos físicos, y reducida resolución. Esas primeras predicciones numéricas eran poco fiables, no muy útiles, y desde luego poco accesibles. La predicción operativa se fundamentaba, más bien, en una extrapolación, bastante subjetiva, de la evolución de los campos de presión en superficie y en altura. Esa extrapolación se basaba, a su vez, en los modelos conceptuales de génesis y evolución de las

depresiones, descritos por la Escuela Noruega de Meteorología hacia los años 1920 [1], modificados por el conocimiento ulterior de la atmósfera superior. En el Atlántico, los frentes, depresiones y anticiclones sinópticos eran fáciles de seguir al responder bien a los modelos conceptuales, basados en teorías dinámicas simplificadas. Pero en el Mediterráneo las reglas convencionales fallaban. Las perturbaciones que llegaban desde el Atlántico podían desvanecerse o regenerarse con facilidad, a veces inesperadamente. La razón de ese comportamiento «*autárquico, original, complicado*» era y es la geografía regional. El Mediterráneo, en particular su cuenca occidental, es una cubeta casi cerrada, rodeada de altas montañas y ocupada por un mar profundo que la mayor parte del año se comporta como mar cálido (en relación al aire en contacto con él), fuente por tanto de humedad y calor, de energía, en definitiva, que repercute en la inestabilización atmosférica. Durante un periodo más corto, entre la primavera y el verano, el Mediterráneo es, más bien, un mar frío, sumidero de energía y capaz de estabilizar. La orografía, que prácticamente cierra el perímetro de la región, genera frecuentes perturbaciones atmosféricas de pequeña escala que suponen una redistribución de la temperatura y la presión. A sotavento de las montañas, en relación a la dirección de los vientos de gran escala dominantes

en cada ocasión, se forman depresiones orográficas, con aire generalmente más cálido que el que hay a barlovento. Teniendo en cuenta la preponderancia de vientos de componente oeste –entre el SW y el NW, incluso hasta el N-, los lugares donde más frecuentemente se forman depresiones de sotavento son los que, cualitativamente, se indican en la Figura 32.1. Los «complejos efectos modificadores» a los que se refería REITER son la suma de los de tipo orográfico y los relacionados con el carácter marítimo-cerrado de la región. Es decir, si el Mediterráneo es «demasiado particular» y tiene un «carácter caprichoso», no es porque en esta región rija una física diferente, sino porque su singular geografía propicia la interacción entre los sistemas atmosféricos de gran escala y los agentes modificadores locales.

El perfeccionamiento progresivo de los modelos numéricos de predicción desde los años 1970 y, sobre todo, desde los años 1980 en adelante, ha permitido tomar en consideración e incluir en los algoritmos los efectos modificadores ligados a la geografía y, en particular, a la orografía. En relación al tratamiento de la orografía en los modelos numéricos, al principio se subestimaban en demasía los efectos de las montañas, ya que la baja resolución de los modelos disponibles implicaba una altura media de las cadenas montañosas muy rebajada en relación a la altura real de las cumbres, sobre todo en el caso de cordilleras de escasa extensión y gran complejidad como las que rodean el Mediterráneo occidental. En consecuencia, la predicción seguía siendo muy deficiente. Como ejemplo, en los modelos usados a principios de la década de los 80 por el Centro Europeo de Predicción a Medio Plazo (European Centre for Medium-range Weather Forecasts, ECMWF), los Alpes tenían una altura media de sólo 500 metros, de modo que podían afectar escasamente a la circulación atmosférica. Por entonces, desprovistos todavía de unos medios computacionales que permitieran mejorar sensiblemente la resolución de los modelos, se introdujeron métodos artificiales para aumentar la altura de las montañas modeladas e intensificar, así, sus efectos, mejorándose algo la predicción, aunque no suficientemente. La elevación artificial de la orografía del modelo no permitía, sin

embargo, incorporar los importantes efectos de la rugosidad o variabilidad pico-valle en la circulación de niveles cercanos a la superficie. Si bien ha habido una mejora progresiva, la representación de la orografía no ha sido suficientemente realista hasta que las resoluciones de los modelos operativos han alcanzado la decena de kilómetros.

La **orografía envolvente** fue uno de los métodos utilizados en los años 80 para mejorar la representación de los efectos orográficos en los modelos numéricos de baja resolución. El método [32] consiste en incrementar la altura media del terreno (a la resolución del modelo) en una magnitud proporcional a la desviación estándar de la orografía descrita por una rejilla de mayor resolución. La orografía envolvente es la orografía media así incrementada. Se constató que su introducción reducía errores sistemáticos en regiones muy afectadas por orografía compleja, como el Mediterráneo occidental. La orografía envolvente dejó de utilizarse cuando los modelos alcanzaron resoluciones horizontales suficientes.

Aparte de una mayor resolución, los modelos han ido introduciendo otros tipos de mejoras, como una mejor parametrización (sec. 10.5 en la página 137) de los procesos físicos de escala inferior a la rejilla, incluidos los intercambios de calor y humedad con el mar. Cabe preguntarse si la mejora constante de los modelos ha aumentado la predecibilidad meteorológica en el Mediterráneo a nivel general, acercándonos a unos resultados semejantes a los de las zonas oceánicas, o si sigue habiendo razones que hacen especialmente impredecible el tiempo en el Mediterráneo. De hecho, hay argumentos que sugieren que la predecibilidad en el Mediterráneo pudiera ser incluso mayor que, digamos, en el Atlántico. En efecto, en el Mediterráneo muchos procesos están fuertemente condicionados por la orografía y ésta, si puede ser convenientemente representada en los modelos, no alimentaría el comportamiento caótico del flujo, sino al contrario: siendo como es un factor conocido y constante, no sometido a incertidumbres, incluso contribuye a acotar la incertidumbre en la predicción, al menos en un plazo de tiempo no muy largo.

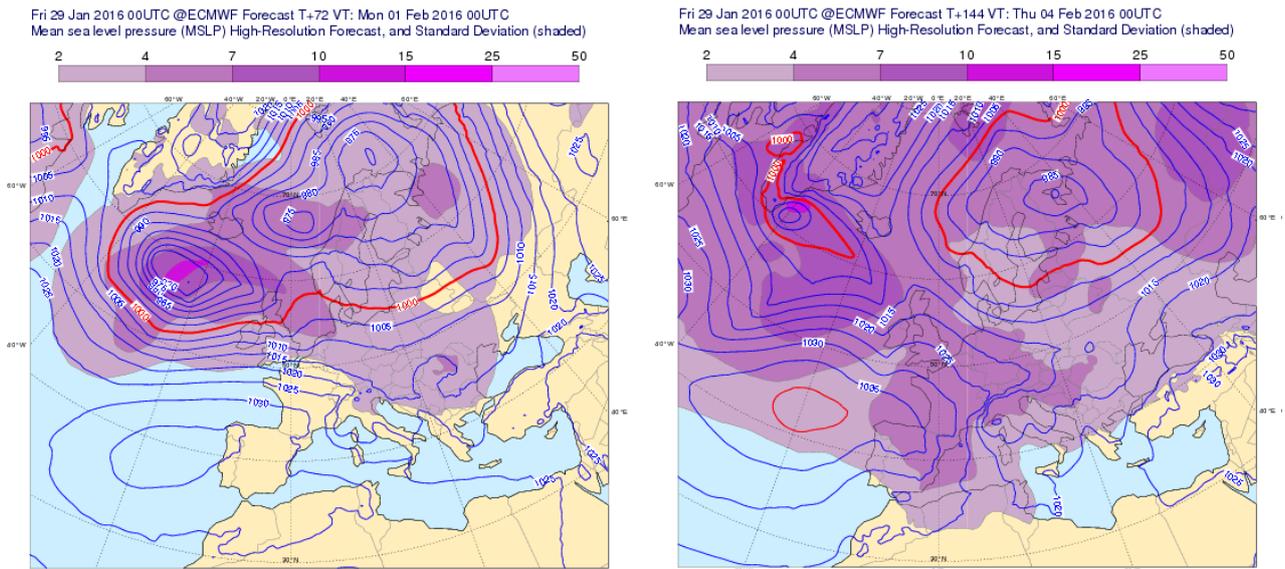


Figura 32.2: Previsiones deterministas de alta resolución H+72 y H+144 (presión al nivel del mar) y dispersión de las previsiones SPC correspondientes (sec. 27.5.1 en la página 412). La dispersión es relativamente baja a sotavento de los Alpes, a pesar de ser zona de perturbación: una buena representación de los efectos orográficos rebaja la incertidumbre. Productos del ECMWF, 29 enero 2016.

La verdad es que si se piensa en magnitudes dinámicas principales (presión/geopotencial o temperatura) la dispersión de las predicciones por conjuntos en el Mediterráneo resulta incluso menor que en zonas sin relieve complejo, a igualdad de otras condiciones. Se pueden encontrar varios ejemplos de ello. En la Figura 32.2 puede verse como las bajas a sotavento de los Alpes, típicas perturbaciones mediterráneas con fuerte dependencia orográfica, se prevén por el SPC del ECMWF (ECENS, sec. 19.3 en la página 293) con una incertidumbre claramente menor que la que tendría una ciclogénesis semejante en una zona sin relieve. Posiblemente pueda decirse que lo que décadas atrás hacía más impredecible el tiempo mediterráneo (los efectos orográficos), hoy en día se ha convertido en un factor favorable. Sin embargo, la complejidad geográfica del Mediterráneo sigue ejerciendo en muchos casos el efecto contrario: muchos procesos, en particular los que conducen a fenómenos adversos, como lluvias y vientos muy fuertes y localizados o formaciones ciclónicas sorprendentes (véase en este capítulo los pequeños ciclones de tipo tropical, también llamados *medicanes*), ocurren a pequeña escala, a mesoescala, con lo que errores mínimos en el flujo atmosférico pueden conducir, por su interacción con la orografía, a consecuencias meteorológicas muy diferentes. Piénsese, además, que en una región marítima por excelencia como la mediterránea, el número de observaciones convencionales rutinarias (en superficie y altura) que contribuyen a la descripción del estado de la atmósfera, será menor en comparación

con las zonas continentales. El resultado final indica que, aunque la predecibilidad de magnitudes con reducida variabilidad espacial y temporal no parece ser ahora muy diferente en el Mediterráneo que en otras áreas, la predicción de fenómenos asociados a procesos físicos complejos y que varían fuertemente en espacio y tiempo, como lluvia y viento, especialmente cuando son fuertes, sigue siendo particularmente complicada, aunque haya mejorado. No hay muchos estudios que cuantifiquen lo anterior, pero se podría citar, por ejemplo, el realizado por Callado y col. en 2011 [3], en el que se comprueba esa peor predecibilidad de las lluvias mediterráneas, en particular las fuertes, en relación a las atlánticas, incluso cuando se aplica una predicción por conjuntos (como AEMET-SREPS sec. 21 en la página 313).

Tras el indudable éxito de las predicciones globales basadas en conjuntos, iniciadas en los años 90 y alentadas por el incesante aumento de recursos computacionales [18], la comunidad científica meteorológica internacional se encuentra aún inmersa en una carrera por la conquista de la predicción numérica precisa y fiable de fenómenos de mesoescala a resoluciones espacio temporales útiles. Pronto se descubrió que ese reto no se resolvía con la simple adaptación de los métodos de generación de SPC globales a las nuevas escalas de simulación sino que era necesario analizar las fuentes más determinantes de error y las maneras de tratarlas en los sistemas de predicción de corto alcance.

Inicialmente, los métodos de generación de sistemas de predicción por conjuntos a escala global se basaron únicamente en la perturbación de las condiciones iniciales. El ECMWF genera las perturbaciones a partir de vectores singulares calculados haciendo uso iterativo del modelo tangente lineal y su adjunto [17]. Con el aumento progresivo de la resolución numérica se identificó la importancia de incorporar perturbaciones en las ecuaciones del modelo, a través de términos estocásticos que representan los procesos de submalla [2]. Los sistemas de predicción por conjuntos enfocados al Mediterráneo se han basado habitualmente en la adopción directa de las perturbaciones de escala global [15, 28] aunque se han investigado alternativas no lineales para la perturbación de las condiciones iniciales y la incorporación de perturbaciones en el propio modelo [3, 27, 29, 30, 31].

Este capítulo describe las características climáticas de este «*rincón endiabladamente original*», con un repaso crítico de los fenómenos adversos más relevantes en el Mediterráneo y algunas reflexiones sobre aspectos que determinan su predecibilidad. Por último, se discuten técnicas de generación de SPC aplicables al Mediterráneo occidental y algunas aplicaciones hidrometeorológicas relevantes. Todo ello para conseguir «adivinar» pronto «*las reacciones de su carácter caprichoso*».

32.2 Fenómenos relevantes de la meteorología mediterránea

Lluvias de gran intensidad y copiosidad, normalmente otoñales, y temporales de viento repentinos y localizados, son algunas de las manifestaciones más impactantes de la específica meteorología mediterránea, consecuencia de una geografía y de una localización especiales. El Mediterráneo occidental, que ya hemos definido como cubeta orográfica casi cerrada, está situado a una latitud media y en el flanco occidental de una masa continental, como ocurre en zonas de California, Chile, Sudáfrica o Australia; en estas zonas la circulación general atmosférica permite el tipo de clima llamado, precisamente, mediterráneo, caracterizado por una marcada estacionalidad, con coincidencia de la estación seca con el periodo cálido: el verano es seco, caluroso, con pocas nubes y mucha irradiación solar. En el Mediterráneo occidental esa intensa y continuada radiación solar, acumulada, día

a día, a lo largo del extenso verano, se almacena en el mar, en un estrato superficial cada vez más cálido y profundo con el transcurso de las semanas. Constituye un depósito de energía disponible, que se irá transmitiendo en forma de calor sensible y latente al aire, para posiblemente alimentar episodios de tiempo adverso, a lo largo del otoño, del invierno, incluso de parte de la primavera. No es descabellado hablar de la configuración local de una masa de aire autónoma y especial, cálida y húmeda en términos relativos en sus niveles más bajos, la denominada «masa de aire mediterránea» [21]. Existe, además, una reserva energética profunda: en el Mediterráneo, por su gran aislamiento de los grandes océanos, el agua profunda está siempre a unos 13 grados, incluso cuando la capa superficial se enfría más. Ello supone que ante las irrupciones polares que tienden a enfriar mucho la superficie del mar, las capas profundas aportan calor y mitigan el enfriamiento, transmitiendo energía al aire.

32.2.1 Lluvias mediterráneas intensas

El agua mediterránea, superficial o profunda puede, como hemos dicho, calentar y humedecer durante gran parte del año la masa de aire que se asienta sobre ella, incluso hasta el punto de llenar de «aire mediterráneo» toda la cubeta occidental del *Mare Nostrum*. Ese aire mediterráneo, que ocupa espesores de entre mil y dos mil metros, con unas adecuadas condiciones en niveles medios y altos de la troposfera generará inestabilidad convectiva. Al mismo tiempo, organizado adecuadamente como chorro de bajo nivel, podrá actuar de alimentación, de elemento de reposición, enormemente eficaz, para activar y sostener núcleos de lluvia intensa, a veces estacionarios, lo que supone gran copiosidad y, eventualmente, inundaciones, incluso catastróficas. Las precipitaciones mediterráneas pueden ser de una magnitud no conocida en otras latitudes extratropicales (100, 200, 400, incluso 800 mm en 24 horas).

La **masa de aire mediterránea** fue inicialmente referenciada por FABBRIS en 1935 [8], según menciona JANSÀ GUARDIOLA en su artículo de 1959 [11], en el que se describen en detalle las características físicas de esa masa de aire, nacida de la transformación parcial de masas de aire invasoras, después de su asentamiento en la cubeta occidental del Mediterráneo.

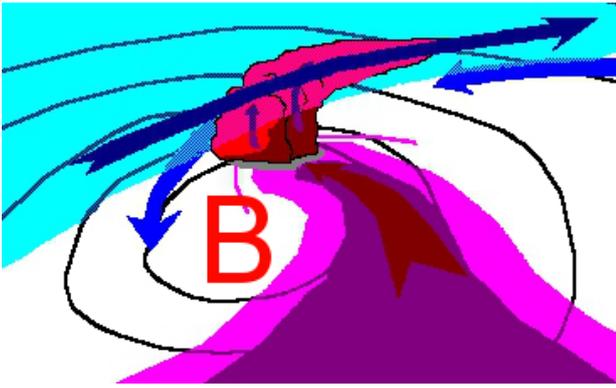


Figura 32.3: Una depresión cercana organiza un flujo de bajo nivel, cálido y húmedo, inestabilizador y alimentador de lluvia intensa localizada. De JANSÀ [13].

Estudios estadísticos [14] han puesto de manifiesto la presencia de depresiones mediterráneas, de mayor o menor entidad, en la gran mayoría de los episodios de lluvia fuerte que afectan a las regiones del Mediterráneo occidental. Se considera que la presencia de una depresión, relativamente próxima a la zona donde la lluvia intensa está descargando, no es casualidad, sino que existe una relación física directa: la depresión actuaría como organizadora del flujo de aire mediterráneo, relativamente cálido y húmedo y desestabilizador y/o alimentador de la lluvia fuerte, en la forma que sugiere el modelo conceptual representado en la Figura 32.3. La presencia próxima de la depresión no sería condición suficiente de la lluvia fuerte (otros factores deben converger), pero sería un elemento muy favorable.

De hecho, se ha podido establecer [14] que en un 90%, aproximadamente, de los episodios de lluvia fuerte en el Mediterráneo occidental existe una depresión cercana, simultánea a la lluvia fuerte y generalmente situada de un modo compatible con el modelo conceptual descrito en la Figura 32.3. Es importante destacar que la presencia de una depresión, intensa o no, en el Mediterráneo occidental no se relaciona con lluvia fuerte generalizada o que afecte a cualquier zona, sino que lluvias fuertes y depresiones tienen localizaciones emparejadas bien definidas. La Figura 32.4 muestra varios de esos emparejamientos. Cabe destacar la necesidad de precisión en la situación y forma de la depresión supuestamente involucrada, ya que ligeros cambios pueden suponer que la lluvia fuerte ocurra o no, o que se desplace de una cuenca a otra. Ello introduce un factor importante de incertidumbre. De hecho, en otro estudio estadístico, Romero y col. [25, 26] mostraron que solamente para las comunidades mediterráneas españolas pueden definirse hasta 8 patrones de reparto espacial de la lluvia intensa, y que dichos episodios pueden ser producidos (de nuevo con un alto grado de emparejamiento) por hasta una quincena de configuraciones sinópticas distintas.

En otros capítulos de este libro se analizan algunos casos de lluvia intensa mediterránea. La presencia de una depresión convenientemente situada es ahí destacada como factor clave en el caso del superrécord de lluvia de Oliva-Gandía, el 3 de noviembre de 1987 (cap. 44 en la página 655), o en el temporal mediterráneo de lluvia y viento de 19 a 24 de enero de 2017 (cap. 52 en la página 795).

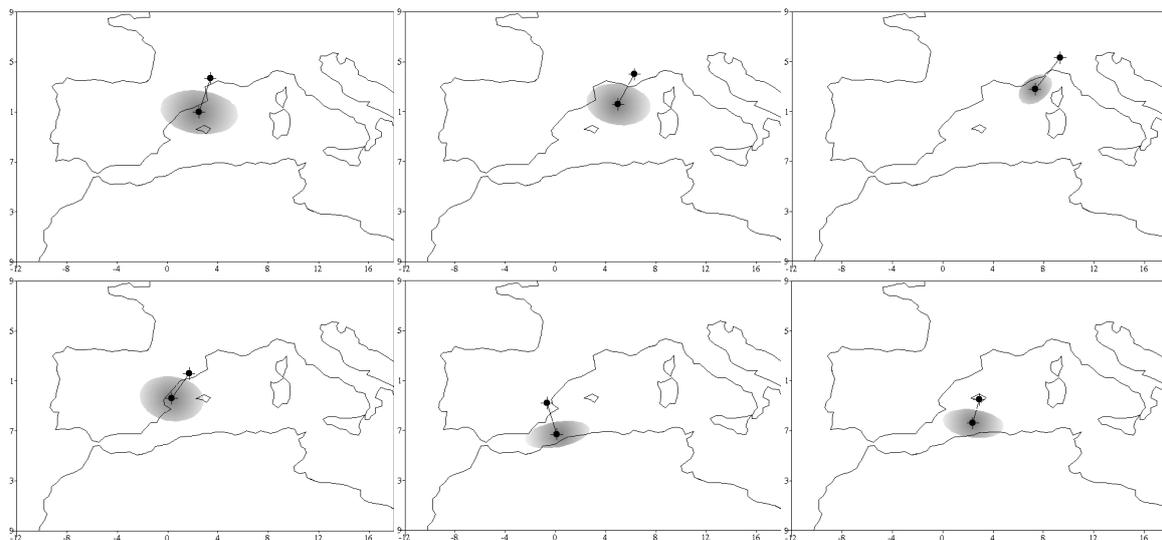


Figura 32.4: Las elipses indican la localización más frecuente de depresiones simultáneas a lluvia fuerte cuando ésta cae en las zonas cuyo centro es el punto sin elipse. De JANSÀ Y COL. [14].

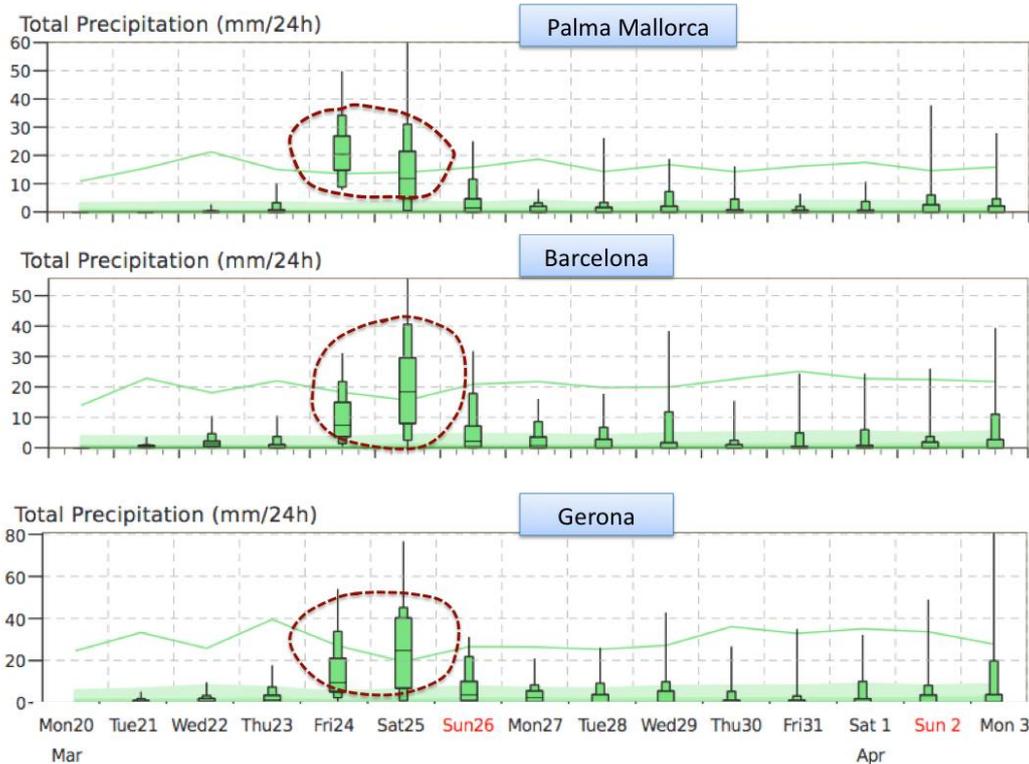
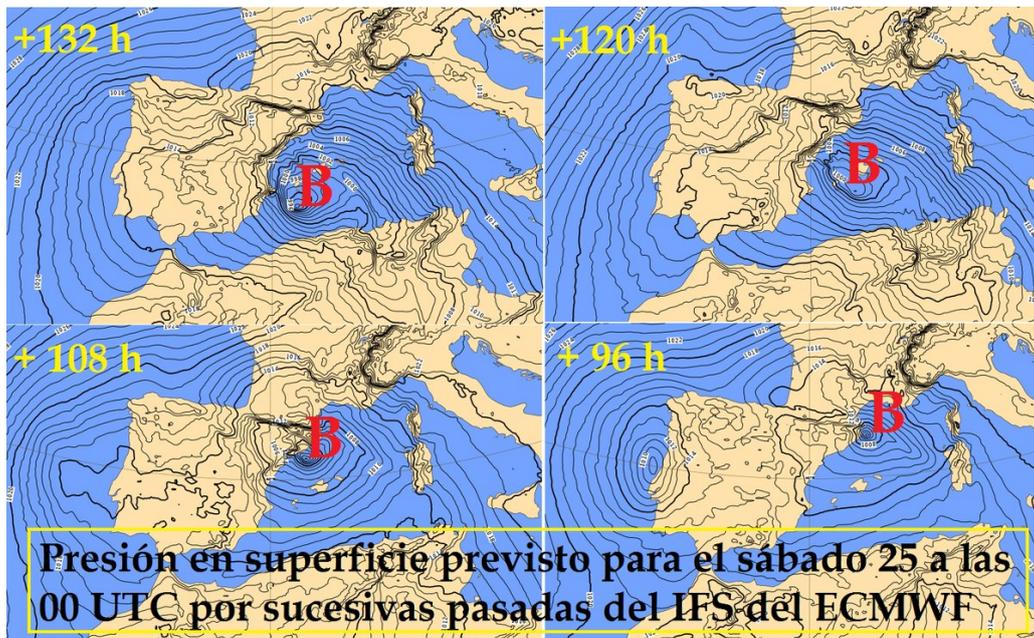


Figura 32.5: Situación del 25-03-2017 a las 00 UTC (arriba) con una baja mediterránea, asociada a posible lluvia fuerte, según integraciones deterministas sucesivas. Las discrepancias indican predecibilidad baja. Con la previsión a 132 h cabría esperar precipitación todavía importante en Illes Balears el día 25, pero con la previsión a 96 h, ya no. De hecho, a 120 h la predicción de precipitación para el día 25, dada por el SPC del ECMWF (abajo), es ambigua en Palma ($12 \text{ mm} \pm 8 \text{ mm}$) (Gráficos cedidos por ANTONIO GARCÍA MÉNDEZ, ECMWF).

En el episodio mediterráneo de lluvias fuertes de los días 24 y 25 de marzo de 2017, por poner otro ejemplo, la imprecisión a varios días vista en la localización prevista de la depresión mediterránea involucrada, imprecisión asociada no a la dispersión del ECENS, sino a la escasa coherencia entre integraciones sucesivas del modelo determinista de dicho centro, ECHRES (sec. 19.2 en la página 291) rebaja mucho la pre-

decibilidad de la lluvia en Illes Balears a lo largo del día 25 (no tanto en Cataluña), como se detalla en la Figura 32.5. En este caso, la imprecisión en la localización de la depresión en superficie pudo ser en mayor medida debida a la poca capacidad de predicción de la baja principal en altura, que a factores geográficos locales.

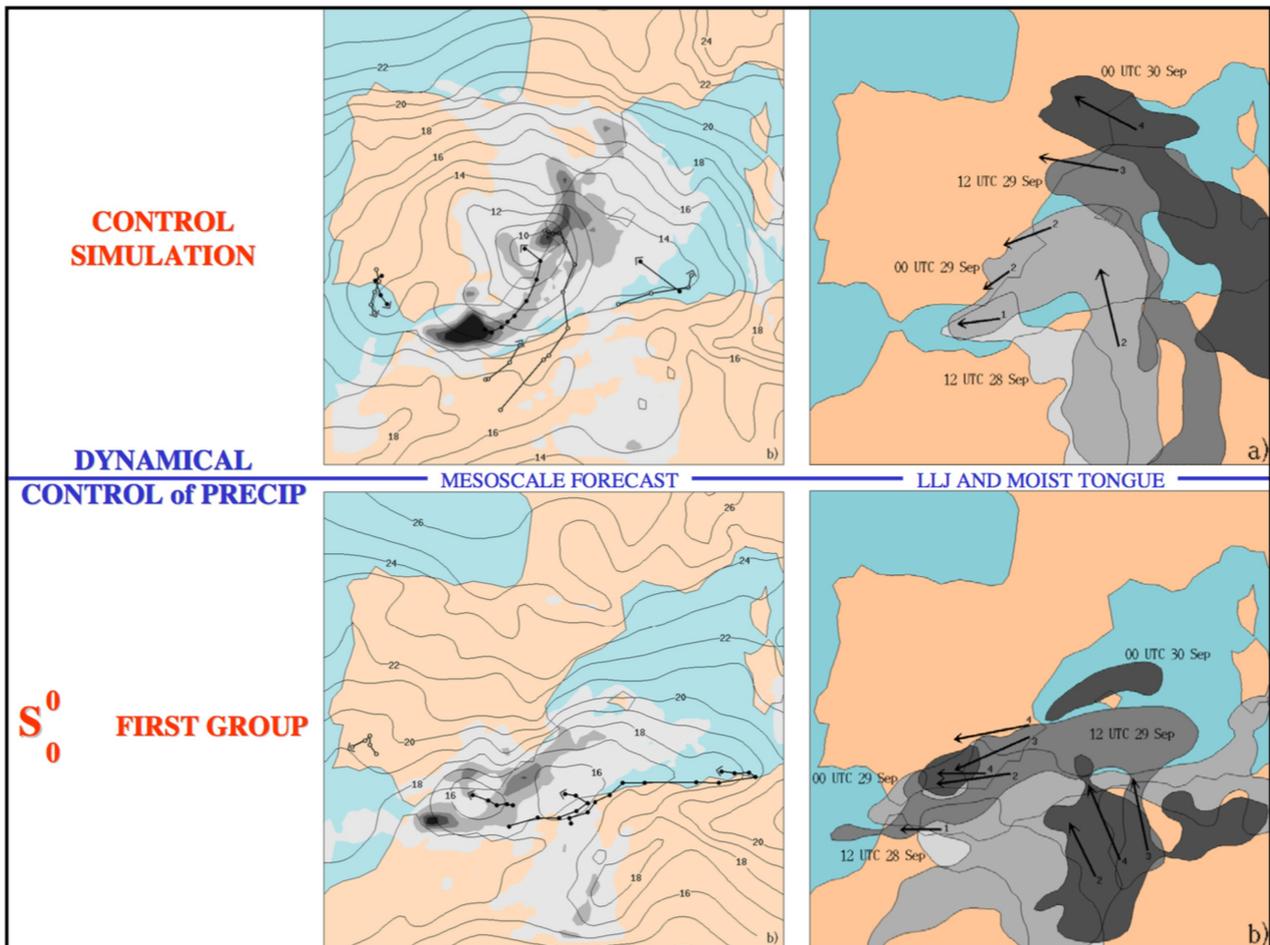


Figura 32.6: 28-29 septiembre 1994. La depresión asociada a lluvia fuerte sigue trayectorias muy diferentes (línea quebrada con círculos llenos, izquierda) según sean las condiciones iniciales, completas (arriba) o suavizando los aspectos subsinópticos de la circulación en altura (abajo). Como resultado, las sucesivas posiciones del flujo húmedo organizado por la depresión (sombreado, derecha) son muy distintas y la lluvia, también (sombreado, izquierda). Figura presentada por Romero, Ramis y Alonso en la Conferencia Plinius 2001 [24].

Si bien en algunos casos el factor orográfico, es decir, el más predecible, puede ser clave en la formación de la depresión asociada a lluvia fuerte y, por tanto, en la formación y localización de esa lluvia (ver, por ejemplo, el caso de 3-4 de noviembre de 1987, cap. 44 en la página 655), en otros eventos ocurre precisamente lo contrario. Romero [24], por ejemplo, puso de manifiesto como en el episodio de final de septiembre de 1994, son los elementos de la circulación en altura los que más claramente determinan la forma y situación de una pequeña depresión mediterránea que, a su vez, está asociada a lluvia fuerte (ver Figura 32.6). La capacidad de predicción de los detalles de la circulación en altura no tiene por qué ser peor en el Mediterráneo que en otros lugares, pero la mayor presencia de fenómenos convectivos y su sensibilidad a los cambios de circulación hace que la predicción final, de la localización e intensidad de la lluvia en particular, sea más incierta que en el área atlántica.

32.2.2 Vientos fuertes

La compleja orografía mediterránea hace que muchos de los vientos intensos que ocurren en la región tengan un despliegue territorial y unas características físicas frecuentemente repetitivos, lo que explica que, igual que en otras regiones del mundo con climas característicos, los vientos en este caso mediterráneos hayan adquirido nombres propios, con variantes entre una lengua y otra (*tramontana*, *mistral-mestral*, *cierzo*, *lebeche-llebeig*, etc.). A gran escala, el viento está organizado por los grandes sistemas de presión y, según el estudio de Nissen y col. [16], cabe decir que los vientos fuertes mediterráneos están casi siempre asociados a depresiones importantes, intensas, frecuentemente internas a la región pero algunas veces externas (atlánticas o europeas). A pequeña escala, no obstante, las alteraciones de presión inducidas por la orografía regional modulan la distribución y la intensidad de los

vientos, al generar aumentos y disminuciones locales de los gradientes béricos.

Para poner un ejemplo paradigmático, con un flujo general del norte (normalmente asociado a una depresión importante, situada hacia el golfo de Génova o en el mar Tirreno), se genera un dipolo orográfico de presión a través de los Pirineos, con anomalía positiva de presión al norte de la cadena montañosa (a barlovento) y anomalía negativa al sur (a sotavento). Ese dipolo supone un fuerte aumento del gradiente de presión en el extremo nororiental de los Pirineos, sobre tierras francesas, donde los vientos (del noroeste) aceleran rápidamente.

Ese viento gira luego a norte, perdiendo velocidad paulatinamente desde su máximo en el golfo de León, frente al cabo de Creus, y alcanza las Balears con rela-

tiva frecuencia. -Dicho flujo desde el Rosselló a Illes Balears pasando por l'Empordà, es la *tramontana*, que hacia el golfo de León confluye con el mistral que baja por el valle del Ródano. El conjunto forma el sistema *mistral / tramontana*, que es el sistema de vientos fuertes más importante del Mediterráneo, por frecuencia y por intensidad (ver más detalles, por ejemplo, en Jansà [12]).

El mecanismo de aceleración o modulación local de la tramontana propicia el establecimiento de una línea definida de separación entre el dominio del viento fuerte (al este) y una zona de resguardo, con poco viento, al oeste. Esa línea, llamada línea de *cizalladura de la tramontana*, arranca desde el extremo oriental de los Pirineos, apuntando hacia el sur o hacia el suroeste, en una orientación final que depende de la distribución detallada de las presiones en la zona marítima.

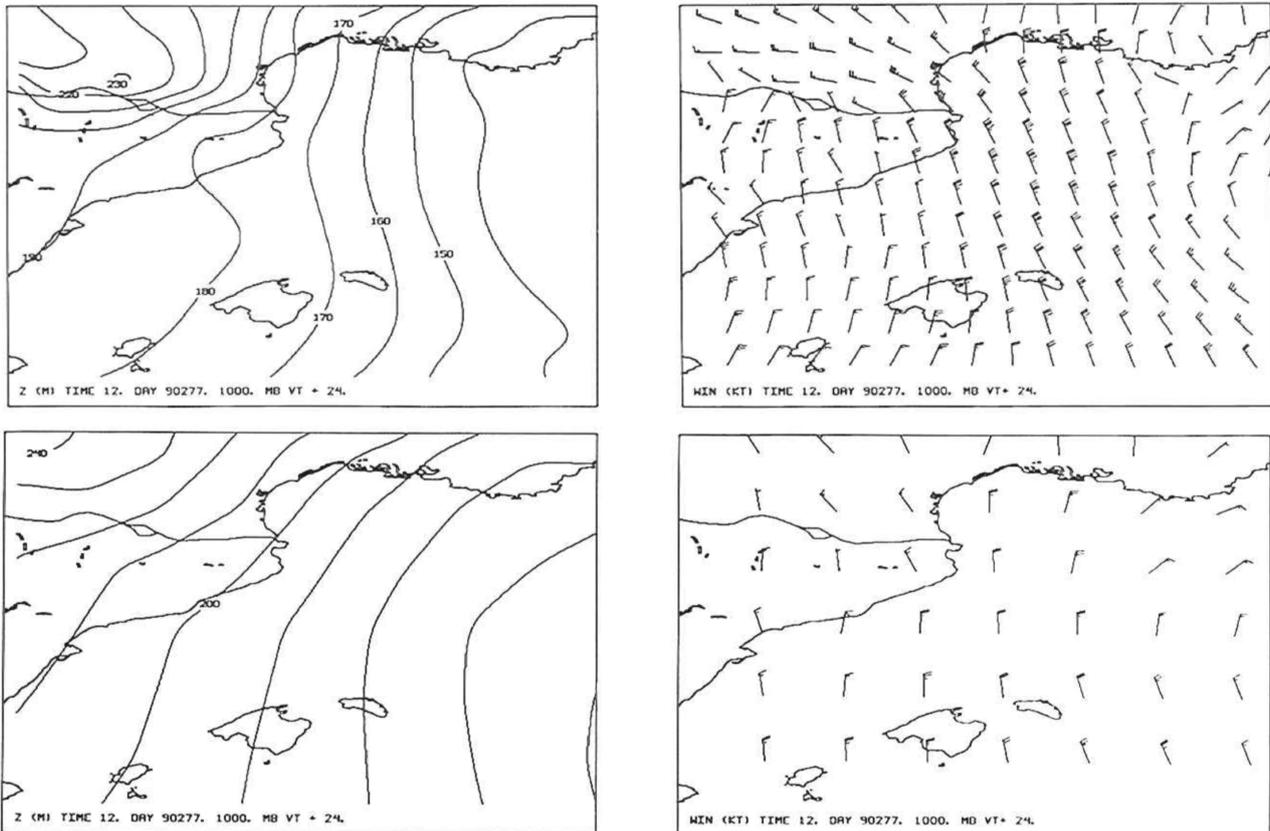


Figura 32.7: Simulaciones con el modelo INM-LAM del geopotencial y viento a 1000 hPa para día 5 de octubre de 1990 a las 12 UTC (PYREX IOP-1), a $0,91^\circ$ lat/lon de resolución (arriba) y a $0,455^\circ$ (abajo). A la resolución más baja, casi no se aprecia influencia de la orografía sobre las presiones (o geopotenciales) y el viento sostenido no pasa de 25 kts, mientras que a $0,455^\circ$ ya se aprecia dipolo orográfico a través de los Pirineos y el viento sostenido alcanza 35 kts; el viento sostenido medido en la zona de máximo fue de 45 kts. De Campins y col. [4].

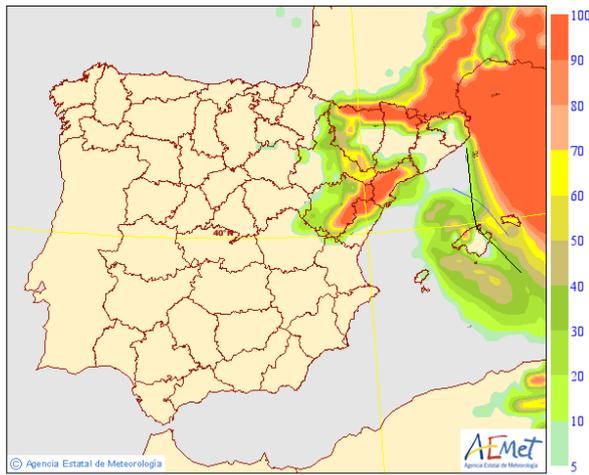


Figura 32.8: Predicción a 48 h de la probabilidad de rachas de viento superiores a 70 km/h, para día 7 de marzo de 2017, según el ECENS (ver texto para detalles). Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) 2017.

En el valle del Ebro, por su parte, la parte negativa del dipolo orográfico inducido por los Pirineos genera un gradiente de presión adicional a lo largo del valle, acelerándose el viento del noroeste (el *cierzo*), que con frecuencia llega a expandirse hasta la misma línea costera o más allá, sobre el mar, como *mestral* o *cerç*.

Los efectos orográficos de los Pirineos sobre la tramontana (aceleración, línea de cizalladura, etc.) se hacen evidentes en experimentos numéricos [4]. En ese estudio, ya un poco antiguo, al duplicar la resolución del modelo usado (de $0,91^\circ$ lat a $0,455^\circ$ lat), se genera (aunque un poco débilmente) el dipolo orográfico, aumenta la velocidad del viento en la zona de máximo (de 25 a 35 nudos de viento sostenido) y queda marcada (insuficientemente, todavía) la línea de cizalladura, invisible en la simulación a más baja resolución (ver la Figura 32.7 en la página anterior). En esos experimentos es el aumento de la resolución horizontal y, por tanto, de la altura media de las cordilleras, el factor responsable de reforzar los efectos orográficos, haciéndose éstos más realistas.

Con los modelos actuales, de alta resolución, no resulta problemática la predicción de las grandes depresiones de Génova y de los efectos orográficos, incluso los de pequeña escala y, por tanto, se suele recoger bastante bien la irrupción e intensidad del sistema mistral / tramontana. En la actualidad ya se sabe, con bastante certeza, cuándo va a entrar un mistral / tramontana fuerte y la violencia que podrá alcanzar aproximadamente.

Sin embargo, los detalles en la posición del límite del mistral / tramontana hacia el sur, hacia Balears, pueden mantener un notable grado de incertidumbre, debido a que esos aspectos dependen de la distribución de la presión a pequeña escala sobre zonas ya poco influenciadas por la orografía. Puede decirse que a veces se hace difícil prever categóricamente si la tramontana fuerte afectará a aguas balears o no. En esos casos no hay más remedio que acudir a la predicción probabilista, basada en predicción por conjuntos, para dilucidar lo que puede ocurrir, no para dar una predicción determinista, que podría ser completamente errónea. Véase el ejemplo ilustrado en la Figura 32.8: la línea fina negra indica el límite occidental de la máxima extensión posible del mistral / tramontana fuerte (que es viento del norte en Illes Balears). La línea azul indica el límite oriental de la máxima extensión posible del mestrall (viento del noroeste en Illes Balears). Véase que el límite del mistral / tramontana está muy definido, sin apenas dispersión, en la zona más cercana al límite oriental de los Pirineos, mientras que la predicción probabilista se abre en forma de abanico hacia el sur. Menorca en este caso tiene casi tanta probabilidad de quedar fuera como dentro del dominio de la tramontana fuerte. De usar predicción determinista el riesgo de errar sería muy grande. El SPC no corrige el problema, pero advierte del mismo claramente.

En la extensión geográfica y reforzamiento de otros vientos intensos mediterráneos, como el *ponent* de la zona de València o el *llevant* de Catalunya, también intervienen perturbaciones de presión a pequeña escala, modulando el viento. Esas perturbaciones pueden incluso ser depresiones cerradas, bien conformadas. Las perturbaciones de presión a pequeña escala pueden ser resultado de factores orográficos evidentes, siendo entonces bastante previsibles, y por ende la distribución e intensidad de los vientos asociados, o bien pueden responder a otros mecanismos, con lo que baja la predecibilidad del flujo local. En el segundo caso, la importancia que tienen las estructuras dinámicas de pequeña dimensión en el Mediterráneo hace que la predicción determinista de los vientos fuertes se haga particularmente difícil. Habrá casos, como es lógico, en los que factores orográficos y los de otro tipo (p.e. baroclínico, diabático) aparezcan mezclados. Entonces se hace difícil saber hasta dónde puede alcanzar nuestra capacidad de predicción razonable. En la Figura 32.9 en la página siguiente se muestra un ejemplo reciente: se trata de un temporal de componente oeste en el mar balear.

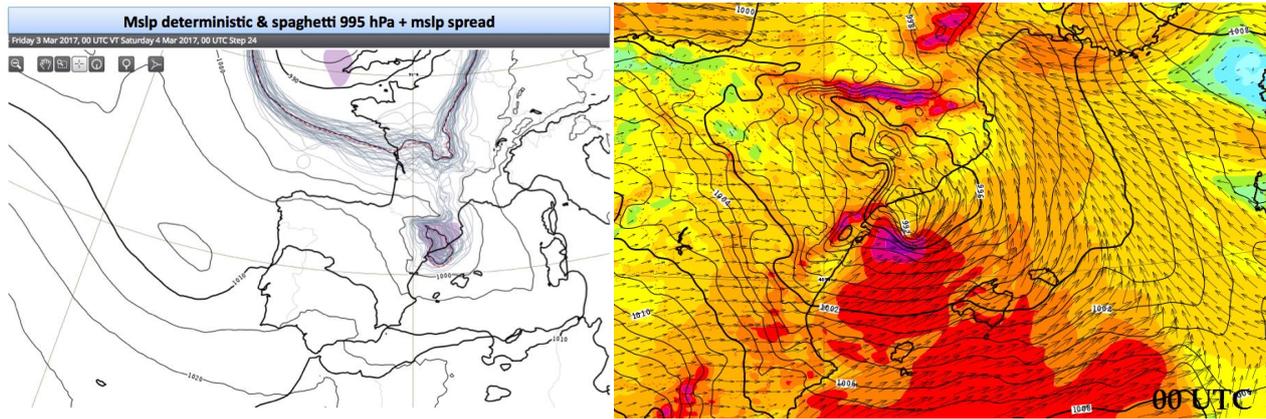


Figura 32.9: Predicción del Centro Europeo, a 24 h, para día 4 de marzo de 2017, determinista y probabilista (izquierda) y determinista detallada (derecha). Figuras cedidas por ANTONIO GARCÍA MÉNDEZ y por EN BABIA @Las_Quimbambas.

La predicción del Centro Europeo, tanto determinista como probabilista, por conjuntos, para el día 4 de marzo de 2017 a las 00 UTC, no deja lugar a dudas sobre la formación de una depresión pequeña, centrada hacia Catalunya, que actúa incrementando el gradiente de presión y, por tanto el viento, en la zona. Hay dispersión entre los miembros del conjunto, manifestada por la relativa amplitud del «haz de espaguetis» de la isobara de 995 hPa, de modo que la baja y el temporal van a existir, pero los detalles más finos predichos para la distribución de presión y viento no están garantizados. Eso es lo que se ve en la parte izquierda de la Figura 32.9. Puestos en escena resulta imposible asegurar, por tanto, que se vayan a cumplir los detalles más pequeños que se ilustran en el panel de la derecha (que es la predicción determinista representada con resolución máxima), tales como el máximo puntual de gradiente bórico y viento próximos a la desembocadura del Ebro. De hecho, en la boya de Dragonera, al suroeste de Mallorca, se registraron, el día 4 a las 00 UTC, vientos sostenidos de 17 m/s (temporal), con oleaje de casi 6 metros de altura significativa, si bien pocos detalles adicionales de observación sobre el mar se pueden aportar para este evento.

32.2.3 Convección organizada. Medicanes

Durante el otoño pero también en cualquier época del año salvo, quizás, la primavera tardía y parte del verano, es fácil que la atmósfera mediterránea presente inestabilidad condicional o convectiva (sec. 6.2.5 en la página 75). Ello puede dar lugar a la formación frecuente de chubascos y tormentas más o menos dispersos, de día y también de noche, tanto sobre áreas terrestres como marítimas. Son muy ilustrativos, en

este sentido, los mapas de distribución de rayos, mensuales o estacionales [20]. En el interior de la península ibérica es difícil que haya tormentas durante el invierno y parte de otoño; en el Mediterráneo, no tanto. En la península la convección es más bien primaveral y estival, mientras que en el Mediterráneo, es preferentemente otoñal. En determinadas circunstancias la convección, no sólo la mediterránea, es capaz de organizarse, dando lugar a la formación de agrupaciones de tormentas incluso de grandes *sistema convectivo de mesoescala (SCM)*. En ocasiones éstos pueden ser casi estacionarios, siendo responsables de algunas de las lluvias mediterráneas más copiosas; ése es el caso, por ejemplo, del superrécord de lluvia de Oliva-Gandía, del 3-4 de noviembre de 1987, cap. 44 en la página 655, referenciado en otros capítulos de este libro. En cualquier caso, los SCM duran mucho más que una tormenta ordinaria y, por tanto, pueden aportar más lluvia durante su ciclo de vida.

En un SCM hay una compleja interacción entre células convectivas viejas y nuevas, con un resultado final que, en superficie, muchas veces incluye una zona de aire relativamente frío y con presión alta, flanqueado por un frente de salida caracterizado por fuertes vientos divergentes.

Que la convección se organice o no en SCM a veces depende de pequeños detalles del ambiente convectivo, de sutilezas, se podría decir. Aparte de que debe haber inestabilidad condicional o convectiva y cizalladura vertical suficiente (cap. 6.2.5 en la página 75, vientos fuertes en altura, en comparación de los que hay a bajo nivel), para formar un SCM hace falta un flujo continuado y suficiente que alimente al sistema con aire inestable, como ya se ha destacado al describir las lluvias fuertes mediterráneas en general.

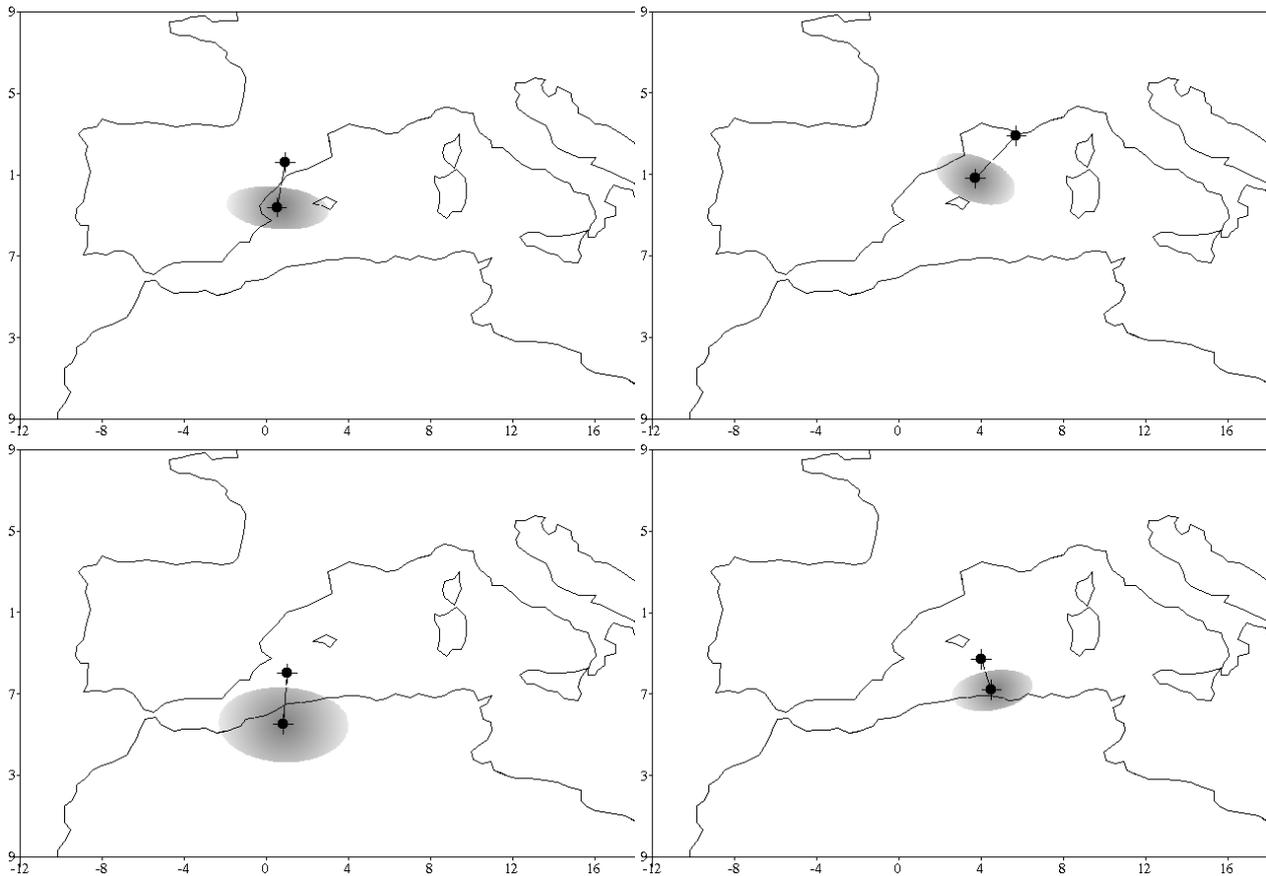


Figura 32.10: Como en la Figura 32.4, las elipses indican la localización mayoritaria de depresiones simultáneas a la formación de SCM (en este caso) en las zonas cuyo centro es el punto sin elipse. De JANSÀ Y COL. [14].

Y también hace falta un mecanismo eficiente de disparo, de inicio de la ascendencia, necesaria para desencadenar la liberación de la energía convectiva. La ascendencia inicial puede estar generada por la orografía que rodea la cubeta mediterránea, bien directamente, por elevación mecánica sobre las pendientes, o a través del bloqueo del aire a barlovento, particularmente si éste es frío, procedente de las descargas de tormentas previas. Una depresión o centro de baja presión, incluso de poca entidad, puede proporcionar, por sí misma, todo los ingredientes necesarios, incluida alguna zona de convergencia en nivel bajo que fuerce la ascendencia. En base al catálogo de SCM elaborado en AEMET [23], se pudo constatar que en el 71 % de los casos de SCM en el Mediterráneo hay una depresión adecuadamente situada, como en el modelo conceptual de lluvia fuerte (Figura 32.10).

En casos de estudio seleccionados, los experimentos numéricos han demostrado que pequeños cambios en las condiciones iniciales generan (o no) convergencias y ascensos iniciales, o los sitúan en un lugar u otro. Aunque el refinamiento y sofisticación de los

modelos es cada vez mayor y resulta ya factible simular SCM realistas por vía determinista, en particular desde que los modelos no necesitan parametrizar la convección sino que la resuelven explícitamente, a menudo queda un margen de duda en el resultado de la predicción. Eso hace totalmente aconsejable usar predicción por conjuntos para dilucidar la predecibilidad del caso convectivo y la confianza que se puede asignar a la veracidad futura de un SCM simulado. La Figura 32.11 en la página siguiente muestra un caso reciente de SCM bien previstos, como indica la imagen de satélite. Antes de la verificación no había manera de asegurar que la predicción se iba a cumplir, y sin SPC el grado de incertidumbre era desconocido.

Un modo de organización de la convección completamente distinto al de los SCM es la formación de una pequeña depresión, intensa, con semejanza estructural a los ciclones tropicales. A esas pequeñas depresiones o ciclones mediterráneos de características casi-tropicales se les ha venido llamando *medicanes* (de Mediterranean hurricane).

HARMONIE 18-07-2015 00Z Previsto para el Sab. 18 a las 16Z

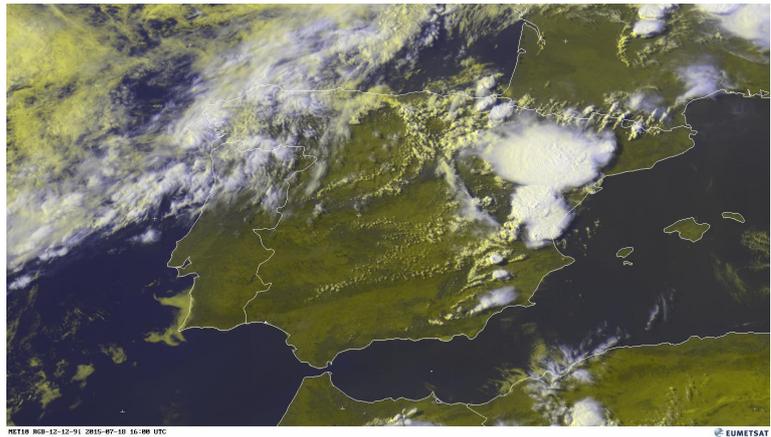
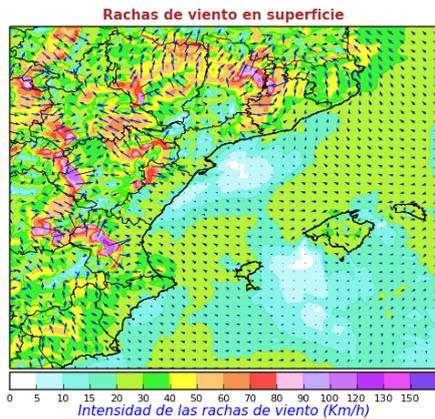


Figura 32.11: La previsión de rachas máximas de viento dada por el modelo, experimental en ese momento, HARMONIE (AEMET, sec. 20.4 en la página 310) muestras frentes de salida con rachas de más de 80 km/h en Catalunya y en el interior peninsular, por ejemplo. La situación es completamente compatible, hora por hora, con el desarrollo de SCM dada por la imagen de satélite. La predicción de SCM es posible, pero insegura.

Un caldo de cultivo apropiado para la formación de un medicane sería un ambiente termodinámicamente inestable (condicional o convectivamente), con convergencia suficiente de vientos en superficie, proporcionada, por ejemplo, por una baja previa. Además, debe haber poca o nula cizalladura vertical del viento. Dichas condiciones se ven favorecidas con una superficie del mar caliente (en relación al aire) y una baja fría en altura que ya haya alcanzado su estado maduro, es decir, sin apenas desarrollo aunque con reflejo en superficie [7]. En tales ambientes se pueden estar formando tormentas sobre la zona ciclónica de convergencia en torno a la baja previa. El calor de condensación puede concentrarse en la zona de esta baja previa, lo que generará caída adicional de presión. Esa caída de presión, o intensificación de la baja, aumentará la convergencia, la formación de tormentas en una zona cada vez más cerrada en torno al centro ciclónico y así sucesivamente, como en una reacción en cadena. Además de factores como la cizalladura vertical del viento (que debe ser poca), la coexistencia de una troposfera bastante húmeda en todos los niveles, la disponibilidad de masas de agua con gran potencial de evaporación y el suministro continuo y vigoroso de calor latente que se pueda liberar en los procesos de condensación, son ingredientes críticos para que un medicane se pueda llegar a formar. Y en consecuencia lo son también para que un modelo numérico anticipe su formación con suficiente habilidad (destreza, pericia, skill, sec. 15.2.4 en la página 212) espacial y temporal.

Lo pronosticado y sucedido desde el 30 de septiembre

de 2015 y días siguientes es ilustrativo de las ambigüedades que pueden presentarse en condiciones como las que hemos descrito y del más que delicado balance entre ingredientes que parece regir la concatenación de procesos que hacen posible la formación de un medicane. Los paneles superiores de la Figura 32.12 en la página siguiente presentan sucesivas predicciones, todas para el día 2 de octubre a las 18 UTC (modelo HIRLAM-AEMET, sec. 20.3 en la página 310), a 66 horas (izquierda), 42 horas (centro) y 18 horas (derecha). A 66 y 42 horas parecía claro que se iba a formar un medicane hacia el oeste de Córcega ese día y hora. A 18 h ya no aparecía la predicción del medicane. En cambio, el día 1 hacia las 12 UTC sí parece que hubo medicane, al oeste de Cerdeña, como parece evidenciar la imagen de satélite del día 1 a las 12 UTC (ver Figura 32.12 en la página siguiente) así como el dato de presión de 1002 hPa registrado en la costa oeste de Cerdeña. Los mapas previstos a 36 y 12 horas (panel inferior de la Figura 32.12 en la página siguiente, izquierda y centro), daban depresión, pero con una presión no tan baja. Esta vez se pronosticó y observó lo que parece ser un medicane, pero no se observó ni en el lugar ni en el momento en que se había previsto. Por la experiencia de otros casos, puede afirmarse que las predicciones deterministas para ese tipo de fenómenos (de muy pequeña escala y fuertemente arraigados en las parametrizaciones físicas del modelo) son manifiestamente inciertas. Las basadas en SPC también lo son, pero al menos pueden aportar alguna información sobre el grado de incertidumbre de la predicción.

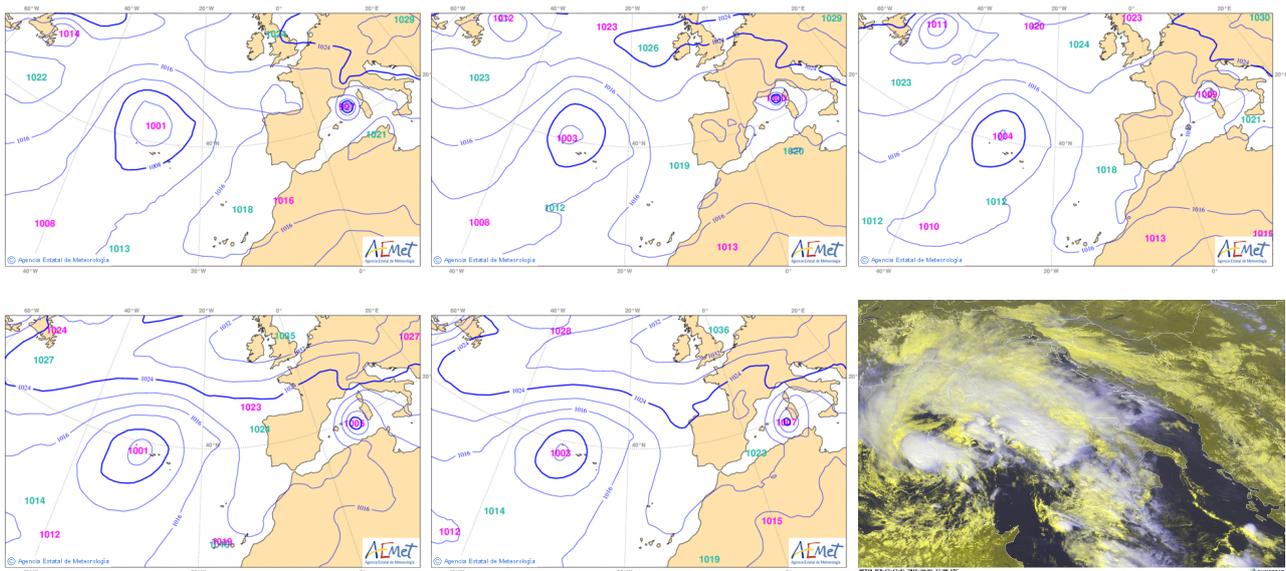


Figura 32.12: Arriba: predicciones HIRLAM-AEMET sucesivas (a 66, 42 y 18 h) para día 2 de octubre de 2015 a las 18 UTC. Parecía claro, salvo 18 h antes, que se iba a formar un medicane hacia esa hora. Abajo: predicciones a 36 y 12 horas para día 1 de octubre a las 12 UTC: se esperaba una baja, pero no tan pronunciada como un medicane, y en realidad parece que sí se formó medicane. La imagen de satélite de día 1 a las 12 UTC parece indicarlo y, además, la presión observada en el oeste de Cerdeña disminuyó hasta 1002 hPa, un valor bastante más bajo que el previsto.

32.3 Retos del uso de SPC para el Mediterráneo

Es evidente que el constructo que fundamenta la predicción por conjuntos en el Mediterráneo occidental no es diferente de las teorías revisadas en los capítulos 12 en la página 155 y 13 en la página 165. La llamada *dinámica estocástica no lineal* hace uso de ecuaciones diferenciales estocásticas que gobiernan la evolución de variables aleatorias continuas que cuantifican la información sobre el estado de un sistema. EHRENDORFER [6] y PENLAND [19] describen la adaptación de este marco teórico general a la predicción meteorológica y climática. En este paradigma, las variables que describen la evolución atmosférica en el Mediterráneo deben expresarse en términos de funciones de densidad de probabilidad (*PDF*, del inglés *probability density function*, sec. 12.3 en la página 159 y 13.6.11 en la página 187), las cuales aglutinan toda la información disponible sobre el valor de la variable. Por ejemplo, cuando hacemos una lectura de temperatura sobre un termómetro, esa medida incorpora un error, las características del cual dependen del instrumento y de las condiciones de observación. El valor determinista real de temperatura sigue siendo estrictamente desconocido, aunque poseemos una información valiosa respecto de ese valor: la lectura observacional y las características de su error. Cualquier uso que hagamos de la temperatura observada debe ser en términos de una variable

aleatoria y continua, y el elemento matemático que aglutina esa información es una distribución de probabilidad (de los posibles valores de la temperatura en el punto de medida). Este formalismo probabilista toma especial relevancia en un dominio geográfico como el Mediterráneo, donde la caracterización precisa del estado físico de la atmósfera está sujeta a los desafíos singulares descritos en las secciones anteriores. En ocasiones dicha caracterización no es más que una quimera ante las actuales tecnologías observacionales, con el consiguiente efecto sobre la incertidumbre del estado de la atmósfera. Las estrategias de generación e interpretación que resuelvan el reto de la predicción meteorológica en el área mediterránea de España deben definirse en el marco general de la teoría de la probabilidad. Así pues, el uso de distribuciones de probabilidad para la representación de los campos atmosféricos constituye el formalismo natural e ineludible para la incorporación de las incertidumbres del sistema.

Una vez asumido el uso de variables aleatorias continuas para representar cuantitativamente el estado atmosférico, debemos ocuparnos de la necesidad de modelar su evolución temporal con fines predictivos. En este sentido, la *ecuación de LIOUVILLE* (sec. 13.1 en la página 171) describe la evolución temporal de un sistema descrito por variables aleatorias continuas. Sin embargo, nuestra capacidad de modelar la evolución atmosférica es limitada, incluso aunque pudiésemos

llegar a tener un conocimiento exacto (sin incertidumbres) de su estado instantáneo. La ecuación general que combina la *ecuación de LIOUVILLE* (sec. 13.4 en la página 171) con las fuentes de error e indeterminación presentes en nuestros modelos de la atmósfera es la *ecuación de FOKKER-PLANCK* (sec. 13.4 en la página 171), que debería particularizarse para la dinámica atmosférica y constituir la base de la predicción numérica del tiempo, y muy especialmente en el Mediterráneo occidental. Lamentablemente, no se conocen hoy en día las ecuaciones estocásticas primitivas atmosféricas ni tampoco métodos directos de solución de la *ecuación de FOKKER-PLANCK* (sec. 13.4 en la página 171). En consecuencia, se usan versiones muy simplificadas y discretas de ese formalismo, tomando un número de muestras finito tanto de las *PDF* que describen el estado atmosférico como de los términos estocásticos que incluye su modelado. Estos son los *Sistemas de Predicción por Conjuntos* (SPC), introducidos en los capítulos 12 en la página 155 y 13 en la página 165.

Es la elección concreta del método de muestreo la que definirá el diseño de cada SPC. A la postre, un SPC es una colección de predicciones individuales realizadas a partir de campos iniciales o de contorno y/o formulaciones del modelo compatibles con nuestro conocimiento del estado y evolución atmosféricos. Esta colección de predicciones (muestra estadística de posibles escenarios de predicción) debe generarse de acuerdo con las incertidumbres del sistema que más afectan a los fenómenos de interés regional. Por ejemplo, de acuerdo con las consideraciones discutidas en las secciones anteriores, no tendría mucho sentido priorizar en el Mediterráneo el muestreo de incertidumbres originadas en la microfísica del hielo antes que aquellas asociadas a la convección húmeda, la temperatura de la superficie del mar o a la dirección e intensidad de los vientos superficiales.

Así pues, un SPC puede describirse como el sistema práctico o pragmático que se usa hoy en día para simular la evolución de la distribución condicional de probabilidad de un pronóstico meteorológico.

32.3.1 Métodos experimentales de generación de SPC en el Mediterráneo occidental

La opción más directa a la hora de diseñar un SPC de área limitada de alta resolución sobre el Mediterráneo es la importación de la diversidad generada por un sistema global como el del ECMWF (ECENS, sec. 19.3 en la página 293), dando lugar, de hecho, a una predicción *reescalada* de la predicción global. A pesar de que este diseño puede dar buenos resultados para episodios concretos, elude importantes fuentes de error de la mesoescala y la escala local, lo cual obliga a explorar métodos específicos de generación. En un intento por diseñar un SPC capaz de adaptarse a la fenómenos adversos previstos, HOMAR Y COL. [9] y Romero y col. [27] exploraron la posibilidad de usar métodos tangentes adjuntos lineales para generar perturbaciones selectivas, diseñadas para producir una predicción probabilista optimizada sobre una zona y parámetros de interés. Brevemente, el método consistía en la identificación por parte de predictores operativos expertos de los sistemas atmosféricos de mayor interés en la predicción del día, y la posterior perturbación de las condiciones iniciales del modelo en aquellas áreas más influyentes para la génesis o evolución posterior de dichos sistemas. Este ambicioso y persuasivo método no arrojó resultados satisfactorios. El hecho de basarse en la hipótesis de linealidad de la evolución de las perturbaciones, provocaba severos desajustes entre el impacto esperado de éstas y el finalmente obtenido a través del modelo estándar de predicción no lineal, lo cual dañaba el objetivo de generación selectiva de que las perturbaciones incidieran sobre el aspecto de interés de la predicción.

La **vorticidad potencial** es una magnitud escalar que se conserva bajo evoluciones adiabáticas y libres de fricción y que mide la vorticidad relativa que adquiriría una porción de aire tras una evolución de este tipo al someterse a una estratificación vertical y latitud determinadas. Es una magnitud muy usada en meteorología sinóptica al conservarse para movimientos de gran escala y por existir una ecuación de invertibilidad que permite obtener campos de masa y viento a partir de una distribución tridimensional de PV [10]. Su condición de campo escalar y su papel de descriptor de campos como la temperatura y el viento la convierten en una variable muy atractiva para el estudio y predicción de la escala sinóptica atmosférica.

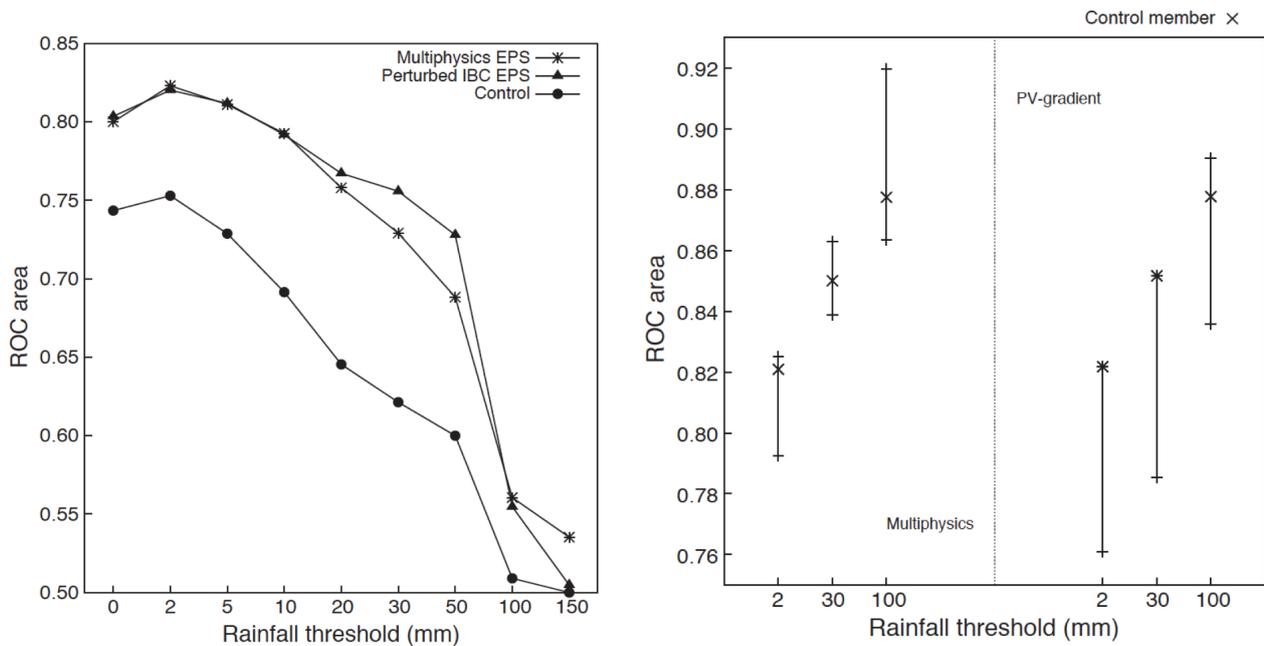


Figura 32.13: Probabilidad de que el sistema SPC destaque zonas que reciben precipitación acumulada en 24 h por encima del umbral, frente a zonas que no reciben precipitación por encima del umbral (Área bajo la curva ROC, sec. 15.9.6 en la página 231). Resultados obtenidos para 19 casos de lluvias intensas en el Mediterráneo occidental. Izquierda: Valores medios. Las curvas demuestran la mayor capacidad de los sistemas SPC frente al sistema determinista («Control»). Para umbrales bajos de precipitación, el SPC multifísica y el basado en climatología de error de PV son indistinguibles; para umbrales moderados, el SPC basado en la PV muestra mejores capacidades; mientras que para umbrales extremos, el SPC multifísica genera mejores predicciones. Derecha: Rango de valores obtenidos entre los 19 casos. El método de perturbación por medio de PV muestra carencias en los valores extremos frente al método multifísica de generación de SPC. De VICH Y COL. [29].

Otra interesante idea surgida de la intención de hallar un método versátil de perturbación de condiciones iniciales en sistemas de predicción de mesoescala fue la de estimar el rango de incertidumbres del día a partir de una climatología de errores. VICH Y COL. [29, 30] plantearon la astuta idea de generar perturbaciones en las condiciones iniciales a partir de un campo director desde el punto de vista dinámico como es la *vorticidad potencial* (PV), ver cuadro gris previo. Aunque aplicable a cualquier región del mundo, el método parte de una climatología de errores de intensidad y localización de estructuras de PV sobre la región Mediterránea. Las perturbaciones se forjan a través del muestreo aleatorio de la climatología de errores de PV, y permite generar un número cualquiera de perturbaciones diferentes e independientes entre sí. La técnica produce buenos resultados sobre casos mediterráneos de precipitación suave y moderada, aunque muestra limitaciones frente a otros sistemas que incorporan diversidad en las parametrizaciones físicas a la hora de predecir acumulaciones extremas (Figura 32.13).

La cruzada por encontrar un método óptimo de generación de SPC para la escala regional que dé respuesta a

las necesidades de predicción en un entorno tan densamente poblado y a la vez meteorológicamente singular como el Mediterráneo, ha llevado a plantear el reto de la predicción meteorológica de una forma integral. Ello significa incorporar al problema de la predicción la fase de definición del estado de la atmósfera (análisis) a través del llamado proceso de asimilación de datos (secs. 10.3 en la página 133 y 16.1 en la página 244).

Uno de los ejemplos más claros del hecho diferencial de la región Mediterránea respecto a otras zonas del mundo es la gran densidad de población en sus zonas ribereñas. La predicción del tiempo de alto impacto sobre islas y zonas costeras que miran a un mar relativamente grande supone un desafío notablemente mayor que la predicción en territorios bien cubiertos por las observaciones. Los sistemas de observación que presentan grandes regiones vacías de medidas *in situ*, como son las áreas marítimas, afectan de forma crítica a la capacidad de determinar con precisión suficiente el estado de la atmósfera. Estructuras y detalles importantes en los campos de temperatura, viento, humedad o nubosidad son omitidas con frecuencia en los

análisis meteorológicos, provocando errores cruciales en la predicción de fenómenos extremos costeros. En los últimos 40 años, se han desarrollado métodos cada vez más avanzados para incrementar nuestra capacidad de diagnosticar el estado atmosférico a partir de una gran cantidad de «nuevas» observaciones realizadas *in situ*, en particular las suministradas por instrumentos de teledetección como los radiómetros a bordo de satélites o los radares meteorológicos.

Uno de los avances más importantes del último siglo en la definición precisa del estado la atmósfera ha sido la adopción de sistemas de asimilación de datos, y en particular de métodos de asimilación por conjuntos. La asimilación de datos es un método que permite combinar predicciones y observaciones de una ma-

nera óptima para obtener una estimación del estado de la atmósfera mejor que la ofrecida por las predicciones recientes o incluso las propias observaciones. De hecho, la estimación del estado atmosférico sobre la malla numérica generada por un sistema de asimilación optimizado está, en términos de una norma matemática concreta, más cerca de la realidad que las predicciones o las observaciones. Se han propuesto una gran cantidad de métodos para combinar todas las fuentes de información de que se dispone en el momento de representar cuantitativamente el estado de la atmósfera. Los sistemas de asimilación por conjuntos permiten compatibilizar la asimilación de datos con la descripción probabilista del estado de la atmósfera, señalada a lo largo de este libro.

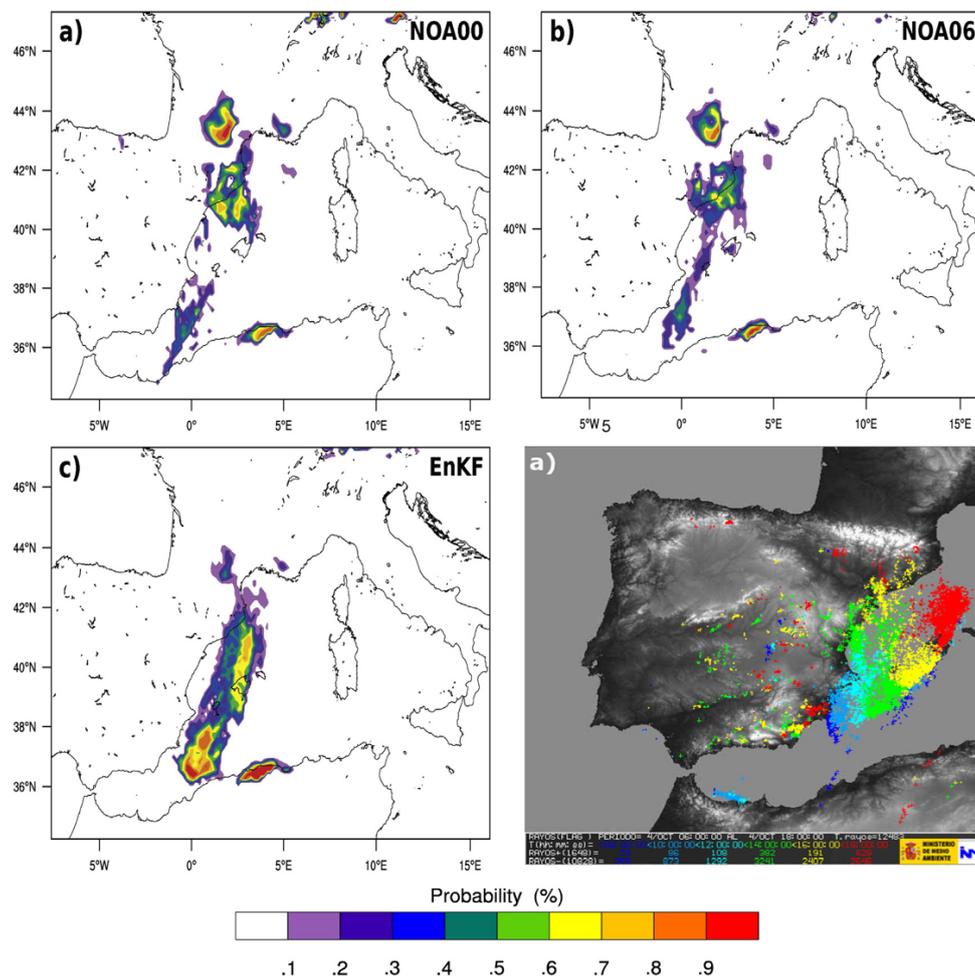


Figura 32.14: Paneles a, b y c: Probabilidad de ocurrencia de tiempo severo entre las 06 y las 18 UTC del día 4 de octubre de 2007 predicha por SPC sin asimilación de datos (paneles a y b) y con asimilación de datos convencionales adquiridos *in-situ*. El panel d muestra la actividad eléctrica para el día 4 de octubre, revelada por la red de detección de rayos de la AEMET. La consecuencia de asimilar datos, fundamentalmente de estaciones terrestres, es la de posibilitar una mejor descripción de los campos iniciales del modelo y por ende, una mejor predicción del episodio de línea de turbonada sobre el mar. De CARRIÓ Y HOMAR [5].

Los sistemas de asimilación, y en particular los de asimilación por conjuntos, tienen dos ventajas claras cuando se incorporan a los esquemas de predicción diseñados para la región Mediterránea. Por una parte, permiten explotar de manera simple las ligaduras físicas que existen entre variables a distancias remotas. Ello permite estimar el estado de la atmósfera sobre zonas deficientemente cubiertas por los sistemas actuales de observación. Así pues, un sistema de asimilación permite utilizar relaciones estadísticas de covarianza y correlación (sec. 16.2.2 en la página 246) para determinar, a partir de medidas fiables tomadas en zonas terrestres, el valor de magnitudes como la temperatura, la fuerza y dirección del viento o la humedad, sobre zonas marítimas no observadas. Ello tiene un impacto directo extraordinario sobre la calidad de las predicciones de fenómenos costeros iniciados sobre el mar. La segunda ventaja del uso de sistemas de asimilación por conjuntos proviene de su aplicación cíclica, pasos de asimilación seguidos de pasos de corta predicción, lo cual produce la transferencia de información valiosa a través de las ecuaciones del modelo desde zonas adecuadamente observadas (típicamente terrestres) hacia zonas deficientemente muestreadas (típicamente marítimas). CARRIÓ Y HOMAR [5] demuestran el efecto de estos dos factores y los beneficios del uso de estas técnicas de asimilación para el caso de la línea de turbonada originada sobre el mar de Alborán y que barrió las Pitiüses y la isla de Mallorca la tarde del 4 de octubre de 2007 (Figura 32.14 en la página anterior). Estudios previos demuestran la incapacidad de modelos deterministas de simular la línea de turbonada debido a la presencia de errores en los campos iniciales en la definición de estructuras de viento en niveles bajos sobre la zona marítima, importantes para la formación del sistema convectivo. El simple reescalado de sistemas SPC globales anteriormente mencionado no resuelve el problema de predecibilidad, y no es hasta que se realiza una asimilación de datos con frecuencia horaria que las condiciones iniciales contemplan una zona de flujos convergentes sobre el mar de Alborán y la predicción probabilista arroja probabilidades de ocurrencia de tiempo severo a lo largo de la trayectoria de la línea de turbonada observada (Figura 32.14 en la página anterior).

32.4 Aplicación de SPC para la predicción de inundaciones

El Mediterráneo español es una región especialmente afectada por inundaciones súbitas («*flash floods*» en inglés), las cuales ocurren con mayor frecuencia a finales del verano y principios del otoño. Se producen al persistir durante varias horas grandes cantidades de precipitación sobre una misma cuenca caracterizada por un perfil orográfico abrupto. Esta persistencia se asocia a menudo a la prominente orografía circundante, que ancla los sistemas convectivos de mesoescala hasta el punto de convertirlos en cuasi-estacionarios. Tal y como se discute al principio de este capítulo, el factor orográfico mediterráneo supone en principio un elemento positivo para la predecibilidad que ofrecen los modelos actuales de predicción del tiempo. Sin embargo, las características meteorológicas y geográficas de la región, con un mosaico de cuencas costeras de pequeño a mediano tamaño y densamente urbanizadas, no solamente añaden exigencia a los sistemas de predicción meteorológica sino que reducen drásticamente los tiempos de respuesta hidrológica y por consiguiente aumentan los riesgos de inundaciones severas. Además, la mayoría de cauces se secan durante el verano, exacerbando las dificultades de la predicción y magnificando los daños inesperados.

En consecuencia, la comunidad científica dedica esfuerzos especiales a investigar la predicción de precipitaciones intensas y la modelización hidrológica de sus efectos. En este sentido, la consideración de los parámetros atmosféricos como variables aleatorias con una distribución de probabilidad debe igualmente transferirse al sistema de predicción hidrológica. La combinación de un sistema de predicción meteorológica y un sistema de predicción hidrológica resulta en un sistema integral de predicción hidrometeorológica, que tiene en el campo de precipitación (probabilista) el nexo de unión principal entre cada subcomponente del sistema global de modelización. Más allá de los factores mencionados que limitan la predecibilidad atmosférica, la acometida de predecir episodios hidrometeorológicos severos impone unos requisitos sobre los campos de precipitación previstos que ningún sistema de modelización actual puede cumplir con garantías para alcances de predicción útiles.

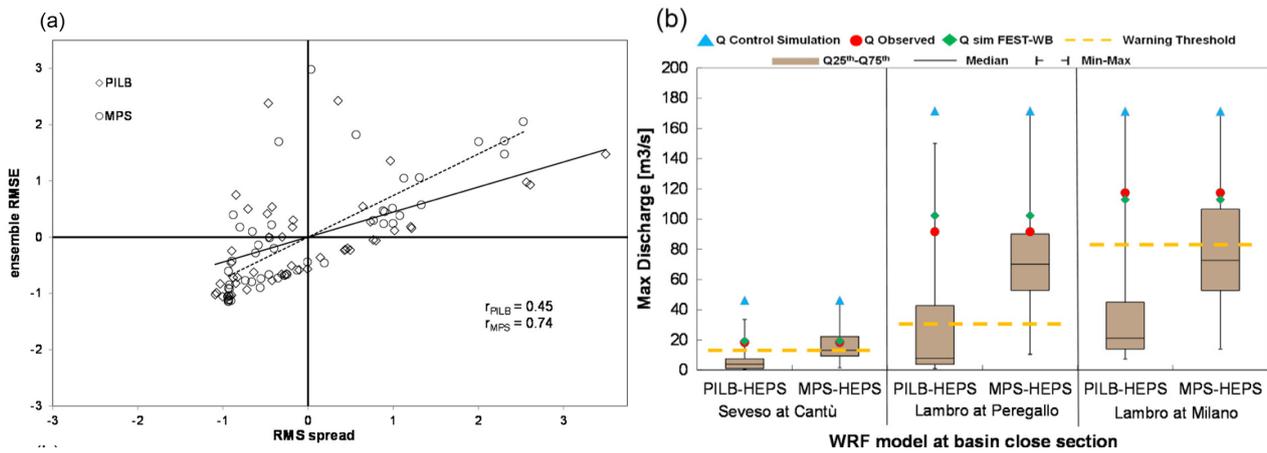


Figura 32.15: Izquierda: Relación entre dispersión (spread) y error cuadrático medio para la predicción de dos casos de inundaciones que afectaron a la cuenca hidrológica de Milán (Italia). Derecha: Caudales máximos observados y simulados en tres puntos diferentes de los ríos Seveso y Lambro de la cuenca de Milán. El rango que abarcan las predicciones SPC hidrológicas se representan con un diagrama de whiskers (sec. 27.8.1 en la página 425). Los dos paneles ilustran la mayor habilidad de los SPC multimodelo generados con diversidad física (MPS) sobre aquellos que se basan en el escalado de predicciones globales (PILB).

Por una parte, la respuesta hidrológica a pequeñas desviaciones en la localización de las precipitaciones previstas es altamente no lineal, lo cual amplifica muy rápidamente los errores en la predicción. Por otra parte, la respuesta en forma de caudal en la desembocadura de una cuenca hidrológica es muy sensible a la distribución espacial y temporal de la precipitación en la cuenca. La precisión espacial y temporal que demandan los modelos hidrológicos a los campos de precipitación predichos se sitúa claramente más allá de las capacidades actuales de los sistemas de predicción atmosférica. Todo ello no hace más que abundar sobre la necesidad de tratar las predicciones hidrológicas desde una perspectiva probabilista integral que incorpore información relativa a los errores en el propio producto de predicción.

En un intento por cuantificar la habilidad de SPC hidrometeorológicos en predecir inundaciones súbitas en el Mediterráneo occidental, RAVAZZANI Y COL. [22] contrastan la capacidad de un SPC generado a partir del reescalado de predicciones globales y otro basado en muestrear los errores del modelo mesoescalar a través de una estrategia multifísica.

Por la naturaleza no lineal de las diferencias entre las simulaciones del SPC multifísica, sus predicciones alcanzan valores de precipitación más grandes y con

mayor variabilidad espacial y temporal. Ello supone a la postre una mejor estrategia de muestreo del abanico de escenarios de precipitación posibles y por tanto una mejor predicción desde múltiples perspectivas (Figura 32.15). RAVAZZANI Y COL. [22] obtienen una mejor calibración (o consistencia, sec. 15.8 en la página 222) del sistema, revelada por una mejor relación diversidad-errores (*spread-skill*, sec. 15.8.2 en la página 223), en el SPC basado en multifísica. Además, el rango de descargas hidrológicas previstas por este sistema se asemeja a los caudales observados, y todavía más importante, el SPC multifísica genera una predicción que incrementa muy claramente las probabilidades de caudales superiores a los niveles de alarma y activación de protocolos de protección civil. Ello se evidencia en el panel derecho de la Figura 32.15 con el mayor peso que impone el SPC multifísica sobre los valores de caudal previsto superiores al umbral de alarma hidrológica.

Hasta la fecha, los intentos por incorporar los errores generados por el propio modelo hidrológico -de manera análoga a como se contemplan los errores del modelo meteorológicos a través de combinaciones multifísica o términos estocásticos- han sido muy limitados, al constatar que la diversidad de escenarios heredada a través del campo de precipitación es ya considerable.

32.5 Desafíos y oportunidades de futuro

Existen aún retos importantes que la investigación científica debe afrontar para comprender mejor la predictibilidad de los fenómenos meteorológicos mediterráneos y mejorar su predicción. Uno de los más fundamentales, por su calado teórico y por lo que implica de cambio de paradigma, es el abandono de la estrategia actual de usar los SPC como muestras estadísticas discretas de una distribución de probabili-

dad subyacente y pasar a conquistar el manejo de las distribuciones completas que caracterizan el estado atmosférico instantáneo y su evolución dinámica. En un horizonte más próximo, se debe hacer hincapié en la caracterización de las fuentes de error más determinantes de las predicciones de alta resolución. Por otra parte, los recientes desarrollos en materia de perturbaciones estocásticas en distintos términos del modelo numérico que simulan procesos físicos de pequeña escala, podrían significar un avance significativo en la protección de las comunidades mediterráneas ante los impactos de fenómenos meteorológicos extremos.

32.6 Referencias

- [1] BJERKNES, Jakob y SOLBERG, Halvor. *Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation*. Grondahl, 1922 (citado en página 532).
- [2] BUIZZA, Roberto, MILLER, Martin J y PALMER, Tim N. “Stochastic representation of model uncertainties in the ECMWF ensemble prediction system”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 125.560 (ago. de 1999), páginas 2887-2908. ISSN: 00359009. DOI: [10 . 1002 / qj . 49712556006](https://doi.org/10.1002/qj.49712556006) (citado en página 535).
- [3] CALLADO, Alfons y col. “Performance of multi-model AEMET-SREPS precipitation probabilistic forecasts over Mediterranean area”. En: *Advances in Geosciences* 26.May 2007 (ene. de 2011), páginas 133-138. ISSN: 16807340. DOI: [10.5194/adgeo-26-133-2011](https://doi.org/10.5194/adgeo-26-133-2011) (citado en páginas 534, 535).
- [4] CAMPINS, J y col. “PYREX observation and model diagnosis of the Tramontane wind”. En: *Meteorology and Atmospheric Physics* 56.3 (1995), páginas 209-228. DOI: [10 . 1007/BF01030138](https://doi.org/10.1007/BF01030138) (citado en páginas 539, 540).
- [5] CARRIÓ, D S y HOMAR, V. “Potential of sequential EnKF for the short-range prediction of a maritime severe weather event”. En: *Atmospheric Research* 178 (2016), páginas 426-444 (citado en páginas 547, 548).
- [6] EHRENDORFER, Martin. “The Liouville Equation and Its Potential Usefulness for the Prediction of Forecast Skill. Part II: Applications”. En: *Monthly Weather Review* 122.4 (abr. de 1994), páginas 714-728. ISSN: 0027-0644. DOI: [10 . 1175 / 1520 - 0493 \(1994\) 122<0714: TLEAIP> 2 . 0 . CO ; 2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<0714:TLEAIP>2.0.CO;2) (citado en página 544).
- [7] EMANUEL, K. “Genesis and maintenance of Mediterranean hurricanes”. En: *Advances in Geosciences* 2.2 (2005), páginas 217-220. DOI: [10 . 5194/adgeo-2-217-2005](https://doi.org/10.5194/adgeo-2-217-2005) (citado en página 543).
- [8] FABRIS, Cesare. *Masse d'aria nel Mediterraneo*. 1935 (citado en página 535).
- [9] HOMAR, Victor y col. “Value of human-generated perturbations in short-range ensemble forecasts of severe weather”. En: *Weather and forecasting* 21.3 (2006), páginas 347-363 (citado en página 545).
- [10] HOSKINS, Brian J, MCINTYRE, M E y ROBERTSON, Andrew W. “On the use and significance of isentropic potential vorticity maps”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 111.470 (1985), páginas 877-946. DOI: [10 . 1002 / qj . 49711147002](https://doi.org/10.1002/qj.49711147002) (citado en página 545).
- [11] JANSÀ GUARDIOLA, J. “La masa de aire mediterránea”. En: *Revista de Geofísica* 69 (1959), páginas 35-50 (citado en página 535).
- [12] JANSÀ, A. “Distribution of the mistral: A satellite observation”. En: *Meteorology and Atmospheric Physics* 36.1 (1987), páginas 201-214. DOI: [10 . 1007/BF01045149](https://doi.org/10.1007/BF01045149) (citado en página 539).
- [13] JANSÀ, A. “A general view about Mediterranean meteorology: cyclones and hazardous weather”. En: *Proceedings of the INM/WMO International Symposium on Cyclones and Hazardous Weather in the Mediterranean, Instituto Nacional de Meteorología and Universitat de les Illes Balears, Palma de Mallorca*. 1997, páginas 33-42 (citado en página 536).
- [14] JANSÀ, Agustín y col. “Western Mediterranean cyclones and heavy rain. Part 2: Statistical approach”. En: *Meteorological Applications* 8.1 (2001), páginas 43-56 (citado en páginas 536, 542).
- [15] MARSIGLI, C y col. “A strategy for high-resolution ensemble prediction. II: Limited-area experiments in four Alpine flood events”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127.576 (2001), páginas 2095-2115. DOI: [10 . 1002 / qj . 49712757613](https://doi.org/10.1002/qj.49712757613) (citado en página 535).

- [16] NISSEN, K M y col. "Cyclones causing wind storms in the Mediterranean: characteristics, trends and links to large-scale patterns". En: *Natural Hazards and Earth System Science* 10.7 (2010), páginas 1379-1391 (citado en página 538).
- [17] PALMER, Tim N y ANDERSON, David L T. "The prospects for seasonal forecasting- A review paper". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 120.518 (1994), páginas 755-793. DOI: [10.1002/qj.49712051802](https://doi.org/10.1002/qj.49712051802) (citado en página 535).
- [18] PALMER, Tim N. y HAGEDORN, Renate. *Predictability of weather and climate*. Cambridge University Press, 2006 (citado en página 534).
- [19] PENLAND, Cécile. "Noise out of chaos and why it won't go away". En: *Bulletin of the American Meteorological Society* 84.7 (2003), páginas 921-925 (citado en página 544).
- [20] PUEBLA, Francisco Pérez y RODRÍGUEZ, César Zancajo. "Regímenes tormentosos en la Península Ibérica durante la década 2000-2009". En: *Tiempo y Clima* 5.28 (2013) (citado en página 541).
- [21] RAMIS, Climent. "Climatología de aire superior en Mallorca". Tesis doctoral. Universidad de Barcelona: Universidad de Barcelona, 1976 (citado en página 535).
- [22] RAVAZZANI, Giovanni y col. "Potentialities of ensemble strategies for flood forecasting over the Milano urban area". En: *Journal of Hydrology* 539 (2016), páginas 237-253 (citado en página 549).
- [23] RIOSALIDO, R, RIVERA, A y MARTIN, F. "Development of a mesoscale convective system in the Spanish Mediterranean Area". En: *Proc. 7th Meteosat Scientific Users' Meeting, Madrid*. 1988, páginas 27-30 (citado en página 542).
- [24] ROMERO, R. "Sensitivity of a heavy-rain-producing western Mediterranean cyclone to embedded potential-vorticity anomalies". En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 127.578 (2001), páginas 2559-2597. DOI: [10.1002/qj.49712757805](https://doi.org/10.1002/qj.49712757805) (citado en página 538).
- [25] ROMERO, R., RAMIS, C. y GUIJARRO, J. A. "Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: an objective classification". En: *International Journal of Climatology* 19.1 (1999), páginas 95-112. DOI: [10.1002/\(SICI\)1097-0088\(199901\)19:1<95::AID-JOC344>3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(199901)19:1<95::AID-JOC344>3.0.CO;2-S) (citado en página 536).
- [26] ROMERO, R. y col. "A classification of the atmospheric circulation patterns producing significant daily rainfall in the Spanish Mediterranean area". En: *International Journal of Climatology* 19.7 (1999), páginas 765-785 (citado en página 536).
- [27] ROMERO, R y col. "Predictability of prototype flash flood events in the Western Mediterranean under uncertainties of the precursor upper-level disturbance". En: *Advances in Geosciences* 7 (2006), páginas 55-63 (citado en páginas 535, 545).
- [28] VERBUNT, M y col. "Probabilistic flood forecasting with a limited-area ensemble prediction system: selected case studies". En: *Journal of Hydrometeorology* 8.4 (2007), páginas 897-909 (citado en página 535).
- [29] VICH, M, ROMERO, R y BROOKS, H E. "Ensemble prediction of Mediterranean high-impact events using potential vorticity perturbations. Part I: Comparison against the multiphysics approach". En: *Atmospheric research* 102.1 (2011), páginas 227-241 (citado en páginas 535, 546).
- [30] VICH, M, ROMERO, R y HOMAR, V. "Ensemble prediction of Mediterranean high-impact events using potential vorticity perturbations. Part II: adjoint-derived sensitivity zones". En: *Atmospheric research* 102.3 (2011), páginas 311-319 (citado en páginas 535, 546).
- [31] VIÉ, Benoît, NUISSIER, Olivier y DUCROCQ, Véronique. "Cloud-Resolving En-

semble Simulations of Mediterranean Heavy Precipitating Events: Uncertainty on Initial Conditions and Lateral Boundary Conditions”. En: *Monthly Weather Review* 139.2 (2011), páginas 403-423. DOI: [10 . 1175 / 2010MWR3487 . 1](https://doi.org/10.1175/2010MWR3487.1) (citado en página 535).

[32] WALLACE, John M, TIBALDI, Stefano y SIMMONS, Adrian J. “Reduction of systematic forecast errors in the ECMWF model through the introduction of an envelope orography”. En: *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 109.462 (1983), páginas 683-717. DOI: [10 . 1002 / qj . 49710946202](https://doi.org/10.1002/qj.49710946202) (citado en página 533).