

SOBRE EL USO DE LOS PROCESOS SINÓPTICOS OBJETIVOS Y LOS MODELOS METEOROLÓGICOS A ALTA RESOLUCIÓN PARA EL ESTUDIO DE LOS PATRONES CIRCULATORIOS ATMOSFÉRICOS A ESCALA REGIONAL

Cecilia Soriano¹, Antonio Fernández² y Javier Martín-Vide³

¹ **Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Dep. de Matemàtica Aplicada I. Barcelona (España). Email: cecilia.soriano@upc.es**

² **Centro Meteorológico de Cienfuegos. Cuba. Email: ajfg@cmpcf.co.cu**

³ **Grupo de Climatología, Universidad de Barcelona (España). Email: jmartinvide@ub.edu**

RESUMEN

En este trabajo se describe la metodología utilizada para la clasificación automática de los llamados Procesos Sinópticos Objetivos (PSO), basada en el análisis de la presión atmosférica en superficie y del geopotencial a 500 hPa en su evolución temporal durante 3 días. El procedimiento se ha aplicado sobre un dominio adecuado para caracterizar los principales PSO en la Península Ibérica en el bimestre Julio-Agosto. A continuación, para un día característico de algunas de las PSO obtenidas, se ha aplicado un modelo meteorológico de mesoescala a alta resolución sobre la región de Cataluña para describir los patrones circulatorios asociados a cada situación sinóptica.

ABSTRACT

This contribution describes the methodology developed for the automatic classification of what are called the Objective Synoptic Processes (OSP), which is based in the analysis of the evolution, during three days, of surface pressure and geopotential height at 500 hPa. The procedure has been applied over an appropriate domain covering the Iberian Peninsula to obtain OSP for the period July-August. Next, for a characteristic day for some of the OSP, a mesoscale meteorological model has been run at high resolution for the region of Catalonia in order to describe the circulatory patterns associated to a given synoptic situation.

1- INTRODUCCIÓN

Es bien conocido que la topografía de una región es determinante para el establecimiento de los flujos aéreos meso y microescalares bajo cada patrón sinóptico concreto. Así, los flujos a escala sinóptica se adaptan a las características orográficas particulares y dan lugar a campos de vientos que a menudo tienen una representación meramente local. No obstante, el análisis a escala sinóptica es imprescindible, dado que constituye el marco de referencia general para el desarrollo de los vientos locales en un área determinada. Situaciones sinópticas similares generalmente producen patrones de vientos parecidos a escalas espaciales de detalle. Por ello es importante que el predictor disponga de una buena clasificación de las situaciones sinópticas y conozca los vientos locales asociados a cada una de ellas.

Para avanzar en esa dirección, en esta contribución se analizan los resultados de las simulaciones, con un modelo meteorológico de mesoescala a alta resolución, de diferentes situaciones sinópticas identificadas mediante un análisis sinóptico objetivo.

En primer lugar, se procedió a la obtención automática de la clasificación de las situaciones sinópticas (en base bimestral), denominadas procesos sinópticos objetivos, o PSOs. Básicamente, el algoritmo, que emplea la base de datos del NCEP-NCAR para un período de 10 años (1990-1999), utiliza los análisis de superficie y la topografía de 500 hPa, considerando ternas de situaciones sinópticas (correspondientes a los días D-1, D y D+1), y minimizando mediante procedimientos reiterativos la distancia entre las mismas. El resultado final son unos campos de presión y geopotencial medios de cada proceso sinóptico objetivo identificado.

El siguiente paso ha consistido en la ejecución, para la región de Cataluña (España), con una orografía compleja y una relativamente amplia fachada abierta al mar Mediterráneo, de un modelo meteorológico de mesoescala a alta resolución ($2 \times 2 \text{ km}^2$) para un día característico de varios PSOs. Se ha descrito el patrón circulatorio asociado a cada PSO y extraído un modelo conceptual de los campos de vientos regionales bajo cada uno de los regímenes sinópticos.

2- LOS PROCESOS SINÓPTICOS OBJETIVOS: METODOLOGÍA

Para el cálculo de los PSOs en el período 1990-1999 se aplicó la metodología propuesta por Fernández y Díaz (inédito) y Fernández *et. al* (2003). Los PSOs fueron hallados para el bimestre Julio-Agosto. En el procedimiento se tienen en cuenta los siguientes pasos metodológicos:

A) Cálculo de las iteraciones entre las ternas de situaciones sinópticas, evaluando el valor de la distancia entre ternas, dada por la fórmula general:

$$\text{Dist} (k) = \left(\sum_{i=1,m} \sum_{j=1,n} \left| F_{\text{mod}} (i, j, k) - F_{\text{dat}} (i, j, k) \right| \right) / m * n$$

Donde $F_{\text{mod}}(i,j,k)$ es la matriz de datos de cada iteración de las variables empleadas P_{Sup} y Z_{500} , y $F_{\text{dat}}(i,j,k)$ es el banco de los campos diarios incluidos para la obtención de los PSOs. El subíndice i corresponde a las filas (latitud) y el subíndice j , a las columnas (longitud), de las matrices de datos de la presión atmosférica en superficie al nivel medio del mar y de la altura Z del nivel de 500 hPa. “ k ” representa el índice que cuenta el número de iteraciones de cada PSO. El número de filas de la matriz se define por “ m ” y el de columnas por “ n ”.

B) Proceso de iteraciones continuas de cálculo de distancias, con nivel de significación estadística de $\alpha \leq 0.05$. Determinación del conjunto de iteraciones de la $\text{Dist} (k)$ para la cual se cumple la condición A) y cálculo de $S1$ y $S2$, para la selección de los grupos optimizados que integran los PSOs. Se calcula $S1$ Y $S2$, como elementos integradores de la llamada función discriminante de Miller, mediante las fórmulas:

$$S1(x_p) = \sum_{g=1,G} \sum_{k=1,n_g} (x_{pgk} - x_{pg})^2$$

$$S2(x_p) = \sum_{g=1,G} n_g (x_{pg} - x_p)^2$$

Donde $(x_{pgk} - x_{pg})^2$ representan las diferencias cuadráticas entre la media interior de cada grupo PSO y cada uno de los valores observados de P_{sup} y Z500. G es el número de PSO y $S1(x_p)$ representa la suma total de las desviaciones INTRAGRUPOS de todos los PSO. El término $(x_{pg} - x_p)^2$ representa las diferencias entre las “Grandes medias de cada PSO” y la media total de la muestra analizada, ponderada por el número de casos de PSO, mientras que $S2(x_p)$ da una media de las desviaciones INTERGRUPOS.

C) Cálculo del cociente $S2(x_p) / S1(x_p)$, para todas las iteraciones calculadas, seleccionándose aquélla donde se MAXIMIZA dicho cociente. De esa manera se seleccionan los Grupos de la clasificación que conforman los PSO.

D) Obtención de los mapas promediados de los campos de P_{sup} y Z500 de los días D-1, D y D+1, pertenecientes al número de ternas de cada grupo que conforman los PSOs. Se halla, además, la frecuencia relativa de cada PSO en el bimestre y la relación de días individuales que forman parte de los PSOs.

En el proceso de clasificación no necesariamente entran todos los casos que integran la muestra analizada. Aquellas “ternas” que no formaron parte de uno de los PSO se corresponden en general con situaciones meteorológicas muy raras. También, aquellos PSOs de frecuencia muy baja están en correspondencia con situaciones meteorológicas poco comunes o extremas. Se adoptó el criterio de no considerar los PSOs con una frecuencia < 1.0 %, cuyos casos quedan, en consecuencia, fuera de la clasificación.

3- APLICACIÓN A LA PENÍNSULA IBÉRICA: LOS PSOs OBTENIDOS PARA EL BIMESTRE JULIO-AGOSTO

La metodología descrita anteriormente se aplicó durante el bimestre Julio-Agosto del período 1990-1999. La malla considerada para formar la ventana de trabajo sobre la que se han realizado los cálculos de los PSOs se ha construido teniendo en cuenta las dos características principales que debe cumplir para asegurar el éxito de la clasificación: por una parte, debe abarcar una amplia región planetaria para poder identificar fácilmente las estructuras sinópticas involucradas en cada clasificación; Por otro lado, debe estar construida con una resolución de paso de malla lo suficientemente fina como para no perder información de las estructuras atmosféricas en la escala meso-beta y meso-alfa, que en las latitudes en las que se realiza este estudio dan lugar a situaciones atmosféricas bien diferenciadas.

Así, la malla considerada en este estudio cuenta con un total de 17 celdas de latitud y 25 celdas de longitud (con un total de 425 puntos), con una resolución de 2.5 grados de

lado, abarcando una ventana limitada por los paralelos 25°N y 54°N y los meridianos 30°W y 30°E.

Los variables primarias analizadas en estos puntos han sido la presión atmosférica en superficie y la altura geopotencial en el nivel de 500 hPa, a partir de la base de datos NCEP-NCAR, para el período 1990-1999.

La selección de los PSO para el bimestre Julio-Agosto, durante el período 1990-1999, ha puesto de manifiesto 22 tipos distintos de situaciones sinópticas. En la tabla I se recogen ordenados y numerados según su frecuencia de aparición.

Tabla I: Número de casos, frecuencia relativa y período de retorno de los PSO para el bimestre Julio-Agosto (período 1990-1999).

PSO	Nº DE CASOS	FRECUENCIA (%)	PERIODO DE RETORNO (días)
1	73	11.8	8.5
2	59	9.5	10.5
3	52	8.4	11.9
4	43	6.9	14.5
5	38	6.1	16.4
6	38	6.1	16.4
7	35	5.6	17.9
8	28	4.5	22.2
9	28	4.5	22.2
10	27	4.4	22.7
11	24	3.9	25.6
12	22	3.5	28.6
13	21	3.4	29.4
14	18	2.9	34.5
15	18	2.9	34.5
16	17	2.7	37.0
17	14	2.3	43.5
18	13	2.1	47.6
19	9	1.5	66.7
20	8	1.3	76.9
21	8	1.3	76.9
22	8	1.3	76.9

El PSO1 -el más frecuente- aparece en el 11.8% de las fechas, mientras que el PSO22 -el más escaso-, sólo en el 1.3%. La disminución de la frecuencia es cuasi-exponencial negativa. Los seis PSOs más frecuentes acaparan prácticamente la mitad de los días (48.8%) y los doce primeros el 75%. Inversamente, el período de retorno de los PSO, expresado en días, crece con rapidez a medida que disminuye su frecuencia. Así, mientras el PSO1 se presenta, en promedio, más de 7 veces en el bimestre (período de retorno de 8.5 días), el PSO22 lo hace tan sólo una vez cada 1.3 años (período de retorno de 76.9 días).

La regularidad en la disminución de las frecuencias y en el aumento de los períodos de retorno, con un marcado aspecto de funciones exponenciales, negativa en el primer caso y positiva en el segundo, constituye un elemento que avala la propia metodología de los PSOs. Esto es así porque la persistencia de los patrones de la circulación atmosférica ha de primar unos pocos tipos frecuentes o normales, frente a un número relativamente alto de tipos poco probables o incluso excepcionales.

En esta contribución, debido a la falta de espacio, se analizan dos de los PSOs identificados por la metodología. Se ha escogido analizar el PSO6 y el PSO5, principalmente por su relativa alta frecuencia de ocurrencia (de alrededor del 6% para ambos casos) y también porque son sinópticamente muy diferentes; así se asegura que los resultados de la simulación con los patrones circulatorios serán bastante diferentes e ilustrarán la utilidad de este tipo de estudio para disponer de una buena clasificación de las situaciones sinópticas y de los vientos locales asociados a cada una de ellas. A continuación se describen los dos PSOs considerados, y los días concretos que fueron clasificados como pertenecientes a uno de ellos, y que se han hecho servir para realizar las simulaciones con el modelo de mesoescala.

3.1 Análisis del PSO6: 10 de Julio de 1999

La situación descrita por el proceso sinóptico objetivo PSO6, cuya representación para los días D-1, D y D+1 se observa en la figura 1, se corresponde bastante bien con la presente el día 10 de Julio de 1999 (de la que sólo se muestran en una misma representación los mapas de superficie y de altura correspondientes al día central del proceso).

El elemento más destacado en el mapa de superficie era un anticiclón atlántico extendido hacia las islas Británicas y el mar Báltico, con isobara nuclear de 1032 hPa, que daba flujos del este-nordeste sobre el norte Francia y el mar Cantábrico. En algunas fuentes sinópticas se apreciaba también una discreta vaguada arrancando de África hacia la Península Ibérica. Sobre buena parte de ésta y de la cuenca del Mediterráneo los valores de presión en superficie rondaban los normales, con un escasísimo gradiente bórico, por lo que podía hablarse de pantano barométrico. Existe una buena concordancia en superficie entre el análisis real y el PSO6.

En altura había una onda anticiclónica en el Atlántico norte próximo a las islas Británicas y bajas presiones entre Centroeuropa y la península Itálica, centradas en la mitad norte de ésta, con isohipsa nuclear de 5740 m. Al no tener reflejo en superficie y ser de carácter frío, esta depresión en 500 hPa puede calificarse de "gota fría". El noroeste de África estaba dominado por un anticiclón. La configuración en altura del PSO6 se parece a la real descrita, aunque la "gota fría" no queda individualizada -sólo se dibuja una vaguada en Centroeuropa-, probablemente por el carácter medio de los procesos sinópticos objetivos. El PSO6, que tiene una evolución temporal poco dinámica, discrepa en altura con la situación real en el día D+1, en que se formó una "gota fría" al oeste de la Península Ibérica.

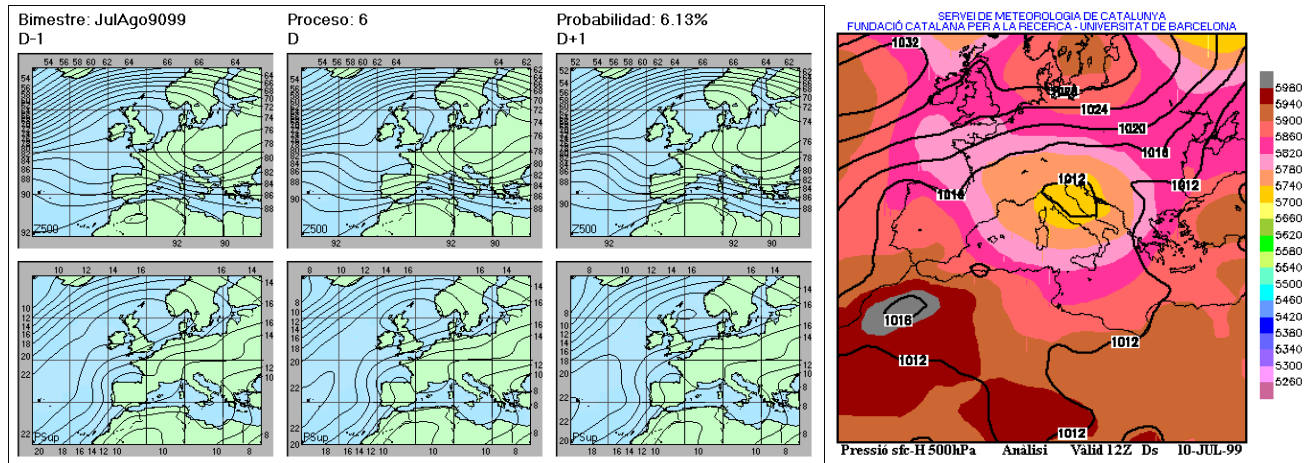


Figura 1 En el panel de la izquierda, se muestran los mapas correspondientes a los días D-1, D y D+1 de la PSO6. Arriba los de la superficie de 500hPa y abajo los de superficie. A la derecha se incluye el mapa sinóptico del análisis de las 12 GMT del día 10 de Julio de 1999. Se representan las isóbaras de presión en superficie sobre la topografía a 500 hPa (en colores).

3.2 Análisis del PSO5: 14 de Julio de 1999

En superficie (figura 2) se apreciaba un haz apretado de isobaras del oeste, y oeste-noroeste, sobre el Atlántico norte en las latitudes de las islas Británicas, guiado por una depresión al norte de ellas. En la parte nororiental de la Península Ibérica los flujos rolaban hacia el noroeste. Se apreciaban bajas presiones de carácter térmico sobre el Sahara, prolongándose en forma de vaguada hacia el suroeste de la Península Ibérica - la isobara 1016 hPa dibujaba bien esta configuración-. La situación real y el PSO5 en superficie son similares.

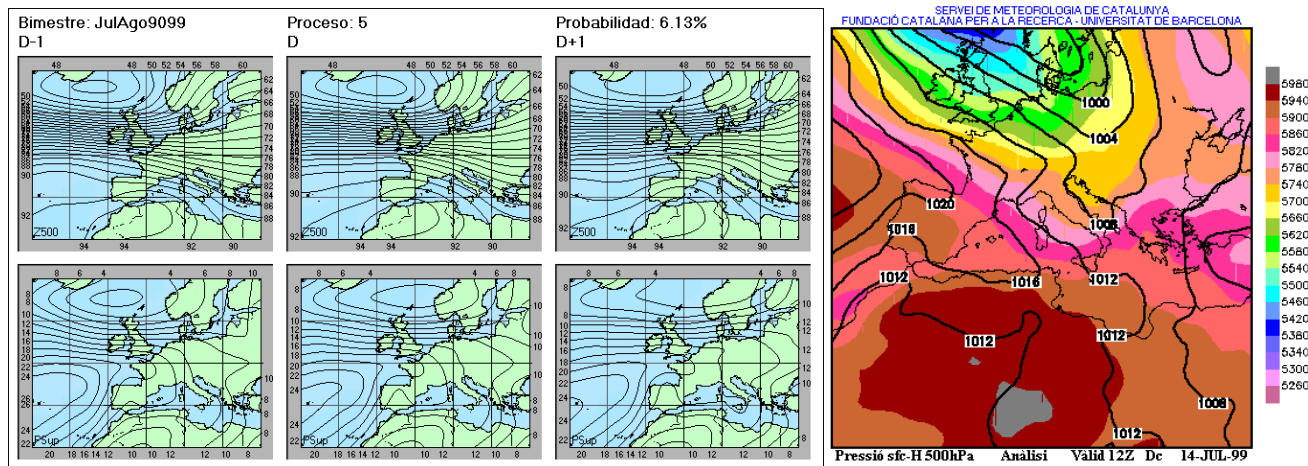


Figura 2 En el panel de la izquierda, se muestran los mapas correspondientes a los días D-1, D y D+1 de la PSO 5. Arriba los de la superficie de 500hPa y abajo los de superficie. A la derecha se incluye el mapa sinóptico del análisis de las 12 GMT del día 14 de Julio de 1999. Se representan las isóbaras de presión en superficie sobre la topografía a 500 hPa (en colores).

En altura se apreciaba una circulación de alto índice, con isohipsas en disposición zonal y elevado gradiente, sobre el Atlántico norte y Europa occidental. También era perceptible una depresión al oeste de Marruecos, frente al extenso anticiclón que dominaba el norte de África. La concordancia en altura es buena, salvo en el detalle de la depresión al oeste de Marruecos. En cuanto a la evolución, el único elemento discrepante fue una vaguada en altura sobre el este de la Península Ibérica en el día D-1, no visible en el mapa del PSO.

4- EL MODELO METEOROLÓGICO DE MESOESCALA TAPM. DESCRIPCIÓN Y APLICACIÓN A LA REGIÓN DE ESTUDIO

El siguiente paso en el estudio presentado en esta contribución ha consistido en la modelización con un modelo meteorológico de mesoescala a alta resolución de un día representativo de los PSOs analizados. En concreto, se ha utilizado el modelo de mesoescala TAPM, desarrollado por el grupo de investigación atmosférica del CSIRO (*Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation*), en Australia (Hurley *et al.*, 2001, Hurley, 2002). Es un sistema completo para la modelización del transporte atmosférico y consta de los siguientes componentes: un modelo de predicción meteorológica, un modelo de dispersión basado en una formulación lagrangiana -especialmente útil para el estudio en las proximidades de fuentes puntuales- y un modelo euleriano de dispersión que incluye reacciones fotoquímicas entre los contaminantes reactivos. En este trabajo se ha utilizado únicamente el modelo meteorológico de TAPM.

El módulo meteorológico es un modelo no-hidrostático que resuelve las ecuaciones primitivas que describen las variables atmosféricas sobre una malla tridimensional cuya coordenada vertical sigue el trazado del terreno (*terrain-following*). Pertenece al grupo de modelos específicamente diseñados para estudiar el rango meteorológico de la mesoescala. Es por ello que utiliza bases de datos de topografía y usos de suelo -por defecto las del US- Geological Service- para caracterizar detalladamente el terreno y los parámetros del mismo que afectan a la evolución de la situación meteorológica.

El modelo necesita ser alimentado con datos de un modelo global, que serán utilizados para inicializar y como condiciones de contorno. Para que la transferencia de información entre la escala mayor -sinóptica- y la escala regional / local sea más eficaz, TAPM permite la utilización de mallas anidadas -lo que se conoce como técnica de *nesting*-. De esta manera, se asegura que los campos de viento de alta resolución obtenidos para una región relativamente pequeña incluyan efectos introducidos por estructuras orográficas no contenidas en el dominio de simulación más fino, pero que modifican de manera importante el régimen circulatorio. El modelo utiliza por defecto los análisis sinópticos realizados por el *Bureau of Meteorology* australiano, pero puede utilizar también datos del modelo del ECMWF europeo o del AVN americano. Para la ejecución presente se utilizaron los análisis del modelo global australiano.

En la aplicación concreta que se presenta en esta contribución se emplean cuatro dominios anidados de 150x150 celdas en sus dimensiones horizontales y 25 celdas en la dimensión vertical. El tamaño del paso de malla ha sido, respectivamente para cada uno de los 4 dominios, de 20, 10, 4 y 2 Km., estando todos ellos centrados aproximadamente en la región catalana. La figura 3 muestra una representación del área cubierta por cada uno de los dominios.

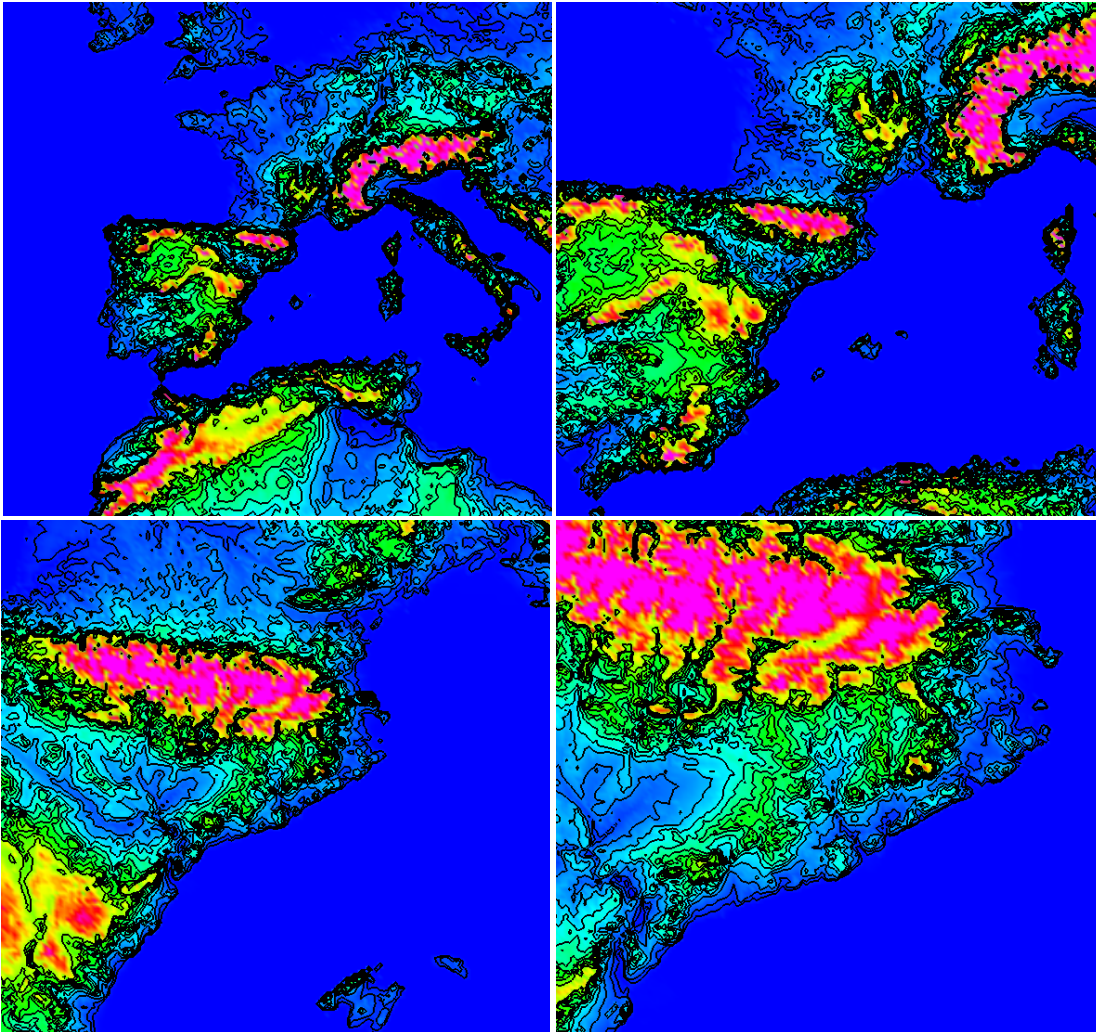


Figura 3 Topografía de los cuatro dominios anidados utilizados en la aplicación del modelo de mesoescala. De izquierda a derecha, y de arriba a abajo, los dominios de 20, 10, 4 y 2 km de resolución.

Como se aprecia, Cataluña es una región de topografía muy compleja. Como elementos principales destacamos en primer lugar los Pirineos, verdadera barrera montañosa entre España y Francia, con alturas superiores a los 3000 m. La presencia de una importante masa de agua (en este caso el Mar Mediterráneo) también jugará un papel importante en el establecimiento de las circulaciones locales debido al calentamiento diferencial de la tierra y el mar. Finalmente, y centrándonos en la descripción del dominio más interior, que es el que incluye Cataluña y aquél en el que los resultados del modelo de mesoescala serán analizados con más detalle, destacamos la presencia de los valles de dos ríos: el del río Llobregat, que desemboca en la costa central catalana;

y el valle del río Ebro, que desemboca en el litoral sur de Cataluña, pero que cruza el nordeste de la Península Ibérica desde su vertiente cantábrica. La presencia de estos valles dará lugar a importantes canalizaciones de los vientos en la región.

A continuación, para cada una de los dos PSOs estudiados, se presentan los resultados de la aplicación del modelo TAPM para un día característico representativo de la situación sinóptica descrita por el PSO. El día modelizado representa el día D (el central) de la terna que describe cada PSO, aunque las simulaciones se han realizado sobre un total de 48 horas, siendo las primeras 24 horas (las correspondientes al día D-1) utilizadas para el llamado *spin-up* del modelo.

Para cada uno de los dos casos, se incluye la representación, sobre la topografía de Cataluña incluida en el dominio interior de simulación, de los campos de vientos 2-dimensionales simulados por el modelo TAPM sobre la primera capa vertical del modelo (a unos 10 metros sobre el terreno). Se han representado los campos de módulo de velocidad y los vectores velocidad del viento, cada 3 horas. Concretamente, se incluyen las horas 6, 9, 12, 15, 18 y 21 UTC (tiempo universal, o *Greenwich Meridian Time*, dos horas menos que el horario oficial de verano en España), que permiten observar la importante variabilidad a lo largo del ciclo diario de estos campos. Para mejorar la comparación entre ambas situaciones, nótese que las escalas de colores utilizadas para representar el módulo de vientos y la escala de longitud de la flecha en la representación de los vectores son las mismas en todas las gráficas.

4.1 – Patrones circulatorios asociados al PSO6

Las figuras 4 y 5, que muestran los vientos en la primera capa (10 m sobre el terreno), evidencian un claro ciclo diario en esta variable para este PSO caracterizado por un bajo gradiente bórico sobre Cataluña. Efectivamente, los vientos son muy débiles durante las horas nocturnas, evidenciando el escaso forzamiento sinóptico ya mencionado en la descripción de la situación a gran escala. El enfriamiento nocturno origina vientos descendientes de ladera (catabáticos) en las vertientes de las montañas. En las representaciones se observa cómo en valles estrechos, como por ejemplo los de los Pirineos, la formación de estos flujos de caída a ambas laderas provoca el enfrentamiento de flujos de aire en el fondo de los valles, observándose claramente líneas de convergencia. Durante la noche, los vientos son débiles en la costa y con dirección de tierra hacia mar, evidenciando el establecimiento de una circulación de brisa nocturna (terral), debido al enfriamiento radiativo lento de la superficie terrestre, recalentada después de las largas horas de insolación durante los días de verano.

Con la salida del sol la situación cambia drásticamente. El calentamiento solar provoca la formación de brisas de mar hacia tierra. Durante las primeras horas de la mañana esta entrada del flujo tierra adentro se produce sólo en los primeros kilómetros de la línea de costa, y en dirección perpendicular a la misma. Conforme las horas avanzan, la célula convectiva asociada a la circulación de brisa va aumentando de tamaño y penetrando hacia el interior, aumentando también su intensidad. De hecho, estudios realizados con este mismo modelo a más alta resolución sobre la región de Vic, en el nordeste de Cataluña, han evidenciado la penetración del frente de brisa más de 100

Km tierra adentro (Soriano et al., 2003). La representación vectorial pone de manifiesto también el efecto de la fuerza de Coriolis sobre el flujo formado. Durante la tarde, y conforme el módulo del viento aumenta, la brisa pasa de tener una componente SE a adquirir componente S, fruto del giro hacia la derecha por el efecto de Coriolis en los vientos en el hemisferio Norte.

En las montañas el calentamiento diurno da lugar a la formación de los llamados vientos ascendentes de ladera (o anabáticos), contrapuestos en su causa a los vientos catabáticos nocturnos descritos anteriormente. En las montañas del prelitoral y litoral catalán, que están orientadas paralelamente a la línea de costa, estos vientos tienen la misma dirección que la brisa de mar, de manera que los efectos de ambos vientos se unen, ampliando si cabe el flujo general de mar hacia tierra y propiciando que el frente de brisa supere las montañas y penetre hacia el interior. En los Pirineos es curioso observar cómo estos vientos ascendentes se forman a ambos lados del macizo, originando zonas de convergencia en lo alto de las montañas.

Finalmente, con la puesta del sol, el calentamiento del suelo se para y la situación pasa por un periodo de transición hasta el establecimiento de nuevo del régimen nocturno. Este periodo de transición está caracterizado por la presencia de vientos muy débiles y de direcciones muy variables, hasta que el enfriamiento del terreno lleva a la formación de vientos catabáticos y de los drenajes nocturnos.

4.2 – Patrones circulatorios asociados al PSO5

La situación a gran escala presente durante el PSO5 lleva asociada la presencia de un flujo fuerte del N-NW, y por lo tanto el ciclo diario bajo esta situación (generalmente asociado con la parte mesoescalar del flujo) es menos marcado que en el caso anterior.

El flujo a gran escala mencionado antes queda reflejado a escala de Cataluña especialmente en la presencia de fuertes vientos en los extremos norte y sur de la región. Efectivamente, las figuras 6 y 7 muestran, por un lado, cómo el choque del viento de componente N con la pared de los Pirineos provoca la aceleración del mismo en su salida hacia el Mediterráneo por el golfo de León, dando lugar a episodios de mistral en el sur de Francia y de tramontana en el norte de Cataluña. Por otro lado, la otra posible entrada del flujo del N hacia la región es por el extremo más meridional de los Pirineos (en su extremo cantábrico). La entrada del viento de NW es canalizado a través del valle del Ebro (este hecho se aprecia especialmente en los campos de viento modelizados sobre el tercer dominio de simulación, no incluido en este artículo por falta de espacio), y da lugar a vientos muy fuertes en el curso más bajo del río y en su desembocadura al Mediterráneo (los conocidos localmente como cierzos). Obsérvese cómo estos vientos están presentes de manera constante, y con poca variación a lo largo de todas las horas mostradas. Sólo al final del día, cuando el flujo de norte ya disminuyó un poco, el cierzo amainó algo en el sur.

Se aprecia cómo con la salida del sol se forma una circulación de mar hacia tierra, típica de brisa diurna, en la costa central de Cataluña. En esa zona, el flujo sinóptico no es tan evidente y el calentamiento diurno (recordemos que estamos estudiando un día de

pleno verano) es suficiente para establecer la circulación mesoescalar. Se observa claramente la formación de unas líneas de convergencia en las zonas en las que el flujo del NW asociado al patrón sinóptico se encuentra con el frente de brisa (evidenciadas como zonas de muy bajo módulo de viento en la figura 6). En particular, a las 12 UTC, se aprecia una línea de convergencia en la zona norte de Cataluña, orientada aproximadamente de NW a SE, donde confluyen la tramontana con los vientos del S asociados a la brisa; y otra más paralela a la costa, en su parte central, donde confluyen el frente de brisa, del S-SE, con el viento del W asociado a la situación de gran escala. Esta línea de convergencia se va desplazando hacia el interior conforme el frente de brisa avanza por la tarde.

Por último, hay que resaltar que la entrada de brisa no se produce en el sur hasta finales de la tarde. El drenaje del Ebro es tan acusado que el frente de brisa no puede penetrar en esta área hasta sus horas de máxima intensidad, apreciándose también la franja de convergencia bien formada. Sólo cuando el cierzo disminuye su intensidad se observa la entrada de un flujo de mar hacia tierra.

5- CONCLUSIONES

En este trabajo se ha evidenciado la importancia del conocimiento de los patrones circulatorios en regiones de orografía compleja y la gran variabilidad horizontal de los mismos, así como el hecho de que situaciones sinópticas diferentes dan lugar a campos de vientos locales muy diferentes. Para ayudar en este sentido, primero se ha realizado una clasificación de los procesos sinópticos de una manera objetiva, dando lugar a varios grupos de situaciones a gran escala que se pueden considerar como típicas de la zona estudiada y que llevan asociado un porcentaje que refleja la frecuencia de ocurrencia. Para un día característico de algunas de estas situaciones, se ha ejecutado un modelo de mesoescala a gran resolución que nos ha permitido describir en detalle el complejo régimen de vientos en la región estudiada.

REFERENCIAS

Fernández, A.J. y Díaz, Y.A.(2003): *Catálogo de los procesos sinópticos en el archipiélago cubano*, Cienfuegos, Centro Meteorológico Provincial, Imprenta GeoCuba, 170 pp.

Fernández, A.J.; Martín Vide, J.; Díaz, Y.A. y Mestre, A.(2003): *Aplicación de los procesos sinópticos objetivos a la Península Ibérica en otoño*. Investigaciones Geográficas, 31, 37-65, Alicante, Universidad de Alicante.

Hurley, P.J., Blockley, A. and Rayner, K. (2001): Verification of a prognostic meteorological and air pollution model for year-long predictions in the Kwinana Industrial region of Western Australia. *Atmospheric Environment*, **33**, 1871-1880.

Hurley P. 2002, 'The Air Pollution Model (TAPM) Version 2. Part 1: Technical Description', CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 55. See www.dar.csiro.au/TAPM.

Soriano, C. , R. M. Soler, D. Pino, M. Alarcón, B. Physick and P. Hurley (2003) *Modeling Different Meteorological Situations in Catalunya, Spain, with MM5 and TAPM Mesoscale Models: A Comparative Study*. *International Journal of Environment and Pollution*. *In press*.