

# ESTUDIO DE LA FORMACIÓN DE VIENTOS CATABÁTICOS EN LA REGIÓN DE MADRID MEDIANTE LA SIMULACIÓN CON UN MODELO DE MESOESCALA A ALTA RESOLUCIÓN

Cecilia Soriano<sup>1</sup>, Darío Cano<sup>2</sup>, Enric Terradellas<sup>3</sup> y Bill Physick<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Departamento de Matemática Aplicada I. Av. Diagonal 647. ETSEIB. 08028 Barcelona. [cecilia.soriano@upc.es](mailto:cecilia.soriano@upc.es)

<sup>2</sup> Instituto Nacional Meteorología, C.M.T. en Madrid y Castilla la Mancha. [dario@inm.es](mailto:dario@inm.es)

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Meteorología, C.M.T. a Catalunya. [enric.bar@inm.es](mailto:enric.bar@inm.es)

<sup>4</sup> CSIRO Atmospheric Research. Aspendale, Australia. [Bill.physick@csiro.au](mailto:Bill.physick@csiro.au)

## **Resumen**

*Esta comunicación muestra los resultados de aplicar un modelo meteorológico de mesoescala a alta resolución sobre una región centrada en el aeropuerto de Madrid-Barajas. Estos resultados confirman el modelo conceptual desarrollado por el INM que relaciona la formación de vientos catabáticos y la existencia de líneas de convergencia de flujos en la zona, así como su relación con la formación de niebla.*

## **Abstract**

*This contribution shows the results of a mesoscale weather prediction model run at high resolution over a region centred at the Madrid-Barajas airport. These results confirm the goodness of a conceptual model developed by the INM, which relates katabatic winds with the existence of convergence lines over the area, as well as their relationship with fog formation.*

## **Palabras clave**

*Niebla, modelos de mesoescala, vientos catabáticos  
Fog, mesoscale models, katabatic winds*

## **1. INTRODUCCIÓN**

El Instituto Nacional de Meteorología (INM) está, desde hace tiempo, dedicando esfuerzos a la investigación de los fenómenos relacionados con la formación de nieblas en el aeropuerto de Madrid-Barajas, así como a su predicción. Los diversos estudios realizados han puesto de manifiesto la estrecha vinculación entre estas nieblas y el establecimiento de un flujo de vientos catabáticos en la región, en un contexto de advecciones atlánticas o mediterráneas.

En la predicción de nieblas, se está utilizando actualmente una versión unidimensional del modelo HIRLAM. En este modelo, los términos dependientes de la estructura horizontal de la atmósfera se estiman a partir de las salidas del modelo operativo HIRLAM con 0.2° de resolución. Sin embargo, los vientos catabáticos no son correctamente reproducidos por el modelo tridimensional y, consecuentemente, tampoco por el unidimensional. Para subsanar este problema, en determinadas condiciones, los forzamientos procedentes del modelo tridimensional son sustituidos por otros de carácter climatológico, estimados a partir de un modelo conceptual de vientos catabáticos.

Para comprobar la bondad del modelo conceptual, se ha realizado una simulación mediante un modelo de mesoescala a alta resolución. Para ello, se ha utilizado el modelo australiano TAPM, ejecutado en dominios anidados, con un ancho de rejilla de 2 km en el dominio interior. En esta simulación se ha podido reproducir perfectamente la generación de vientos catabáticos en la región y se han podido confirmar las características básicas de su circulación

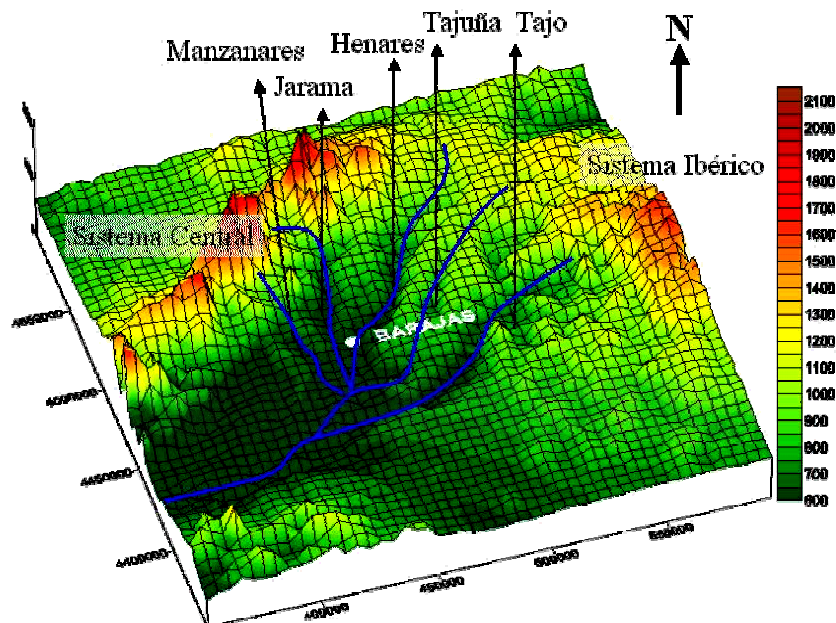
presentes en el modelo conceptual. En particular, se ha puesto en evidencia la convergencia de flujos, y el consiguiente movimiento ascendente, en las proximidades del aeropuerto de Madrid-Barajas.

## 2. ENTORNO MESOESCALAR DEL ÁREA DE ESTUDIO

La región se halla situada en la cuenca alta del Tajo, desde su nacimiento en la Serranía de Cuenca (Sistema Ibérico) hasta la confluencia con el sistema fluvial del río Jarama. Se trata de un amplio valle de dimensiones meso-beta según la clasificación de Orlanski, que transcurre en una dirección Noreste – Suroeste, entre el Sistema Ibérico y el Sistema Central (Figura 1).

Cinco ríos vienen a converger en la parte más baja del área considerada: el Henares, el Manzanares y el Jarama, procedentes del sistema Central, y el Tajo y el Tajuña procedentes del Sistema Ibérico.

**Figura 1.** Entorno mesoescalar de la zona de estudio (corresponde al 3er dominio utilizado en la simulación con TAPM, a resolución 5x5 km<sup>2</sup>). En líneas azules se representan las principales cuencas fluviales y en distintos colores las altitudes en metros.



## 3. MODELO CONCEPTUAL DE BRISAS DE MONTAÑA EN EL ÁREA DE MADRID

Estudios realizados en el Centro Meteorológico en Madrid y Castilla - La Mancha han puesto de manifiesto que las brisas de montaña constituyen un fenómeno omnipresente en esta región que se encuentra completamente rodeada por accidentes montañosos.

Las brisas de montaña son la consecuencia de un desajuste en la distribución de densidad del aire que se produce al calentarse o enfriarse éste de manera diferencial como consecuencia de la topografía del terreno. En las cumbres, los calentamientos y enfriamientos son más rápidos que en los valles, provocando un flujo de caída o catabático durante la noche, y uno de subida o anabático durante el día.

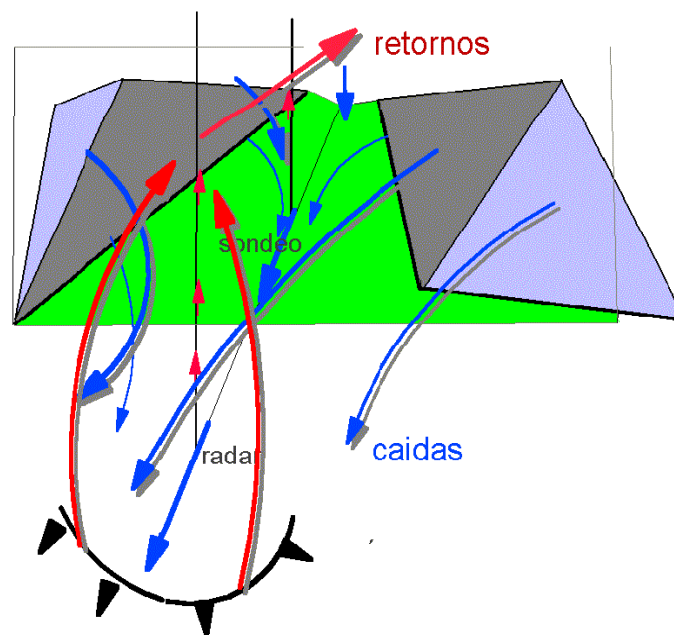
Este trabajo se centra en los vientos de caída: el drenaje catabático, también conocido en Castilla como “marea”. La importancia de estos flujos no radica tanto en la fuerza del viento,

que en la mayoría de los casos es muy débil, sino en el moldeado de la circulación en superficie y la generación de áreas de convergencia. Es destacable, sobre todo, el papel que desempeñan en la distribución de los contaminantes y en la formación de nieblas en la región. (Aguado et al. 1998)

El modelo conceptual (Figura 2) ha sido desarrollado a partir del análisis climatológico de las observaciones disponibles: estaciones de superficie, radiosondeo, radar e imágenes de satélite. Podría resumirse de la siguiente forma:

- Es un viento flojo -menos de  $3 \text{ ms}^{-1}$ - que sigue la dirección de los valles. Comienza a última hora de la tarde y puede durar -según la estación del año- hasta más allá de la madrugada. Tiene una profundidad de unos 500 m. Por encima de este nivel un flujo de retorno iría en sentido contrario. Este flujo advecta una masa más fría y seca.
- Una corriente ascendente desde el fondo del valle forzada por la convergencia en superficie de los flujos que descienden de los dos sistemas montañosos. Estimaciones realizadas a partir de las observaciones del radar de Madrid sitúan la velocidad ascendente entre  $0.02$  y  $0.03 \text{ ms}^{-1}$ .

*Figura 2. Modelo conceptual tridimensional de flujos catabáticos sobre el área de Madrid. Con flechas azules se representan los flujos de caída y con flechas rojas los flujos de retorno y los ascensos desde el fondo del valle forzados por la convergencia de los flujos de caída. En negro se representa el frente de brisa que avanza por la cuenca del Tajo.*

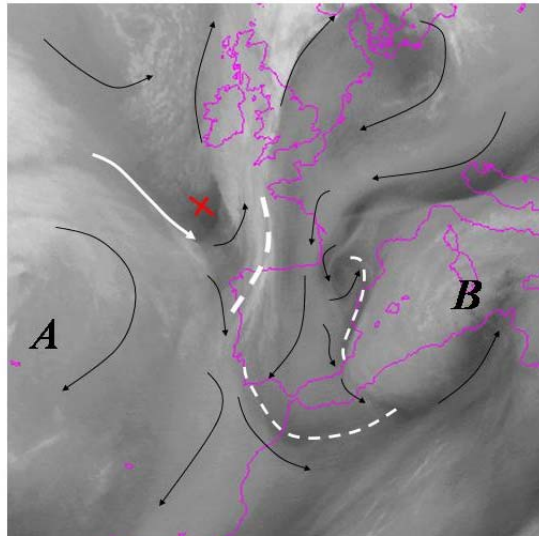


#### 4. ESTUDIO DE LA NOCHE DEL 16 AL 17 DE ENERO DE 2003.

##### 4.1. Análisis sinóptico de masas de aire mediante imágenes del canal WV de Meteosat

La Península Ibérica se halla bajo la influencia de una masa de aire estable, de procedencia centroeuropea, con cielos despejados. Por el oeste una masa atlántica está dirigida por un anticiclón centrado en las Azores y un vórtice que se está formando al norte de Galicia, a la salida de un chorro. Por el este, una depresión estacionaria limita los movimientos hacia el este de las masas de aire.

**Figura 3. Imagen Meteosat de las 0600 UTC en el canal WV. Las flechas negras representan los flujos relativos, la flecha blanca representa el chorro y en blanco discontinuo las bandas de deformación. El aspa roja señala el vórtice baroclino. Las letras A y B son, respectivamente, los centros anticiclónico y ciclónico.**



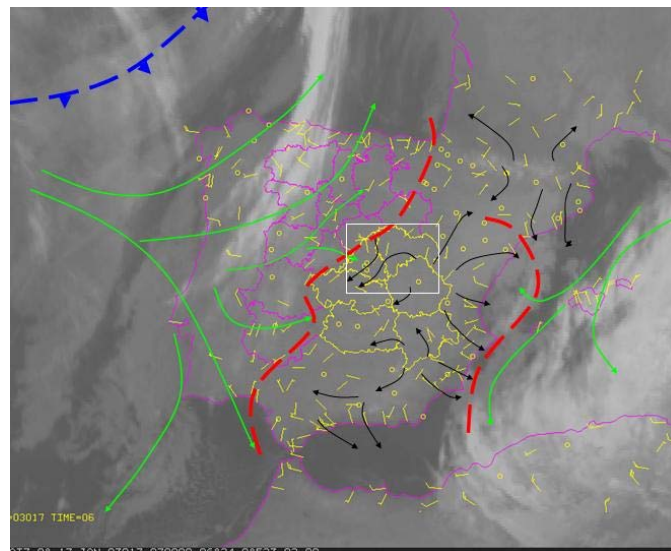
#### 4.2. Diagnóstico mesoescalar

Se observan tres bandas de deformación que bordean la Península (Figura 3):

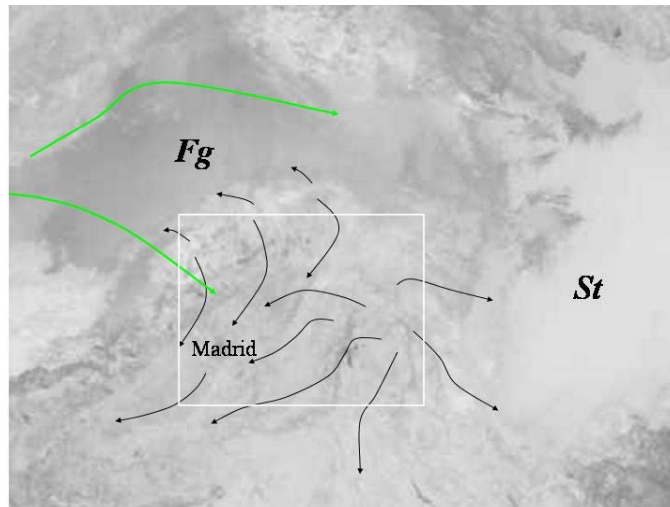
- Una banda muy frontogénica avanzando del noroeste hacia el este. (J.M Jansá. 1960) En la imagen WV se observa como una banda nubosa y alargada que adopta forma de S.
- Una que bordea la costa mediterránea, con un fuerte contraste de humedad en el canal WV. Imposibilita la mezcla con la masa mediterránea, salvo por el norte, donde se ha formado un vórtice barotrópico capaz de dirigir las nubes bajas hacia el interior del valle del Ebro, provocando el aumento de los contrastes térmicos y de humedad.
- En el sur, otra banda muy difuminada que se dirige hacia el vórtice del Mediterráneo.

En niveles bajos se observa un flujo de procedencia atlántica que penetra en el interior de la Península, invade por completo la Meseta Septentrional y, en la Meseta Meridional, llega hasta Extremadura, dejando el resto de la región a merced de los vientos locales, vientos catabáticos.

**Figura 4. Imagen Meteosat de 0600 UTC en el canal IR y representación de vientos en superficie. Las flechas dibujan las líneas de corriente en superficie: negras las correspondientes a los flujos catabáticos y verdes las que advecan masas marítimas. En rojo, líneas de convergencia y en azul, frente frío en superficie. Con un cuadrado blanco se señala el área de estudio.**



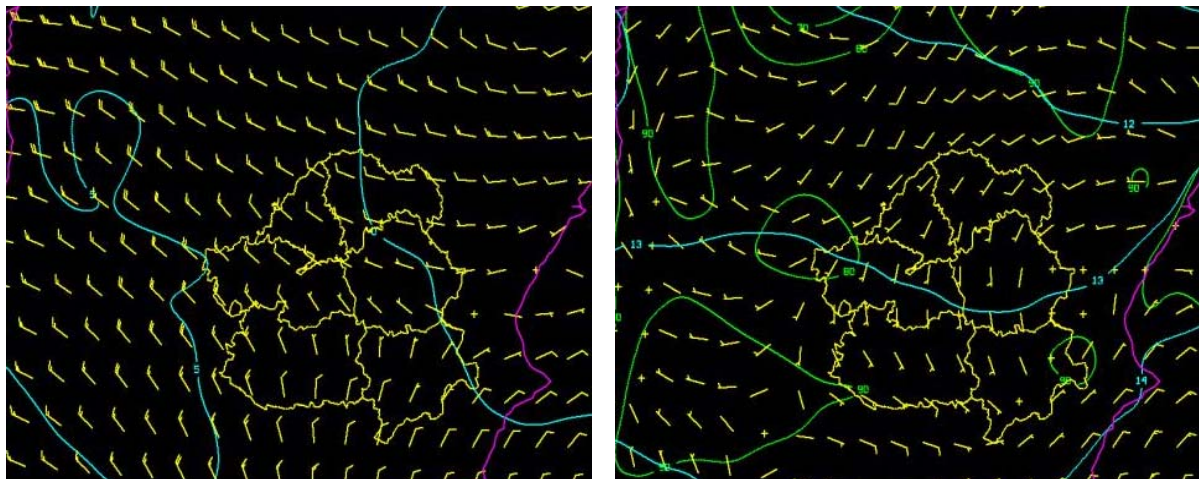
*Figura 5. Imagen NOAA de 0600 UTC en el canal IR. Se señalan los principales elementos del diagnóstico: catabáticos (flechas negras) y flujo del noroeste por encima (flechas verdes). Con un cuadrado blanco se señala el área de estudio.*



### 4.3. El modelo HIRLAM

El modelo HIRLAM reproduce adecuadamente el flujo atlántico en niveles bajos, pero no el catabático de la Meseta Meridional (Figura 6).

*Figura 6. Análisis del modelo HIRLAM a las 0600 UTC del día 17 de enero de 2003. A la izquierda, viento y temperatura en 850 hPa y a la derecha, viento, temperatura y humedad en superficie*



Como consecuencia de no reproducir el flujo catabático, la masa del este penetra en la Meseta Meridional advectada desde el sur por debajo de 850 hPa. Consiguientemente, el análisis de temperatura presenta importantes errores, con valores que exceden en más de 10°C a los observados.

### 4.4. El modelo TAPM. Descripción y resultados

El modelo de mesoescala TAPM ha sido 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 50x50x30 celdas, con 30, 10, 5 y 2 km de paso de malla, centrados aproximadamente en la zona del aeropuerto de Madrid-Barajas. Las salidas de TAPM que se muestran corresponden a los resultados sobre la malla más fina, aunque para mejorar la calidad de las figuras, se han representado los vectores de viento calculados por el modelo cada 4 km. La simulación se inicia a las 0000 UTC del día 16 de enero de 2003 y se extiende durante 48 horas hasta las 2400 UTC del día 17 de enero de 2003. La noche estudiada, por lo tanto, ocupa las horas centrales de la simulación.

Los campos de vientos calculados por el modelo TAPM consiguen reproducir satisfactoriamente las características de la circulación del viento catabático en la zona de estudio y descritas por el modelo conceptual. El aire sigue con exactitud el terreno, desplazándose hacia las cotas más bajas, es decir, descendiendo hasta el fondo de los valles (Figura 7).

La adaptación de la circulación de las masas de aire a la topografía se produce en un grueso de atmósfera considerable sobre el terreno. De hecho, es a partir de los aproximadamente 500m sobre el suelo (Figura 8) que el viento predicho por el modelo se homogeniza en todo el dominio siguiendo el forzamiento de la situación a gran escala que estaba dominada por un régimen del noroeste.

La convergencia en superficie de las masas de aire que descienden por las dos laderas que conforman los valles fuerza la elevación del aire, tal y como predice el modelo conceptual descrito anteriormente. La Figura 9, donde se ha representado un corte horizontal de velocidad vertical calculada a 200 m sobre el nivel de suelo muestra como las líneas de convergencia que el modelo ha generado y que se mostraron en la Figura 7 coinciden con franjas de velocidad vertical positiva (es decir, con regiones donde se producen ascensos).

Figura 7. Vientos a 10m sobre el terreno previstos para 0300 UTC del día D+1 por el modelo TAPM -se representan cada 4-km por claridad, aunque la simulación se ha realizado con una resolución de 2 km-

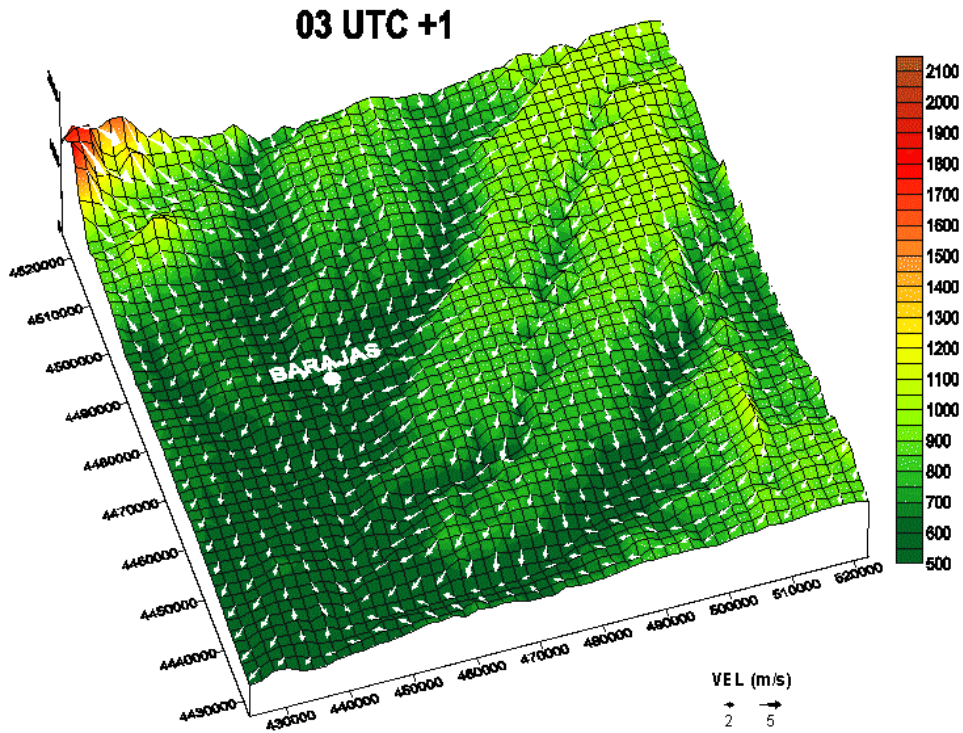
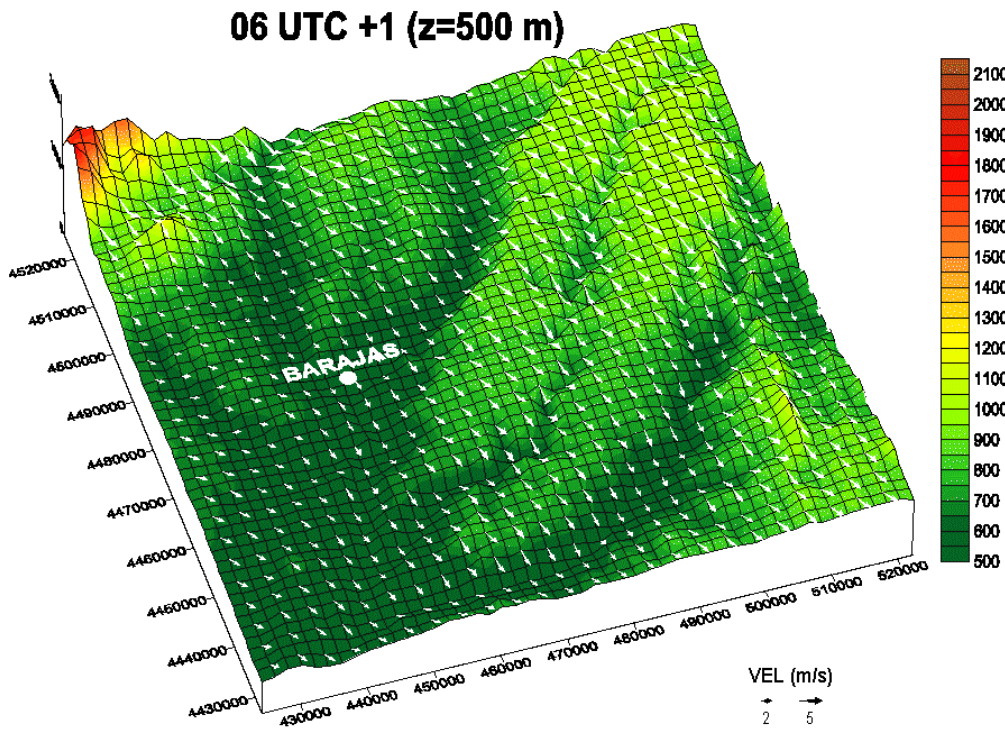
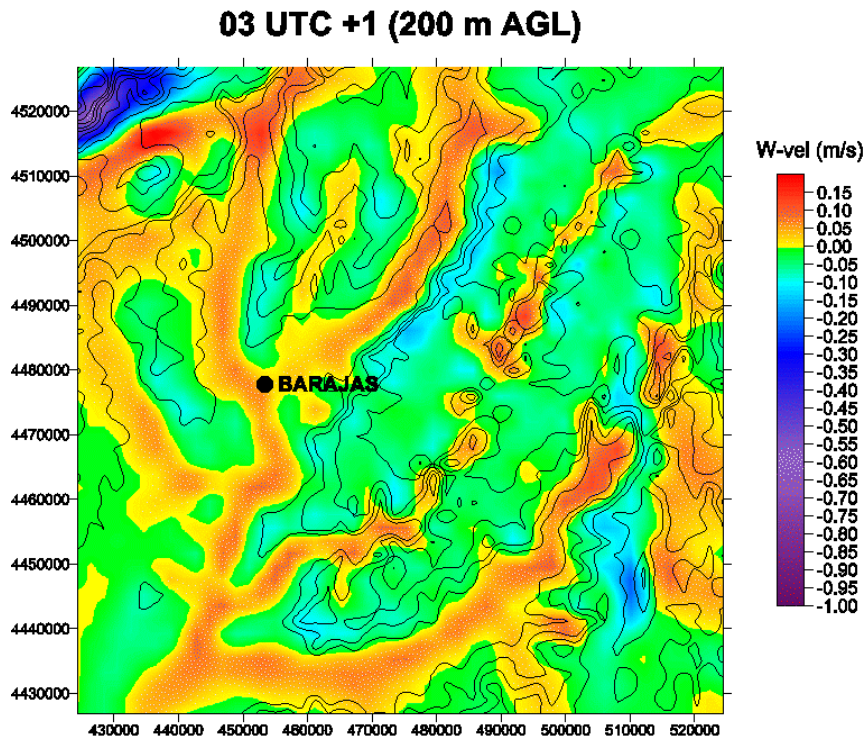


Figura 8. Vientos a 500 m sobre el terreno previstos para 0600 UTC del día D+1 por el modelo TAPM -se representan cada 4-km por claridad-). A esta altura no se aprecian los efectos del terreno sobre los campos de viento y domina la circulación a gran escala -NW-



*Figura 9. Velocidades verticales calculadas por el modelo TAPM a 200 m sobre el terreno, mostrando la elevación de las masas de aire sobre los valles. Estas velocidades ascendentes son consecuencia de la convergencia de flujos en el fondo de estos valles.*



#### 4.4. El modelo HIRLAM unidimensional (H1D): La microescala

La versión unidimensional de HIRLAM desarrollada en el INM parte de una columna inicial procedente del modelo HIRLAM 0.2. Incorpora un módulo de vientos catabáticos basado en las características del modelo conceptual descrito anteriormente. Este módulo está diseñado específicamente para el aeropuerto de Madrid-Barajas.

El esquema de flujo catabático se activa cuando hay inversión de tierra, modificando algunos forzamientos:

- Advección horizontal de viento. En el momento de activarse (o desactivarse) el esquema de catabáticos en un determinado nivel, se impone una advección horizontal de viento tal que el viento pase a ser nulo en el siguiente paso de tiempo.
- Gradiente horizontal de presión. Se considera un viento geostrófico que depende linealmente del valor de la inversión de tierra en grados, de tal forma que los vientos en superficie se aproximen a los valores climatológicos.
- Divergencia horizontal de masa. Se considera también que depende linealmente del valor de la inversión de tierra. Ello implica una modificación del perfil de velocidades verticales.
- Advección horizontal de humedad, proporcional a la velocidad del viento.
- Advección horizontal de temperatura. Se puede elegir entre distintos esquemas. En este caso se considera constante.

Se impone un espesor máximo y un valor máximo para la velocidad vertical.

Puede establecerse, además, que el módulo se desactive cuando la velocidad del viento supere un determinado umbral.



Con el seguimiento de una campaña de invierno, se ha comprobado que el valor de la velocidad vertical es determinante tanto para la aparición o no de la niebla como para su duración.

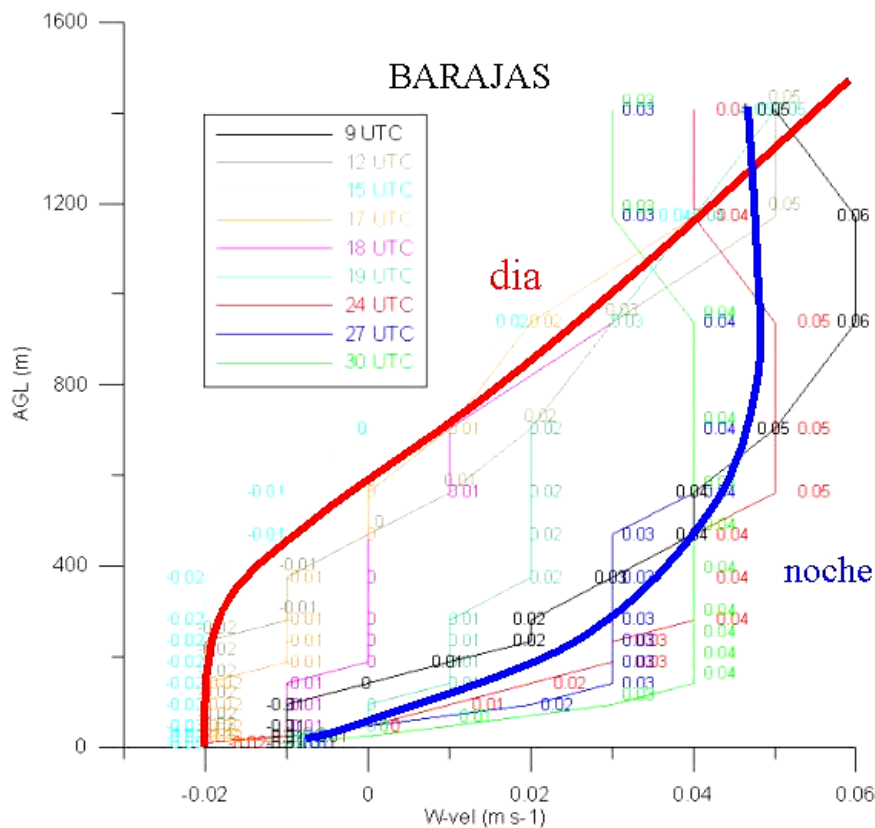
Los valores de velocidades verticales obtenidos por el modelo TAPM (Figura 10) vienen a verificar los valores usados en el forzamiento del modelo unidimensional. Dicha figura muestra los perfiles verticales de velocidad vertical ( $w$ ) extraídos para la celda del dominio de simulación correspondiente a la localización del aeropuerto. Se han extraído estos perfiles para diferentes horas de la simulación, pudiendo así apreciarse la evolución del mismo a lo largo del ciclo diario.

Se observa la diferencia de comportamiento de las curvas diurnas y el de las nocturnas hasta los 600 m de altitud. La transición se ve muy bien en la curva de las 19 horas. Sólo a partir de las 1900 UTC hay ascensos en la columna que va desde el suelo hasta 600 m. Las horas previas muestran siempre velocidades verticales negativas. Las 0900 UTC se puede considerar aún nocturna y por ello su aspecto se asemeja más a la curva típica de la noche.

La mayor profundidad de la capa atmosférica con velocidades verticales negativas durante el día parece confirmar que el ascenso de las masas de aire, y por lo tanto la convergencia, es un efecto propio del catabático, el cual se produce durante las horas nocturnas.

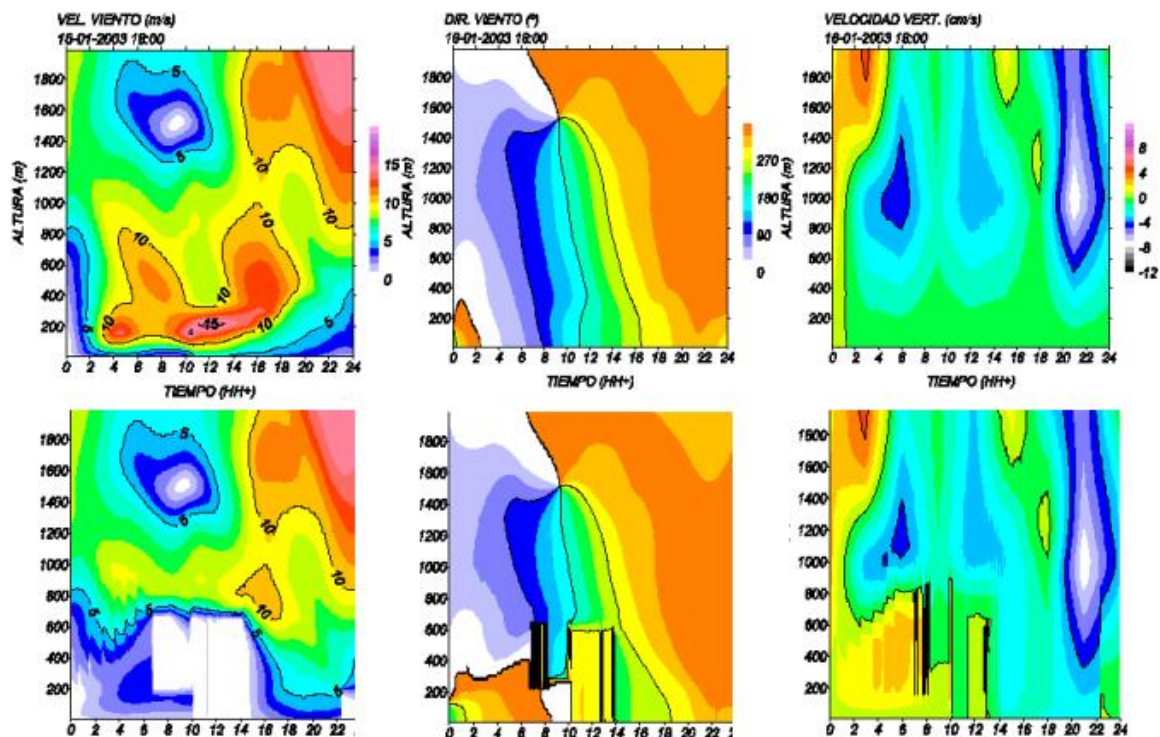
Los perfiles de horas nocturnas muestran un progresivo aumento de la velocidad vertical, que alcanza valores máximos -hasta  $0.05 \text{ ms}^{-1}$ -, concordantes con los valores estimados mediante el radar Doppler en campañas previas. El mayor aumento de la velocidad vertical se produce en los primeros 200 m sobre el suelo.

**Figura 10** Valores de la velocidad vertical obtenidos por las predicciones del modelo TAPM para diferentes horas a lo largo de la simulación. Con líneas gruesas se representa el perfil medio de la velocidad vertical durante el día (en rojo) y la noche (en azul)



El Modelo H1D responde, cuando se considera el catabático, con una mejora sustancial de los resultados en superficie. La Figura 11 muestra un ejemplo de la salida del modelo cuando no se ha activado el módulo catabático y cuando éste se ha activado. Cuando se ha considerado la formación de vientos catabáticos, el modelo prevé, de madrugada, un viento flojo del norte y una velocidad ascendente. Los valores previstos de temperatura y humedad en superficie son también mucho más realistas.

**Figura 11.** Valores del viento -velocidad en  $\text{ms}^{-1}$  y dirección en grados- y de la velocidad vertical -en  $\text{cms}^{-1}$ - obtenidos por el modelo H1D en la pasada de 1800 UTC del 16 de enero de 2003 para el aeropuerto de Madrid-Barajas. En la parte superior se representan las predicciones con el módulo de catabáticos desactivado y en la parte inferior cuando el módulo de catabático actúa. En abcisas el periodo de predicción y en ordenadas la altura sobre el terreno en metros.



## REFERENCIAS

- F. Aguado, D. Cano y B. Téllez: 1998, 'Avance sobre la influencia de los fenómenos mesoescalares en la contaminación de ozono sobre el área de Madrid', *Clima y Ambiente urbano en ciudades ibéricas e iberoamericanas*, pp. 521-532. Ed. Parteluz, Madrid
- D. Cano, J. Casado, I. Palacio, B. Téllez, E. Terradellas y J. Cuxart: 2001, 'Importancia de los flujos catabáticos en las predicciones para el aeropuerto de Madrid-Barajas', V Simposium Nacional de Predicción, INM, Madrid.
- D. Cano, I. Palacio, B. Téllez y J. Albaladejo: 2001, 'Estudios de niebla realizados en el CMT en Castilla – La Mancha', V Simposium Nacional de Predicción, INM, Madrid.
- P.J. Hurley, A. Blockley and K. Rayner: 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.
- P. J. Hurley: 2002, 'The Air Pollution Model (TAPM) Version 2. Part 1: Technical Description', CSIRO Atmospheric Research Technical Paper No. 55. Ver [www.dar.csiro.au/TAPM](http://www.dar.csiro.au/TAPM).
- J. M. Jansá: 1960, *Tratado de meteorología teórica*, INM, Madrid