

# APLICACIÓN DE UN MODELO UNIDIMENSIONAL PARA PREDICCIONES EN EL AEROPUERTO DE MADRID-BARAJAS

Enric Terradellas (1)

Joan Cuxart (2)

(1) GPV del CMT en Cataluña. INM

(2) Servicio de Modelización Numérica del Tiempo. INM

## RESUMEN

Actualmente está en desarrollo la aplicación de un modelo de predicción unidimensional (1D) para pronósticos locales. El modelo se basa en el esquema de turbulencia que se encuentra operativo en HIRLAM (CBR). Un modelo 1D presenta la ventaja de permitir trabajar con resoluciones verticales y temporales mucho mejores que las de los modelos convencionales 3D. Con ello se pretende conseguir una mejora en las predicciones a corto plazo para lugares y fenómenos meteorológicos que requieran una especial precisión. Se analizan los distintos métodos utilizados en el modelo para obtener información de los intercambios tierra-atmósfera (momento, calor y humedad) y del estado tridimensional de la atmósfera (gradiente horizontal de presión, divergencia horizontal de masa, advecciones horizontales de temperatura, humedad y viento) y se analizan sus ventajas e inconvenientes.

## 1. Introducción

Los modelos numéricos, cuyo desarrollo en las últimas décadas ha permitido una excepcional mejora en la predicción del tiempo tanto a corto como a medio plazo, presentan serias deficiencias cuando se requiere una predicción precisa de los elementos del tiempo en un lugar concreto, especialmente debido a la imposibilidad de reproducir fenómenos meteorológicos de pequeña escala espacial y temporal que, en muchas ocasiones, son determinantes en el tiempo que finalmente se observa.

En los últimos años, estas predicciones locales se han abordado desde distintos puntos de vista. Probablemente el más común ha sido el uso de herramientas estadísticas, como M.O.S. o perfect-prog, aplicadas a las salidas de los modelos, a datos de observación y/o a información procedente de registros climatológicos (Wilks, 1995). Otro método utilizado es el basado en la predicción por conjuntos (Molteni, Buizza y otros, 1996). Un tercer método, basado en la utilización de modelos 1D, se ha empleado en varios lugares. El Servicio Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) lo ha utilizado en la predicción de temperaturas sobre carreteras y Météo-France en la predicción de nieblas en el Pas de Calais (Bergot y Guédalia, 1994).

Una aplicación de este último tipo está actualmente en desarrollo en el I.N.M. para mejorar las predicciones en el aeropuerto de Madrid-Barajas, particularmente las de niebla. Un modelo 1D presenta, sobre los modelos 3D, la ventaja de que se puede aumentar en gran medida su resolución vertical y temporal, permitiendo reproducir con gran precisión las evoluciones locales de las magnitudes físicas atmosféricas. En cambio, el desconocimiento de la estructura horizontal de los campos meteorológicos imposibilita el cálculo de algunos de los términos presentes en las ecuaciones que describen estas evoluciones. Por ello, estos términos deben ser evaluados a partir de las salidas de los modelos 3D, del valor de las magnitudes en el propio modelo 1D o del conocimiento climatológico. Los tres métodos están presentes, en mayor o menor medida, en el modelo que se describe, utilizándose para cada término el método que ofrece mejores resultados.

Además de los términos dependientes de la estructura tridimensional de la atmósfera, los intercambios de momento, calor y humedad en el suelo deben ser también evaluados, puesto que constituyen la condición de contorno inferior del modelo.

## 2. Descripción del modelo

El modelo 1D se basa en el esquema de turbulencia CBR (Cuxart, Bougeault y otros, 2000), actualmente operativo en HIRLAM. Este esquema utiliza la energía cinética turbulenta como variable de pronóstico.

Las variables del modelo, aparte de la energía cinética turbulenta, son la temperatura potencial, la humedad específica y las componentes del viento. La velocidad vertical es diagnosticada en cada paso de tiempo, pero no constituye una variable pronosticada. La temperatura del aire y la humedad relativa son magnitudes derivadas.

Actualmente se está utilizando una rejilla de 125 niveles en la vertical con un primer nivel a 10 m sobre el terreno y una distancia entre niveles de 20 m hasta 1800 m. Esta distancia aumenta de forma exponencial hasta 12.7 km. El paso de tiempo es de 15 s.

En la figura 1 pueden verse los productos que se obtienen actualmente de forma rutinaria.

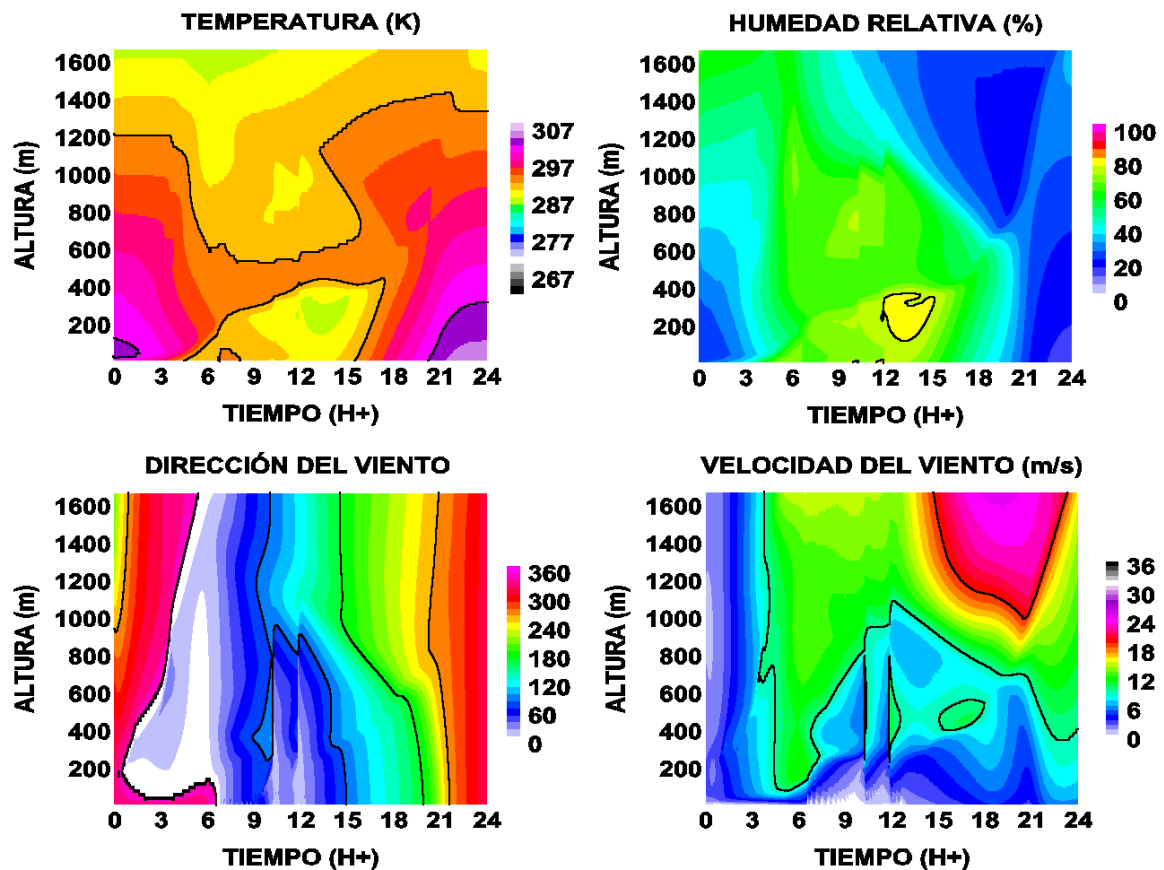


Figura 1: Pasada de las 1800 GMT del día 4 de septiembre de 2001 para el aeropuerto de Madrid-Barajas. Predicción para 24 horas.

## 3. Estimación de las variaciones horizontales

Para la estimación de las variaciones horizontales de las magnitudes meteorológicas presentes en las ecuaciones que describen las evoluciones de la atmósfera se consideran las salidas del modelo HIRLAM 0.2.

Se ingestan las predicciones cada 3 horas para los distintos niveles en los cuatro puntos de rejilla adyacentes al lugar para el que se realiza la predicción. Estos valores son interpolados temporalmente a los sucesivos pasos de tiempo y verticalmente a los niveles del modelo 1D.

### **3.1 Gradiente horizontal de presión**

Las variaciones horizontales de presión son demasiado lentas para poder ser estimadas a partir de los valores que esta magnitud adopta en puntos separados únicamente 0,2 grados. Además, al ser HIRLAM un modelo en coordenadas no horizontales, los valores de la presión deberían ser reducidos a un mismo nivel, con lo cual, las imprecisiones serían, generalmente, de mayor orden de magnitud que la propia variación horizontal. Por ello, el gradiente de presión es estimado a partir de la hipótesis de que por encima de 1000 metros sobre el terreno, el viento real es igual al geostrófico y que por debajo, el viento geostrófico es constante. Se considera, pues, el viento de HIRLAM interpolado temporal y verticalmente y a partir de él se calcula el gradiente horizontal de presión.

### **3.2 Advección horizontal de temperatura, humedad específica y viento**

Las variaciones horizontales de estas tres magnitudes son, generalmente, más rápidas que las de presión. Sus variaciones verticales, en cambio, son más lentas, por lo que la imprecisión en la interpolación vertical es menor. Por ello, sus gradientes horizontales pueden ser evaluados sin mayores problemas a partir de los valores previstos en los cuatro puntos de rejilla. La advección se calcula mediante el viento en el punto para el que se realiza la predicción, promediado horizontalmente a partir del valor en los cuatro puntos de rejilla.

En un futuro inmediato se pretende calcular las advecciones con el viento obtenido en el modelo 1D, en lugar del viento previsto por HIRLAM. Se espera que ello suponga una mejora en las predicciones de todas las magnitudes, puesto que, actualmente, puede afirmarse que las predicciones de viento en las capas bajas, especialmente en lo que se refiere a dirección, son mejores en el modelo 1D que en HIRLAM.

Los gradientes horizontales de temperatura, humedad específica y viento pueden variar considerablemente según la escala que se considere. En el presente caso, se ha adoptado la única solución aceptable (los cuatro puntos adyacentes de la rejilla de  $0.2^\circ$ ), puesto que no se dispone de información en escalas menores, mientras que si se consideraran escalas más grandes, tomando puntos de rejilla más alejados, éstos estarían situados en lugares con características geográficas y climáticas demasiado distintas (algunos de ellos sobre el Sistema Central, o al norte del mismo). Al tomarse un valor cada tres horas, parece lógico considerar una escala horizontal del mismo orden de magnitud que el recorrido del viento en este periodo. Ello supondría, en general, un ancho de rejilla algo mayor, especialmente en niveles altos. Una posibilidad que se está evaluando es la de mantener el ancho de rejilla para el cálculo de gradientes en los niveles más bajos, con mayor influencia del suelo y, generalmente, vientos más flojos, y otro mayor en las capas altas.

La gran variabilidad espacio-temporal de los gradientes horizontales en algunas zonas, especialmente en las cercanías de sistemas frontales u otras discontinuidades atmosféricas, constituye otro problema importante. Al disponerse únicamente de información cada tres horas, episodios con fuertes advecciones asociadas pueden pasar desapercibidos y, por el contrario, el modelo 1D podría prolongar en el tiempo fuertes advecciones que en la realidad se limitan a unos pocos minutos. El problema de subestimación de las advecciones no ha sido resuelto. En cambio, el problema de su sobreestimación ha sido, al menos, abordado, puesto que en algunas ocasiones era responsable de fuertes variaciones en las magnitudes pronosticadas que no se correspondían a la realidad. En la actual versión, cada tres horas son guardados los valores máximo y mínimo de temperatura, humedad específica y componentes zonal y meridiana del viento en los cuatro puntos de rejilla adyacentes al punto de cálculo. La advección positiva de una variable deja de ser considerada cuando el valor de dicha variable en el modelo 1D alcanza el valor máximo correspondiente interpolado temporal y verticalmente. Análogamente, las advecciones negativas no son consideradas cuando el valor de la magnitud en el modelo 1D cae por debajo del correspondiente valor mínimo interpolado.

Se consideran nulas las advecciones en un nivel dado si la altitud del punto de rejilla más cercano en el cuadrante de donde sopla el viento supera el nivel considerado.

### 3.3 Divergencia horizontal de masa

Las advecciones verticales de temperatura, humedad específica y viento son calculadas a partir del diagnóstico, en cada paso de tiempo y nivel, de la velocidad vertical. Este diagnóstico se realiza a partir de la ecuación de continuidad en coordenadas horizontales:

$$\text{div}_H(\rho\vec{v}) + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = -\frac{\partial\rho}{\partial t} \quad [1].$$

En esta ecuación, las variaciones locales de densidad se calculan a partir de los valores del propio modelo. Las divergencias horizontales de masa, en cambio, se calculan interpolando vertical y temporalmente los valores de densidad y viento previstos por HIRLAM en los cuatro puntos de rejilla adyacentes.

Se realizan dos cálculos de la velocidad vertical, el primero partiendo de la condición de contorno de que la velocidad vertical es nula en el suelo y la segunda partiendo de que esta velocidad es nula en el nivel más alto, ya en plena estratosfera. El valor final de la velocidad vertical se obtiene promediando los resultados de los dos cálculos, con una ponderación que varía linealmente con la altura, desde el suelo en que se tiene en cuenta únicamente el primer valor hasta el límite superior en que se tiene en cuenta únicamente el segundo. El procedimiento del doble cálculo disminuye el riesgo de que los errores se acumulen dando lugar a velocidades verticales demasiado altas.

Al igual que en el caso de las advecciones horizontales, no se consideran las divergencias horizontales de masa cuando la altitud del punto de rejilla más próximo en la dirección de donde sopla el viento supera la del nivel considerado.

## 4. Estimación de los intercambios superficiales

El modelo 1D carece de módulo de cálculo de balance de energía en superficie, por lo cual, los intercambios de calor, momento y humedad con el suelo deben ser suministrados externamente o evaluados a partir de los valores que las variables meteorológicas adoptan en el propio modelo. Un módulo de balance energético requiere un módulo de subsuelo y un módulo de radiación.

La incorporación de un módulo de subsuelo al modelo 1D no presenta grandes dificultades, suponiendo que se disponga de los datos adecuados para su inicialización, básicamente temperatura y humedad del subsuelo. La introducción de un módulo de radiación, en cambio, es más compleja. En primer lugar, debe tratarse de un esquema muy simplificado, para evitar que el tiempo de cálculo consumido sea muy grande, dado el pequeño paso de tiempo utilizado. Además, conlleva la necesidad de disponer de nueva información, especialmente sobre la cobertura nubosa. Esta información puede proceder de HIRLAM, con el problema de que la nubosidad suele ser bastante mal predicha por los modelos, o bien del propio modelo 1D, con la dificultad añadida de tratarse de una información demasiado local.

Por todo ello, actualmente, para evaluar los intercambios superficiales, se ingestan en el modelo 1D los valores horarios previstos por HIRLAM de calor latente, calor sensible y momento intercambiados entre la superficie y la atmósfera.

### 4.1 Flujo superficial de calor y humedad

Los calores latente y sensible intercambiados entre el suelo y la atmósfera se evalúan simplemente interpolando al paso de tiempo correspondiente los valores horarios obtenidos de HIRLAM. La humedad intercambiada es evaluada a partir del calor latente.

## 4.2 Flujo superficial de momento

En las primeras versiones del modelo 1D se utilizó el mismo mecanismo descrito en el apartado anterior para evaluar el intercambio de momento entre el suelo y la atmósfera. No obstante, pronto se comprobó que el método era inviable. Por una parte, en la pasada operativa de HIRLAM existe una clara sobreestimación de los intercambios de momento, al menos en la zona de Madrid. Ello es debido a que algunos procesos sub-rejilla son simulados mediante una artificiosa modificación de la orografía. Por otra parte, se producía habitualmente una clara incoherencia entre los vientos del modelo 1D y los intercambios de momento evaluados a partir de los valores de HIRLAM, tanto en la magnitud como en la relación entre las componentes zonal y meridiana del momento intercambiado.

Por todo ello, surgió la necesidad de evaluar los intercambios de momento a partir de los valores de las distintas magnitudes en el propio modelo.

Actualmente el flujo de momento se calcula únicamente a partir del valor del viento en el nivel más bajo del modelo, mediante la introducción de un parámetro de rugosidad (Stull, 1988). La expresión utilizada es:

$$\begin{aligned}\overline{u'w'_0} &= C_D um \\ \overline{v'w'_0} &= C_D vm\end{aligned}\quad [2],$$

siendo  $u$ ,  $v$  las componentes zonal y meridiana del viento,  $m$  su módulo,  $w$  la velocidad vertical y  $C_D$  un coeficiente cuyo valor para una atmósfera neutralmente estratificada es:

$$C_D = k^2 \left( \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \right)^{-2} \quad [3]$$

siendo  $k$  la constante de Von Karman, de valor 0,4, y  $z_0$  el parámetro de rugosidad, que en nuestro caso se ha tomado igual a 0,16 metros. En la versión actual del modelo 1D, se utiliza la expresión [3] sea cual sea la estabilidad de la estratificación. En el futuro es posible que se introduzcan expresiones distintas dependiendo del tipo de estratificación, como propone el propio Stull, aunque la experiencia no demuestra que la introducción de expresiones más complejas mejore sustancialmente los resultados.

## 5. Introducción de valores climatológicos: módulo de vientos catabáticos

El seguimiento de la evolución del tiempo en el aeropuerto de Madrid-Barajas ha demostrado la determinante influencia que ejercen fenómenos meteorológicos de escala inferior a las que pueden ser resueltas por el modelo HIRLAM 0.2. Entre estos fenómenos, especialmente en la evolución de las variables meteorológicas de las capas bajas durante la noche, los vientos catabáticos juegan un papel fundamental. La presencia de estos vientos altera en gran medida las distribuciones locales de las distintas variables meteorológicas, por lo cual, una buena predicción necesitará la incorporación de estas nuevas distribuciones en sustitución de las que proporciona HIRLAM. Y estas nuevas distribuciones no pueden proceder sino de la climatología local. Todo ello es desarrollado en más profundidad en otra comunicación presentada en el presente Simposio (Cano, Casado y otros, 2001).

El primer problema, sin embargo, consiste en decidir en qué momentos entran en juego unos u otros forzamientos. En el módulo actual, se utilizan los forzamientos climatológicos debidos a los vientos catabáticos siempre que existe una inversión de tierra, desde la propia superficie hasta el nivel en que la temperatura vuelve a ser inferior a la superficial. Los valores del gradiente horizontal de presión y de la divergencia horizontal de masa se consideran proporcionales a la magnitud de la inversión.

La introducción de este módulo, aunque susceptible de mejoras, ha contribuido en gran medida a una mayor precisión en las predicciones. Por un lado, ha eliminando prácticamente el fenómeno del *runaway cooling*, consistente en un excesivo enfriamiento nocturno de los niveles más bajos debido a la incapacidad de la

atmósfera de distribuir correctamente en la vertical este enfriamiento a causa de la fuerte estabilidad de la estratificación y del débil viento. Al mismo tiempo, ha aumentado el enfriamiento en las horas cercanas al ocaso, cuando empieza a romperse por abajo la estratificación neutral o inestable. Este enfriamiento no era bien reproducido por el modelo 1D hasta la introducción de este módulo.

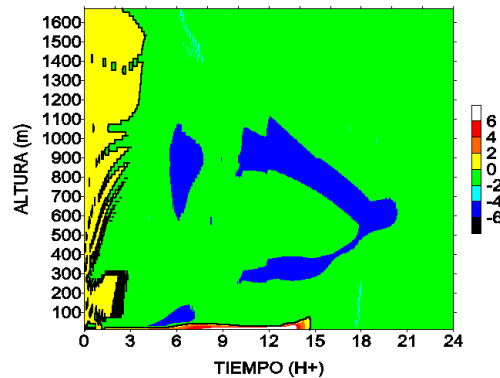


Figura 2: Pasada de las 1800 GMT del día 4 de setiembre de 2001 para el aeropuerto de Madrid-Barajas. Efecto del módulo de catabáticos sobre la temperatura de las capas más bajas.

En la figura 2 se ha representado, en función del tiempo y la altura sobre el terreno, un ejemplo de la diferencia entre las temperaturas obtenidas con el módulo de catabáticos y sin él. Puede verse claramente cómo el módulo de catabáticos ha provocado un enfriamiento general de la atmósfera. Sin embargo, junto al suelo y por la noche la temperatura ha aumentado a causa de la desaparición del *runaway cooling*.

## 6. Conclusiones

Un modelo 1D permite simular la evolución local de los elementos del tiempo con una gran resolución vertical y temporal.

El desconocimiento de la estructura tridimensional de la atmósfera en los modelos 1D los hace dependientes de los modelos 3D. No obstante, en algunos casos, especialmente para fenómenos de pequeña escala que no son bien resueltos en los modelos tradicionales, como pueden ser los vientos catabáticos, la evolución de la atmósfera queda mejor reproducida recurriendo al conocimiento climatológico de estas estructuras.

Los intercambios de momento, calor y humedad entre tierra y atmósfera deben asimismo ser introducidos externamente como una condición de contorno, aunque, en el presente modelo, los flujos de momento son estimados a partir de la evolución de las magnitudes del propio modelo.

## Referencias

- Bergot, T. Y D. Guédalia, 1994: Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 1218-1230.
- 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 Simposio Nacional de Predicción del I.N.M. Madrid (comunicación)
- Cuxart, J., P. Bougeault y J.-L. Redelsperger, 2000: A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 126, 1-30.
- Molteni, F., Buizza, R., Palmer, T.N. y Petroliagis, T., 1996: The new ECMWF ensemble prediction system: methodology and validation. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 122, 73-119
- Stull, R.B., 1988: An introduction to Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Wilks, D.S., 1995: Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic Press, San Diego.