

# Harmonie,

## EL NUEVO MODELO DE ALTA RESOLUCIÓN DE AEMET

JAVIER CALVO SÁNCHEZ ÁREA DE MODELIZACIÓN, AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA.

AEMET está utilizando quasi-operativamente el modelo No-Hidrostático HARMONIE con una resolución de 2.5 km. Es un modelo que resuelve la convección profunda explícitamente y que representa un gran valor añadido respecto a modelos de mayor escala como los de HIRLAM y del Centro Europeo. Destaca especialmente en la predicción de fenómenos convectivos y simulación de precipitaciones intensas. El uso operativo de este tipo de modelo requiere gran capacidad de supercomputación.

### Introducción

Los modelos numéricos de predicción son la herramienta básica para realizar predicciones meteorológicas. Lo más habitual es utilizar un modelo global, que nos representaría las escalas sinópticas y gran escala, y anidado a él un modelo regional de área limitada que nos representaría los efectos meteorológicos locales. En este artículo haremos una breve descripción de los modelos numéricos de predicción utilizados en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), veremos las principales características del nuevo modelo de alta resolución, HARMONIE, mostraremos resultados que ilustran su comportamiento y terminaremos con las perspectivas de futuro.

### Modelos globales. El modelo del Centro Europeo

El Centro Europeo de Predicción a Plazo Medio (ECMWF) está formado actualmente por 20 países cuya finalidad principal es del desarrollo y explotación operativa de un modelo de predicción para el plazo medio. Su versión determinista tiene una resolución de 16 km y se integra hasta 10 días. En AEMET es utilizado en la predicción operativa tanto de corto plazo como de medio plazo. El carácter caótico de la atmosfera hace que los errores vayan aumentando a medida que nos alejamos del instante inicial de la predicción y disminuya la calidad de las simulaciones. Para evaluar la predecibilidad atmosférica se realizan múltiples integraciones de una versión del modelo de menor resolución (predicción por conjuntos). Las distintas integraciones difieren en las condiciones iniciales y/o en la configuración del modelo. El sistema de predicción por conjuntos del Centro Europeo se corre a una resolución de 25 km hasta 10 días, a 50 km hasta 15 días y también para las predicciones mensuales. Además, una vez al mes se corre una predicción estacional hasta 7 meses aunque en nuestras latitudes, la predecibilidad a largo plazo es bastante pequeña. Los modelos de predicción han mejorado mucho en los últimos años consiguiendo el Centro Europeo disminuir los errores en un día cada década. Las mejoras están muy ligadas a las mejoras en la capacidad de supercomputación, la mejora en los sistemas de observación y los avances científicos en modelización.

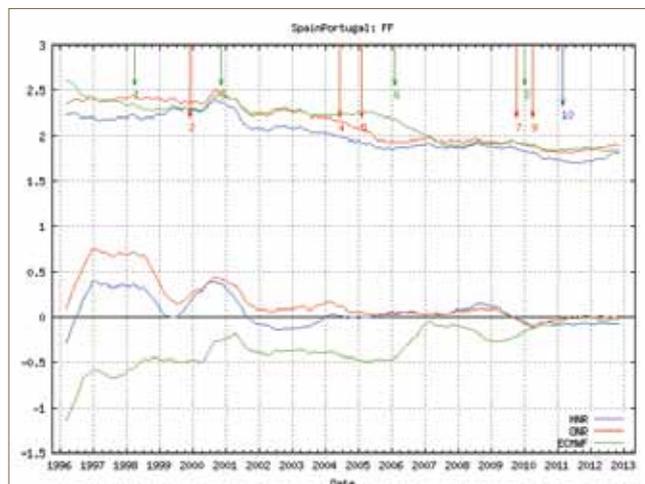
### Modelos numéricos de predicción

Los modelos numéricos de predicción resuelven las ecuaciones del flujo atmosférico para calcular la evolución de la atmósfera a partir de un instante dado. Para ello realizan los cálculos en una rejilla de puntos en la horizontal y la vertical. Es lo que se conoce como la discretización de las ecuaciones. La condición inicial se determina mediante un análisis de las observaciones disponibles que se difunden por todo el globo en tiempo casi real gracias a una red internacional de comunicaciones. La distancia entre los puntos de la rejilla determina la resolución del modelo. En principio los fenómenos que ocurran en escalas superiores a unas seis veces la resolución del modelo podrán ser resueltos por la dinámica del modelo, los que ocurran a escalas inferiores tendrán que ser parametrizados. Es decir, tendremos que tratar de estimar los efectos estadísticos de los procesos físicos no resueltos a partir de las variables resueltas por el modelo. Los modelos numéricos de predicción requieren gran capacidad de supercomputación para permitir disponer de las predicciones en un corto espacio de tiempo. Gran parte de los mayores ordenadores del mundo son dedicados a la simulación meteorológica o climática (<http://www.top500.org>).

### Modelos regionales. El modelo HIRLAM

Los modelos regionales de área limitada pueden integrarse con una resolución mayor para mejorar la predicción de los fenómenos locales. Utilizan condiciones en la frontera proporcionadas por un modelo global y debido a un menor tiempo de espera para las observaciones, se dispone de sus predicciones más rápidamente que para los modelos globales.

AEMET forma parte del consorcio HIRLAM desde 1994 e integra operativamente el modelo HIRLAM en dos resoluciones, 16 y 5 km. En Navascués y otros (2013) se analiza la evolución del modelo del Centro Europeo y del modelo HIRLAM durante las úl-



**Figura 1: Error cuadrático medio y sesgo de las predicciones de la velocidad del viento a 10m comparadas con observaciones de España y Portugal. Se incluyen los modelos ECMWF, HIRLAM (ONR) y HIRLAM alta resolución (HNR). Se realiza una media móvil de 12 meses para ver mejor la tendencia en la evolución de los errores desde el año 1996. Las flechas indican actualizaciones importantes en los modelos que están detalladas en Navascués y otros (2013).**

timas décadas. En la figura 1 mostramos la evolución de los errores de predicción del viento a 10m. Vemos que durante los últimos 17 años los errores han disminuido constantemente. En esta figura también se aprecia la disminución de los errores al aumentar la resolución (comparación de HIRLAM 5 km y 16km). También puede verse que el valor añadido del modelo HIRLAM respecto al modelo del Centro Europeo ha disminuido en los últimos años debido a las mejoras en el modelo global y en su análisis y especialmente al aumento de su resolución.

AEMET tiene un sistema de predicción por conjuntos de corto plazo (García-Moya y otros, 2011). Es un sistema multi-modo que se integra 2 veces al día hasta 72 horas con una resolución de 25 km.

## Una nueva generación de modelos. Modelos No-Hidrostáticos que resuelven la convección

Una gran mejora en la predicción de los fenómenos locales se ha conseguido con los modelos que resuelven la convección. Suelen integrarse a resoluciones de por lo menos 2 km para evitar tener que incluir una parametrización de la convección profunda. Son modelos No Hidrostáticos aunque los efectos no hidrostáticos son relativamente pequeños. La mayoría de los efectos de la orografía también son resueltos explícitamente por el modelo (bloques, ondas orográficas, etc.).

Son modelos muy sofisticados especialmente en el tratamiento de procesos de capa límite, superficie, nubes y microfísica. Su desarrollo requiere grandes grupos de investigación y, generalmente, son el resultado de colaboración internacional. Modelos de este tipo son el WRF, COSMO (DWD), UM (Met-Office) y AROME (Météo-France). Requieren una gran capacidad de cálculo pero ya están operativos en bastantes países europeos.

## Escalas grises para el tratamiento de la convección

Podemos notar que se ha dado un gran salto en la resolución de los modelos operativos regionales que han pasado desde los 10-16 km a resoluciones inferiores a 2 km. Esto se debe a tratar de evitar las escalas grises para la convección profunda. Es decir, las escalas en las que el modelo empezaría a resolver explícitamente las nubes convectivas pero todavía necesitaría una parametrización de la convección profunda. Son escalas difíciles de representar y, por eso, los modelos tienden a utilizar resoluciones de al menos 3 km en las que ya podremos desactivar la parametrización de la convección. Con el conocimiento actual parece que se necesitarían resoluciones en torno a 1 km de resolución horizontal para resolver la mayoría de los procesos ligados a la convección profunda.

## El modelo HARMONIE

En 2005, los consorcios HIRLAM y ALADIN empezaron a colaborar para desarrollar un sistema destinado a la predicción operacional a escalas del orden del km de resolución. El nuevo sistema denominado HARMONIE (HIRLAM-ALADIN Research on Meso-scale Operational NWP In Europe) ha sido desarrollado principalmente por Météo-France y el consorcio ALADIN en colaboración con el Centro Europeo y el grupo HIRLAM.

La asimilación utiliza un esquema 3D-Var que comparte gran parte del código con los modelos ECMWF y ARPEGE. Para las variables de superficie se utiliza el esquema de Interpolación Óptima. La asimilación de datos a escalas de pocos km es un gran desafío incluyéndose gran variedad de datos: satélites, radares, observaciones GPS, datos de aviones, etc además de las observaciones convencionales.

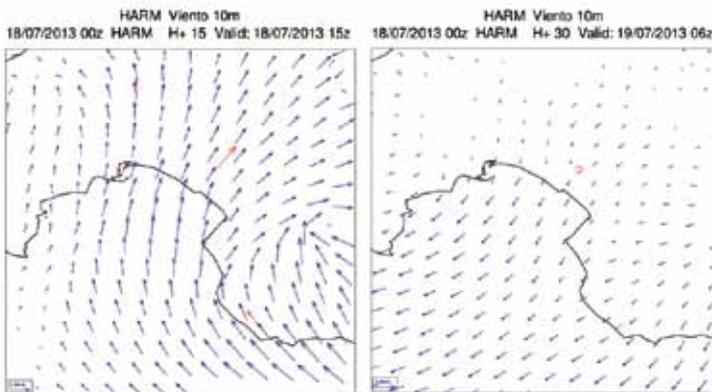
La dinámica No-Hidrostática es la del modelo ALADIN y existe la posibilidad de elegir entre distintas configuraciones para la física. En AEMET la configuración más utilizada es AROME (Seity et al., 2011) que está diseñada para escalas a las que la convección está resuelta por el modelo. AROME es también el modelo operativo en Météo-France y está empezando a ser utilizado en muchos países de los consorcios HIRLAM y ALADIN. En general cuando hablamos de HARMONIE nos estamos refiriendo a la configuración AROME.

La física del modelo HARMONIE/AROME es una adaptación de la del modelo de investigación Meso-NH. Incluye una microfísica bastante sofisticada (ICE3) que utiliza tres variables de pronóstico para la precipitación (lluvia, nieve y nieve granulada). Por otra parte se utiliza un esquema de Energía Cinética Turbulenta (TKE). La convección en la capa límite (seca y húmeda) se trata de forma unificada (Eddy-Diffusivity Mass-Flux). Los procesos superficiales se basan en el esquema ISBA para teselas suelo-vegetación y el esquema TEB para suelos urbanos. Para la radiación se utiliza una versión del esquema del Centro Europeo.

## Resultados

AEMET corre cuatro veces al día el modelo HARMONIE con la configuración AROME a 2.5 km de resolución desde Octubre de 2011. Las mayores diferencias respecto al sistema descrito en Seity y otros (2011) son los siguientes: Los scripts de control y mantenimiento del código, la verificación y el monitoring se han heredado del modelo HIRLAM; la convección unificada es EDMFM en vez de EDKF y por el momento sólo se realiza análisis de superficie iniciando los campos en altura a partir del modelo del Centro Europeo que también es utilizado como condiciones de contorno.

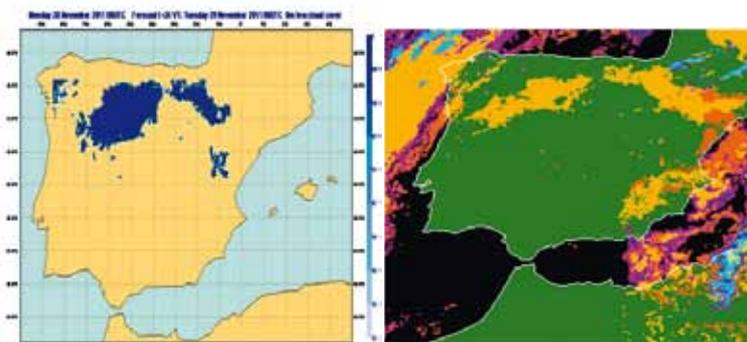
Las predicciones locales han mejorado significativamente con HARMONIE 2.5 km comparadas con las de modelos de mayor resolución como HIRLAM y Centro Europeo. El aumento de la



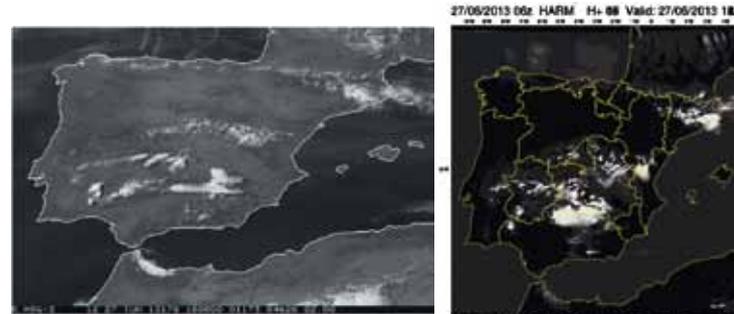
**Figura 2:** Simulación de viento realizada en la Bahía de Palma de Mallorca. Se muestran predicciones válidas a 15 UTC y 06 UTC para mostrar la capacidad del modelo para la simulación de las brisas. Las flechas rojas corresponden a las observaciones disponibles de la red de observación de AEMET.

resolución produce una clara mejora en las predicciones de viento: vientos regionales y brisas (fig. 2). La predicción de nieblas y nubes bajas mejora bastante, especialmente la detección de nieblas sobre tierra (fig. 3) aunque parece que hay una clara tendencia a la sobrestimación.

Probablemente el mayor impacto se produce en la predicción de fenómenos convectivos. La convección suele mostrar un claro ciclo diurno que no suele ser bien simulado por los modelos

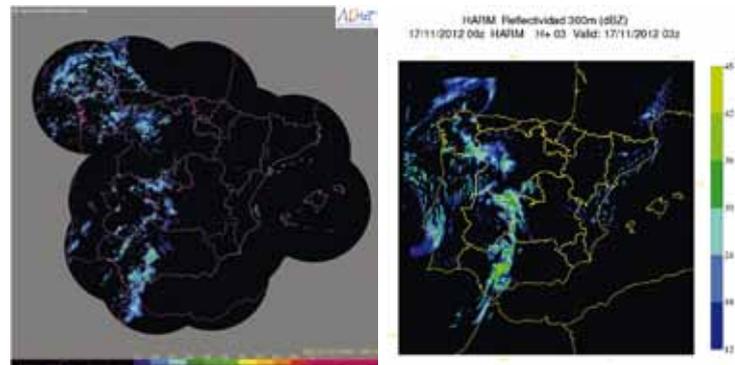


**Figura 4:** Comparación de la imagen visible del satélite Meteosat (HIRVIS) con la pseudo-imagen equivalente calculada a partir de las salidas del modelo. Vemos que el modelo es capaz de simular el ciclo diurno de la convección en situaciones con un forzamiento dinámico débil. La convección está algo más desarrollada en el modelo.



que necesitan una parametrización de la convección profunda. En general este ciclo diurno está bastante bien representado por el modelo HARMONIE. En la figura 4 vemos la comparación de la imagen visible del satélite Meteosat (HIRVIS) comparada con la pseudo-imagen simulada por el modelo en la que se puede ver que se representa bastante bien la distribución de las nubes convectivas aunque con un ligero adelanto en su desarrollo. La situación de la figura corresponde a un día de verano sin forzamiento de gran escala.

De todas formas, la convección es uno de los fenómenos atmosféricos más difíciles de predecir y esto se ve claramente cuando se hacen simulaciones a escalas de unos pocos km. La pre-

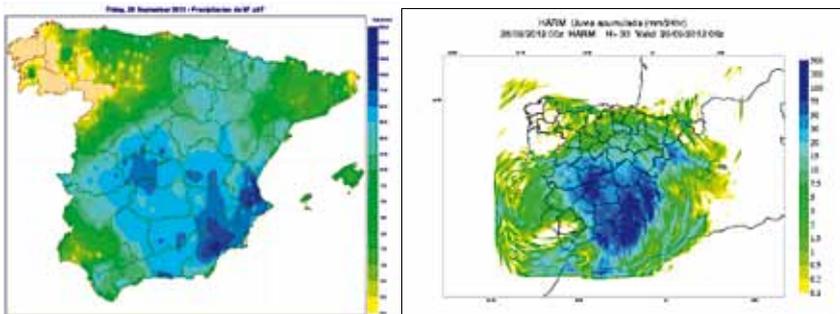


**Figura 5:** Comparación de la reflectividad radar con la simulación de HARMONIE a partir de los hidrometeoros predichos por el modelo. El modelo compara bien con la observación pero no se puede esperar precisión espacial y temporal debido a la naturaleza caótica de la convección a estas resoluciones.

decibilidad es mayor cuando hay un claro forzamiento de gran (por ejemplo frentes o vaguadas en altura). En la figura 5 vemos la comparación de la imagen radar con la pseudo-imagen de reflectividad estimada por el modelo HARMONIE en una situación con forzamiento de gran escala. Vemos que, en general, la distribución espacial e incluso las cantidades están bien representadas en el modelo. El algoritmo utilizado para estimar la reflectividad a partir de los hidrometeoros del modelo es también utilizado en el proceso de asimilación de las observaciones radar.

**Figura 3:** Comparación de una predicción de nubes bajas del modelo con el producto de nubes bajas (color naranja) del SAF nowcasting a partir de datos de satélite (<http://www.nwcsaf.org>). El modelo detecta muchas de las situaciones de nieblas aunque tiende a producir falsas alarmas.

Donde esperamos una mayor mejora es en la precipitación de precipitaciones extremas que pueden dar lugar a inundaciones. Los mapas de la figura 6 corresponden a una situación de lluvias torrenciales en Andalucía Oriental, Murcia y Valencia (28-29 sept. 2012). Vemos que el modelo predice bastante bien la distribución y principales máximos que se ven en el análisis de las observaciones. En general, parece que el modelo tiene una cierta tendencia a sobrestimar la actividad convectiva.



**Figura 6:** Análisis de la precipitación acumulada en 24 horas para la situación del 28/29 de septiembre de 2012 a partir de la red de observación de AEMET. Comparación con la predicción de HARMONIE 2.5 km. La distribución y las cantidades están bien representadas por el modelo. Parece que hay cierta sobrestimación pero hay que tener en cuenta que la resolución de la red de observación es bastante más pequeña que la del modelo.

## Conclusiones y perspectivas

Como resultado de la colaboración de HIRLAM con ALADIN y Météo-France, AEMET dispone de un nuevo modelo, HARMONIE, diseñado para utilizarse operativamente a resoluciones inferiores a 2 km. Estas resoluciones permiten resolver explícitamente la convección profunda sin necesidad de utilizar una parametrización. Se trata de un modelo muy sofisticado que requiere de la colaboración internacional para su desarrollo y grandes recursos de supercomputación para su explotación operativa.

Los resultados del modelo HARMONIE muestran que tiene un gran valor añadido respecto a modelos de mayor escala como el Centro Europeo y HIRLAM. Destaca la predicción de convección y la simulación de situaciones de precipitaciones extremas. También hay una clara mejora en la predicción de nieblas y nubes bajas aunque todavía los errores son grandes. Por otra parte la mejora también es clara en la predicción del viento y la temperatura a 2m. El modelo utiliza más variables de predicción para la precipitación lo que nos permite hacer estimaciones de productos muy interesantes desde el punto de vista meteorológico como son las descargas eléctricas (figura 7) y el granizo.

Actualmente, HARMONIE se está corriendo diariamente en los ordenadores del Centro Europeo pero este hecho presenta algunas complicaciones para su uso operativo. Se espera la actualización de los recursos de su-

percomputación en AEMET para 2014 lo que permitiría el uso plenamente operativo del modelo que irá sustituyendo a HIRLAM para la predicción a corto plazo y para alimentar a otras aplicaciones como el modelo de olas, los modelos de dispersión de contaminantes, los módulos de estimación de parámetros aeronáuticos, etc. Consideramos que la escala sinóptica y gran escala están muy bien representadas en el modelo del Centro Europeo incluso a corto plazo y el valor añadido de los modelos de alta resolución se encuentra en variables meteorológicas próximas a la superficie.

Además, la actualización de los recursos de supercomputación permitirá explorar todas las capacidades del modelo para la asimilación de datos en alta resolución. Por otra parte, como la predicibilidad disminuye cuando se quieren representar fenómenos que ocurren a escalas kilométricas, se está diseñando un nuevo sistema de predicción por conjuntos de muy alta resolución para tratar de estimar la predicibilidad y para su aplicación en la predicción de muy corto plazo. Este sistema se irá poniendo en operación a medida que los recursos de computación lo permitan.

## AGRADECIMIENTOS

El sistema HARMONIE es fruto de una colaboración muy fructífera con HIRLAM, ALADIN y Météo-France.

## REFERENCIAS

- García-Moya, J.A., Callado, A., Escribà, P., Santos, C., Santos-Muñoz, D., and Simarro, J. 2011. Predictability of short-range forecasting: a multimodel approach. *Tellus* 63A, 550–563
- Navascués, B., Calvo, J., Morales, G., Santos, A. Callado, A. Cansado, J. Cuxart, M. Díez, P. del Río, P. Escribà, O. García-Colombo, J. A. García-Moya, C. Geijo, E. Gutiérrez, M. Hortal, I. Martínez, B. Orfila, J. A. Parodi, E. Rodríguez, J. Sánchez-Arriola, I. Santos-Atienza, y J. Simarro: Long-term verification of HIRLAM and ECMWF forecasts over Southern Europe: History and perspectives of Numerical Weather Prediction at AEMET, *Atmospheric Research*, 125–126, 20–33, doi: 10.1016/j.atmosres.2013.01.010, 2013.
- Seity, Y., Brousseau, P., Malardel, S., Hello, G., Bénard, P., Bouttier, F., Lac, C., and Masson, V. 2011. The AROME-France Convective-Scale Operational Model. *Mon. Wea. Rev.*, 139, 976–991. doi: 10.1175/2010MWR3425.1



**Figura 6:** Comparación de las descargas observadas por la red de detección de AEMET (puntos azules) con la estimación del modelo a partir de la variable nieve granula (sombreado de colores). Imagen procesada por José A. Sousa.