

Comunicación D-2

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL MODELO OPERATIVO DE ANÁLISIS Y PREDICCIÓN HIRLAM/INM

Rosario Díaz-Pabón

Servicio de Predicción Numérica (INM)

RESUMEN

*Hoy día, las salidas de los modelos de Predicción Numérica del tiempo son una de las **herramientas** más comúnmente utilizadas por los predictores en los Servicios Meteorológicos. Por ello, les ha de ser de utilidad, el conocer las **características físicas** y dinámicas en las que se basan estos modelos, para así, poder evaluar su comportamiento y tomar decisiones cuando utilizan sus diferentes campos como herramientas para elaborar sus **pronósticos**. Se expondrán las características generales del modelo de análisis objetivo, así como la dinámica y las parametrizaciones físicas del modelo de predicción del sistema HIRLAM/INM, actualmente operativo.*

1. Introducción

El sistema de predicción HIRLAM (*High Resolution Limited Area Model*) es un código de asimilación de datos y de predicción desarrollado por los Servicios Meteorológicos de: Suecia, Noruega, Finlandia, Dinamarca, Islandia, Holanda e Irlanda. Actualmente Francia y España tienen acuerdos de cooperación con el grupo de países que han desarrollado el sistema HIRLAM.

El desarrollo del sistema se ha basado en proyectos trienales al final de los cuales el grupo que participa en el desarrollo se compromete a preparar una versión para su utilización operativa. El proyecto HIRLAM ha tenido ya dos fases que han finalizado con la elaboración de dos códigos a los que actualmente tienen acceso los países signatarios del proyecto. Desde marzo de 1995 el modelo HIRLAM-2 que se obtuvo al finalizar la segunda fase está instalado para su utilización operativa en el INM.

El proyecto HIRLAM-3, actualmente en fase de desarrollo, mantiene una gran actividad que se materializa en la existencia de grupos de trabajo sobre temas específicos que se han considerado prioritarios para la mejora del modelo.

Los distintos grupos de trabajo organizan un promedio de tres «workshop» especializados al año en los que se invita a especialistas. También se organizan uno o dos seminarios anuales a los que asisten todos los integrantes del proyecto HJRLAM y que constituyen la «asamblea general») para intercambio de ideas entre los diferentes grupos y personas. Esta forma de trabajo «neuronal», sin la existencia de centros rectores, es la que se está tomando como modelo a nivel europeo para desarrollar la futura Red de Desarrollo Europeo en Predicción Numérica a Corto Plazo.

2. Características generales del código HIRLAM

El código del sistema de predicción HIRLAM presenta unas características singulares de flexibilidad que permiten de forma inmediata la selección de área, resolución horizontal, número de niveles y parametrizaciones físicas.

Las subrutinas de la física son fácilmente sustituibles por otras que parametrizan los mismos procesos por cumplir las normas de portabilidad acordadas entre varios centros generadores de código.

Para algunos procesos físicos existe la posibilidad de elegir entre diferentes esquemas, eso mismo puede llevarse a cabo también con las técnicas numéricas y la difusión horizontal.

2.1. Rejillas rotadas

Cuando en los modelos globales se define una rejilla regular en latitud y longitud, debido a la convergencia de los meridianos en los polos, aparecen problemas de estabilidad. Esto es fácilmente comprensible puesto que las distancias entre puntos de rejilla se reducen al acercarnos a los polos y deja de cumplirse el criterio de estabilidad computacional. Este problema se evita mediante filtros espaciales en los modelos globales y rotando el polo en los modelos de área limitada de forma que el nuevo ecuador pase por el dominio del modelo. Esta última solución es la que ha sido adoptada por el modelo HIRLAM para evitar los problemas de convergencia de los meridianos. Lógicamente otra alternativa consiste en realizar todos los cálculos no en coordenadas geográficas sino sobre una proyección que no presente estos problemas.

3. Asimilación de datos

La asimilación de datos se basa en el paquete de análisis, que estuvo operativo en el ECMWF hasta enero del 96, convenientemente adaptado para utilizarse en un área limitada. Ambos modelos, el HJRLAM (INM)_0,5° y el HIRLAM(INM)_0,2°, tienen un ciclo de asimilación intermitente, siendo ambos ciclos independientes.

3.1. Ciclo de asimilación HIRLAM

Cada ciclo de asimilación está separado del anterior 6 horas y consta de las siguientes 4 etapas:

- 1) **Preproceso** y control de calidad.
- 2) **Análisis objetivo.**
El método es el clásico de la interpolación óptima estadística por cajas.
- 3) **Inicialización.**
Se eliminan los desacoplamientos entre los campos de viento y de masa mediante el método de los modos normales no lineales.
- 4) **Predicción H+6.**
Esta predicción se utilizará como «campo previo» para el siguiente análisis.

A partir de aquí se repite el ciclo cada 6 horas.

3.2. Análisis del modelo HIRLAM

Las variables que se analizan en el código HIRLAM son las siguientes:

- Presión en superficie
- Geopotencial
- Componente U del viento
- Componente V del viento
- Humedad relativa

En el antiguo LAM(INM) no se analizaba la presión en superficie y sí se analizaba la temperatura.

Se está trabajando muy activamente para analizar los campos superficiales (temperatura a 2 metros, humedad relativa a 2 metros, viento a 10 metros, espesor de la capa de nieve, contenido en agua del suelo, etc.) y en breve se incorporarán al código operativo HIRLAM.

El método de análisis por inter-polación óptima utilizado es inmultivariante en 3D para los campos de masa y de viento y univariante para la humedad relativa.

El algoritmo del análisis se calcula sobre «cajas», interviniendo en el análisis de un punto de rejilla todas las observaciones contenidas en una caja. El tamaño de las cajas, en grados de longitud y latitud para todo el espesor de la atmósfera, se selecciona en función de la densidad de datos disponibles.

3.3. Utilización de los distintos tipos de observación

De los parte SYNOP/SHIP recibidos, no se utilizan los vientos sobre tierra si el observatorio tiene una latitud superior a 30°.

De los partes AIREP y AMDAR, solamente se utiliza el viento.

De los TEMP y TEMP-SHIP se utilizan el geopotencial, las dos componentes del viento, la temperatura y la temperatura del punto de rocío, contenidas en las partes A y C.

De los partes PILOT, se utilizan las dos componentes del viento.

De los partes SATOB, no se utilizan los vientos sobre tierra si la latitud es superior a 20°

De los partes DRIFTER, se utiliza la presión, temperatura del agua del mar y viento.

3.4. Diferencias con el análisis LAM(INM)

Aparte de las diferencias obvias en resolución horizontal y vertical los dos algoritmos presentan otras diferencias, en concreto el HIRLAM:

- Analiza la presión en superficie y no la temperatura.
- Emplea una coordenada vertical idéntica a la del modelo de predicción, es decir, coordenadas híbridas en igual número de niveles. Con ello se evita la interpolación vertical entre el análisis y las condiciones iniciales del modelo, y por lo tanto, los errores introducidos vía **interpolación**.
- Realiza el análisis del campo de masa en modo realmente multivariante.
- Efectúa una corrección de la parte divergente del viento
- Tiene una mayor resolución de la función de estructura, analizándose ondas de hasta 400 km.
- Los errores del «campo previo» no uniformes dependen de los errores del análisis del ciclo anterior.

- Utiliza cajas 3D de análisis en vez de selección de observaciones en cada punto de rejilla.
- Pi-ocede a la creación de superobservaciones.
- Lleva a cabo un mayor número de controles de calidad.
- Considera la correlación vertical de los errores de los sondeos.
- No utiliza los SATEM.
- Hace un mayor uso de obseilraciones procedentes de un diferente preproceso.

4. Formulación adiabática del modelo HIRLAM

Las ecuaciones primitivas en el modelo HIRLAM que gobiernan la evolución de la atmósfera son:

Ecuaciones de diagnóstico (expresan relaciones entre las diferentes variables atmosféricas):

Ley de los gases:

Relación entre presión, densidad y temperatura.

Ecuación hidrostática:

Relación entre densidad y variación de presión con la altura.

Ecuaciones depronóstico (expresan variaciones en el tiempo de la presión superficial, viento horizontal, temperatura y vapor de agua):

Ecuación de continuidad.

Expresa la conservación de la masa y permite determinar la velocidad vertical y la variación con el tiempo de la presión en superficie.

Ecuación del movimiento.

Describe cambios en la velocidad horizontal causados por el gradiente de presión, fuerza de Coriolis y por la fricción en las proximidades del suelo.

Ecuación de la termodinámica.

Expresa la variación en la temperatura originada por los desplazamientos adiabáticos verticales, liberación de calor latente, radiación y por procesos turbulentos y de fricción.

Ecuación de la humedad.

Expresa la conservación de la humedad, excepto por las pérdidas debidas a condensación y las ganancias debidas a evaporación en las nubes, océanos y continentes.

Ecuación del agua de nube (sólo con el esquema de Sundqvist).

Expresa la conservación del agua de nube, excepto por las pérdidas debidas a la precipitación y las ganancias debidas a la condensación del vapor de agua cuando alcanza la saturación.

El modelo HIRLAM tiene dos opciones alternativas para los procesos convectivos. Una de ellas basada en un esquema de convección tipo KUO junto con un esquema de condensación de la precipitación a gran escala y cuyo resultado es la producción inmediata de precipitación cuando la humedad relativa sobrepasa el punto de saturación. Esta opción es muy similar a la del antiguo LAM(INM). La otra opción (que es la seleccionada en el actual esquema operativo HIRLAM(INM)_0,5° y HIRLAM(INM)_0,2°) se basa en el esquema de Sundqvist, el cual, incluye una parametrización, si bien grosera, de la microfísica de nubes. Cuando se elige la opción de Sundqvist, se añade en las ecuaciones a integrar la ecuación de continuidad para el agua de nube.

La suposición de hidrostaticidad es válida dependiendo de las escalas. A medida que los inodelos intentan simular escalas más pequeñas, con rejilla del orden de 10-20 km, las aceleraciones verticales son más

importantes (piénsese en los potentes desarrollos convectivos) y la suposición de hidrostática (equivalente a aceleración vertical nula) empieza a perder su sentido. En consecuencia, los modelos que intenten simular escalas inferiores a los 10-20 km deberán relajar la condición de hidrostática. La hipótesis hidrostática elimina las ondas sonoras verticales. Como no se ha supuesto geostrofia, tenemos en principio permitida la existencia de ondas gravitatorias, que son fundamentales en el proceso de ajuste geostrofico entre los campos de viento y de presión en una atmósfera en rotación. Las ondas gravitatorias también juegan un papel esencial en el impacto que la superficie terrestre (montañas) ejerce sobre el flujo atmosférico.

5. Parametrización de los procesos físicos en el modelo HIRLAM

Entre las parametrizaciones de los procesos físicos incluidas en el código HIRLAM(INM), se pueden citar como más novedosas [en comparación con el antiguo LAM(INM)] la correspondiente a los procesos de suelo y el esquema de Sundqvist para los procesos de condensación. La parametrización de la capa límite sigue las ideas de Louis (1981), con el cálculo de los flujos superficiales dependientes del número de Richardson (Ri) y de la rugosidad (z_0) y el cálculo de los flujos en la atmósfera libre mediante coeficientes de intercambio (al igual que en el LAM(INM)). La radiación se parametriza mediante el esquema simplificado de Savijarvi-Sass, que se aplica a todos los niveles del modelo y suelo (el antiguo esquema del LAM(INM) sólo afectaba al suelo). Por último, hay que mencionar la no inclusión de la parametrización del proceso de frenado por ondas gravitatorias y la no inclusión explícita de la convección poco profunda (se incluye este proceso modificando Ri en la capa límite).

5.1 Procesos de suelo

El esquema de parametrización de la superficie del suelo describe la evolución de la temperatura y del contenido de agua del suelo, y el espesor de nieve sobre tierra y sobre hielo, mediante ecuaciones de pronóstico simples.

La superficie que abarca cada punto de rejilla corresponde bien a tierra, bien a mar/lagos, bien a hielo o bien a una mezcla de los tres. Para definir la contribución de los diferentes tipos de superficies, se utilizan dos parámetros: fracción de la rejilla cubierta con tierra y fracción de la rejilla cubierta con hielo relativa al área de mar/lagos.

El suelo se representa por un modelo de 3 capas. En cuanto a la temperatura del primer campo se actualiza por el esquema de superficie, y contiene la temperatura superficial sobre la tierra (si la fracción de tierra y mar/lagos es mayor que cero). En caso contrario, se utiliza la temperatura del mar, que permanece constante durante la integración. El segundo campo representa la temperatura de la capa intermedia. El tercer campo contiene la temperatura de la capa profunda (climática), si los valores de la fracción de la tierra + agua están comprendidos entre 0 y 1.

Análogamente es tratado el contenido en agua del suelo. Las capas primera y segunda son actualizadas por el esquema de superficie y el contenido de la capa más profunda se mantiene constante durante la integración (capa climática).

5.2 Parametrización de los procesos de condensación

Como ya se ha indicado, el esquema de condensación y de nubes operativo en la versión HIRLAM(INM) es el de Sundqvist (1988). Este esquema utiliza el agua de nube como variable pronosticada.

Cuando se entra en el esquema de condensación, lo primero que se comprueba es si la columna que se trata es condicionalmente inestable o no. El criterio que se sigue es el de estudiar la flotabilidad de una partícula de aire superficial cuando se eleva verticalmente hasta alcanzar la saturación. Si la flotabilidad es positiva se considera la condensación por convección, si es negativa se investiga la posibilidad de condensación estratiforme. Los procesos microfísicos considerados tienen la misma expresión en los dos casos (aunque diferentes valores de los parámetros).

5.2.1 *Procesos microfísicos*

- a) La velocidad de producción de precipitación viene descrita por la expresión:

$$P = C_0 m \left(1 - e^{-\left(\frac{m}{bm_z}\right)^2} \right)$$

donde m es el agua de nube, $1/c_0$ es un tiempo característico para la conversión de gotitas de nube en gotas de lluvia, b es la cobertura nubosa, m_z es un valor umbral para el agua de nube.

- b) Para simular crudamente el proceso de coalescencia se introduce un nuevo parámetro F_{co} . Esta función, aumenta con el ritmo de producción de precipitación. Su expresión es:

$$F_{co} = 1 + C_1 P^{1/2}$$

- c) Para simular el mecanismo de Bergeron-Findeisen, que aumenta la producción de precipitación en nubes que tienen una mezcla de gotitas y cristales de hielo, se introduce el parámetro F_{BF} cuando la temperatura está entre -5 y -28 °C, que tiene la expresión siguiente:

$$F_{BF} = 1 + C_2 (268 - T)^{1/2}$$

- d) En el caso de condensación estratiforme, la evaporación del agua precipitante tiene lugar según la expresión:

$$E_r = K_E (U_s - U) (1 - b) \sqrt{P}$$

donde P es el ritmo de producción de precipitación en el nivel considerado y K_E es un parámetro a especificar.

- e) Se permite que haya evaporación de agua de nube sólo cuando el agua de nube es advectada en un punto de rejilla en el que no tiene lugar condensación. En dichos casos toda el agua de nube advectada se supone que se evapora instantáneamente.

- f) En las columnas en las que hay convección, se ignora la evaporación de la precipitación, puesto que las gotas de lluvia caen a través de una zona casi saturada excepto en la capa subnubosa.

5.2.2 *Condensación convectiva*

Se basa en el esquema de Kuo (1965, 1974), cuya idea básica es que la convección tiene lugar en un ambiente potencialmente inestable con convergencia de humedad a gran escala. De esta forma la contribución de humedad en la base de la nube se invierte en transferir humedad y calor sensible al ambiente al disolverse instantáneamente la nube generada y mezclarse con el ambiente.

5.2.3 *Condensación estratiforme*

En una columna estáticamente estable, se supone que la condensación en un punto de rejilla tiene lugar únicamente si la humedad relativa de la rejilla excede de un valor umbral U_0 . Como las rejillas no resuelven los procesos de condensación, el valor umbral debe ser menor que la unidad. En consecuencia, en una rejilla parcialmente nubosa, la humedad relativa a escala de la rejilla, U , se puede expresar como el promedio ponderado de la humedad en la parte nubosa, $U_s = 1$, y la humedad, U_0 , de la parte sin nubes: $U = bU_s + (1 - b)U_0$.

Es muy razonable que U_0 en este esquema de parametrización sea función de varias variables como la nubosidad, la estabilidad, el tipo de superficie y la altura sobre el suelo. Si incluimos la dependencia de la nubosidad mediante la relación: $U_0 = U + b(U_s - U_0)$, U , es un valor umbral básico independiente de la nubosidad, pero probablemente función de las otras variables mencionadas, la combinación de las dos anteriores expresiones proporciona una relación de diagnóstico para la cobertura nubosa en función de U y de U_s .

5.3 Radiación

El esquema de radiación del HIRLAM2 es el esquema simplificado de Savijarvi-Sass (1994). Esta parametrización tiene en cuenta las condiciones de cielo sin nubes y es capaz de utilizar la cantidad de agua de nube del inodelo sobre el que actúa.

Lo más importante del esquema es que mejora la transmisión de onda corta en condiciones nubosas y el tratamiento de la radiación de onda larga.

Mientras que el esquema de radiación del LAM tenía en cuenta únicamente el cambio radiativo en el suelo, el HIRLAM realiza un tratamiento volumétrico por capas, lo cual repercute en una mejora del ciclo diurno.

6. Modificaciones introducidas en la pasada operativa HIRLAM/INM

Desde el comienzo de la pasada operativa, marzo del 95, se han introducido algunas modificaciones con el fin de subsanar los problemas que fueron surgiendo.

Algunos datos de observación erróneos, no eliminados en la fase de preproceso, impedían el poder correr con éxito el análisis objetivo coi-respondiente. El problema se ha subsanado en mayo de 95, mediante un mayor «blindaje» del análisis frente algunos tipos de observaciones como AIREP y SYNOP.

En junio de 1995 se cambió el valor de la constante de difusión horizontal del esquema explícito lineal de 4.º orden en los 31 niveles del modelo.

La razón de estos cambios eramejorar el aspecto ruidoso que presentaban los campos operativos, principalmente las variables de superficie. Aún con dichas modificaciones el ruido continuaba apareciendo, si bien atenuado.

En septiembre de 1995, después de una serie de pruebas, se introdujo un esquema de difusión horizontal implícito en vez del explícito con resultados ya más satisfactorios.

Hasta septiembre de 1995 la verificación objetiva disponible en el INM se efectuaba frente a los co-respondientes análisis objetivos. A partir de esta fecha se ha incorporado un paquete de verificación objetiva frente a observaciones.

7. Resumen de las características del Sistema de análisis y predicción operativo en el INM (abril 1995)

- a) Resolución horizontal 0,5° = 0,5(OPR)
- Resolución horizontal 0,2° = 0,2(HIR)

Análisis:

Resolución vertical	31 niveles híbridos (los mismos que el modelo del ECMWF)
Asimilación de datos	Intermitente cada 6 horas (obseivaciones desde -3 a +2 horas)
Variables	Geopotencial (z), viento (U, V), humedad relativa (RH)
Método	Geopotencial/Viento: Multivariante OI Humedad relativa: Univariante OI hasta 250 hPa
Campo previo	Predicciones a 6 horas del mismo modelo
Rejilla horizontal	Regular longitud/latitud (194 × 100 puntos)
Áreas	65,0 N, 66,5 W, 15,5 N, 30,0 E — OPR 50,0 N, 23,6 W, 30,2 N, 15,0 E — HIR
Tipos de observaciones	Synop, Teinp, Airep, DRIFTER, SATOB, AIREP

Inicialización:

Implícita por modos normales no-lineal: 4 modos en la vertical y 3 iteraciones.

Predicción:

Resolución vertical	31 niveles híbridos (los mismos que el análisis)
Variables dependientes	Presión superficie, temperatura, viento (u , v), humedad específica
Representación vertical	Diferencias finitas, conservación de la energía y el momento angular
Representación horizontal	Diferencias finitas, rejilla-C de Arakawa
Grid horizontal	Regular longitud/latitud (194 x 100 puntos)
Área	65,0 N, 66,5 W, 15,5 N, 30,0 E — OPR 50,0 N, 23,6 W, 30,2 N, 15,0 E — HIR
Orografía	Media de la base de datos NOAA (0,1 grados)
Tiempo de integración	Leapfrog, semiimplícito con paso de tiempo 3 minutos 0,5(OPR) 1 minuto 0,2(HIR)
Difusión horizontal	implícito lineal de 4.º orden
Difusión vertical	Dependientes de los flujos superficiales en los parámetros de rugosidad y estabilidad (Monin-Obukov) Flujos en la atmósfera libre dependiente de la longitud de mezcla y el núm. de Richardson
Condensación	Sundqvist (1989)
Radiación	Savijari-Sass (1994)

8. Conclusiones

Los productos numéricos obtenidos mediante las cadenas operativas de análisis y predicción son la herramienta fundamental en la que se apoyan las actividades de predicción de los servicios meteorológicos modernos; pero deben ser interpretados teniendo en cuenta las limitaciones que son inherentes a ellos.

El aumento de la resolución horizontal repercute en una mejor representación de los campos del suelo (especialmente de los relacionados con la topografía), mejores condiciones iniciales y mayor precisión de los esquemas numéricos, todo lo cual repercute en un beneficio neto para la predicción.

La mayor resolución vertical permite disponer de perfiles verticales de temperatura, humedad y viento que muestran mayor riqueza de estructuras en determinadas zonas de la atmósfera como son la capa límite y las proximidades de la tropopausa.

En relación a las parametrizaciones físicas incluidas en el modelo de predicción es importante remarcar que la evolución de las variables asociadas al ciclo del agua es muy dependiente de los esquemas concretos que parametrizan la condensación a gran escala, los procesos convectivos y los procesos de intercambio atmósfera-suelo. Las variables del modelo en las proximidades del suelo, singularmente la temperatura a 2 metros y el viento a 10 metros, son muy sensibles a las características del tratamiento del suelo en el modelo, a la existencia o no de vegetación en el esquema y a la topografía utilizada.

Por todo ello, se puede afirmar que los modelos de predicción sirven para predecir los fenómenos de aquellas escalas para las que han sido diseñados, así como aquellos fenómenos que se encuentran bien representados en las parametrizaciones físicas del modelo utilizado.

Referencias

Gustafsson, N., 1993: HIRLAM2 final Report. HIRLAM Technical Report no. 9.

Martínez, I., 1996: Implementation of an implicit horizontal diffusion scheme in the HIRLAM(INM) operational run. HIRLAM Newsletter no. 23.

Martínez, I.; B. Navascues; E. Rodríguez, 1995: First Impressions about the experimental HIRLAM(INM) with resolution 0.2°. HIRLAM3 Workshop on fine scale atmospheric modelling for operational applications. Copenhagen, 30-31 March 1995, pp. 36-39.

Sass Bent, H. and S. Jarvenoja, 1996: Improvement of the surface temperature prediction in the HIRLAM model. HIRLAM Newsletter no. 23.