

Implementación de los procesos de selección adaptativa y reestructuración de rejillas en el modelo de pronóstico del tiempo ARPS

Ángel Domínguez-Chovert ^{(*)1}, Maibys Sierra-Lorenzo ⁽²⁾ y Nivian Quintana-Rodríguez ⁽²⁾

⁽¹⁾ Centro de Pesquisas e Previsões Meteorológicas, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas – RS – Brasil.

E-mail: chovert89@gmail.com

⁽²⁾ Centro de Física de la Atmósfera, Instituto de Meteorología, Cuba. E-mail: maibys.lorenzo@insmet.cu,

nivian.quintana@insmet.cu

Recibido: febrero 23, 2015	Aceptado: junio 12, 2015
----------------------------	--------------------------

Resumen

En Cuba se emplea de forma operativa el modelo de mesoescala ARPS (*Advanced Regional Prediction System*) en su modo estándar; obteniéndose la mayor resolución, aún insuficiente para el estudio de los fenómenos meteorológicos de pequeña escala (1km), en zonas fijas y muy reducidas. Con esta investigación se implementó el refinamiento adaptativo de rejillas en dicho modelo, lográndose disminuir el tamaño de las celdas solo en los lugares donde es necesario. Se utiliza el módulo avanzado para el refinamiento de rejillas ARPSAGRI que nunca había sido estudiado en Cuba. Este módulo a pesar de manejar la inicialización, la integración en el tiempo y la transferencia de información entre los distintos niveles de refinamiento, no seleccionaba de forma adaptativa, en tiempo de ejecución, las zonas a refinar, resultado que se logró con este trabajo. Además, se le incluyó la capacidad de realizar la reestructuración de los niveles jerárquicos de resolución.

Palabras clave: eficiencia computacional, modelo numérico del tiempo, refinamiento de rejillas, ARPS

Implementation of adaptive selection process and restructuring of grids in the weather forecast model ARPS

Abstract

In Cuba, the ARPS (*Advanced Regional Prediction System*) mesoscale model has been put into use in operational form. It has been configured in its standard mode, which allows maximum resolution (still insufficient for the study of small-scale meteorological phenomena) of 1 km for fixed and reduced regions. This research implements the adaptive grid refinement procedure within the model, achieving reduction in cell sizes only in places where it is necessary. The advanced module for grid refinement (ARPSAGRI) was used, which had never been studied in Cuba. This module, despite handling initialization, time integration and the transfer of information between different refinement levels, does not select adaptively at runtime the regions where refinement should be done, which is a feature that was implemented in this work. Additionally, the capability to restructure the hierarchical levels of resolution was added to ARPSAGRI.

Keywords: Computational efficiency, numerical weather model, grid refinement, ARPS

1. Introducción

Cuando se habla de modelación regional atmosférica, la resolución o el aumento de la misma ocupa un lugar importante. En muchos casos se obtienen resultados satisfactorios cuando el dominio de estudio es cubierto por una rejilla uniforme, sin embargo, a menudo las soluciones en determinadas regiones son más difíciles de hallar que en otras. Tal dificultad se debe principalmente a discontinuidades, altos gradientes, valores extremos, etc. Una posible solución para este problema es utilizar una rejilla lo suficientemente fina en toda su extensión de forma tal que los errores estén dentro de un rango permisible.

Un ejemplo donde se utilizan rejillas finas para cubrir el dominio de estudio lo constituye el modelo de pronóstico del tiempo *Advanced Regional Prediction System* (ARPS) que se implementó en Cuba —en modo estándar, sin utilizar módulos complementarios de integración en las simulaciones—. En las ejecuciones operativas del ARPS, que se realizan en el Centro de Física de la Atmósfera (CFA) del Instituto de Meteorología de Cuba (INSMET), se obtiene información para cuatro dominios: dominio 1 (mitad oriental de la Isla), dominio 2 (mitad occidental de la Isla), dominio 3 (provincia Camagüey) y dominio 4 (provincias Habana, Artemisa y Mayabeque). Los dos primeros dominios utilizan una configuración de rejillas anidadas que alcanza 3 km de resolución horizontal, mientras que en los dominios 3 y 4 se llega a 1km—que ha sido la más alta alcanzada en Cuba en ejecuciones operativas de modelos, con la desventaja de ser solo para zonas fijas y muy reducidas— que todavía resulta insuficiente para la obtención de una visión adecuada de los procesos de interacción entre los fenómenos multiescalares y las variaciones bruscas de las variables meteorológicas en la escala local.

Un aumento uniforme de la resolución espacial para cualquier dominio utilizado en el ARPS provoca un incremento considerable del costo computacional y del tiempo de corrida. El modelo cuenta con un módulo complementario de cálculo que se basa en la estructura de datos de una de las técnicas más importante de refinamiento adaptativo de rejillas, la desarrollada por Berger y Olinger (1984) (en lo adelante referida como BORAR), introducida en las aplicaciones atmosféricas por Skamarock et al., (1989) y Skamarock y Klemp (1993). Se trata de un método de refinamiento local bloque-estructurado en el que rejillas más finas son creadas solo en los momentos necesarios y sobre los lugares de interés formándose una jerarquía de niveles de resolución, en oposición al refinamiento total en el que se disminuye el tamaño de las celdas en toda el área de estudio (Jablonowski, 2004).

La aplicación de la estructura de datos de BORAR en el ARPS se basa en una interfaz de refinamiento adaptativo de rejillas generalizado (*Adaptive Grid Refinement Interface* (AGRI)) desarrollada por Skamarock et al., (1989). El código de AGRI, en su forma original, se encarga de la inicialización, la integración en el tiempo y la transferencia de información (interpolación de las condiciones de frontera y actualización de la solución de la rejilla gruesa mediante la fina) entre los distintos niveles de resolución. Sin embargo, no es capaz de manejar en tiempo de ejecución, la adición, eliminación y reestructuración de dichos niveles, por lo que más que un ejemplo fiel de refinamiento adaptativo constituye un híbrido entre esta estrategia y la de anidamiento de rejillas, sin llegar a ser realmente eficiente. Este inconveniente impide en gran medida la utilización del módulo original de refinamiento para las corridas operativas pues le exige al pronosticador conocer con anticipación las zonas exactas en donde el fenómeno meteorológico, que precisa de buena resolución para su estudio numérico, se va a producir, algo que en los casos reales se torna extremadamente complicado.

En Cuba existen casos aislados en los que se han tratado las técnicas de refinamiento adaptativo, en la mayoría como temas secundarios y nunca con el modelo ARPS. En cuanto a las investigaciones vinculadas con la meteorología, la más especializada en el tema de refinamiento adaptativo aborda las facilidades que brindan las funciones wavelets y el análisis multiresolución en este proceso (Sierra, 2011), en donde se utiliza el modelo de predicción meteorológica *Mesoscale Model Fifth Generation, version 3* (MM5v3). También, en otro trabajo, se creó una metodología en la que mediante la combinación de las funciones wavelets con el método de diferencias finitas se pueden obtener las soluciones de ecuaciones en derivadas parciales de forma adaptativa (Martínez, 2012), aplicado en el modelo Aguas Someras.

En investigaciones con el modelo ARPS el procedimiento más utilizado para refinamiento es el anidamiento múltiple de rejillas. Pocos estudios hacen uso del módulo híbrido de refinamiento ARPSAGRI, no obstante, se puede mencionar el realizado por Adlerman et al., (1999) que aborda la tornado-génesis y los meso-ciclones. Estos autores parten de una rejilla gruesa que cubre un área de 70,3 x 70,3 km² con un espaciamiento horizontal de 525 m. La rejilla más fina cubre un área de 22,5 x 22,5 km² y un espaciamiento horizontal de 105 m. Otro ejemplo de la aplicación del ARPSAGRI es el realizado por Xue et al.,(1993), estos autores simulan pequeños vórtices de tornados dentro de una tormenta. En el resultado final se obtienen cuatro niveles de rejillas y la más fina tiene una resolución de 55 m (la más gruesa tiene 1km de resolución). Ambos casos con las limitaciones del ARPSAGRI expuestas anteriormente.

Por lo expuesto hasta aquí es que se plantea como objetivo general del presente trabajo la implementación de los procesos de selección adaptativa y reestructuración de rejillas en el módulo complementario de refinamiento ARPSAGRI —disponible hasta la versión 4.5.1, última versión 5.3.4— del modelo de pronóstico del tiempo

ARPS. Además, se efectúa un análisis y comprobación del funcionamiento de dichos procesos en el módulo con vista a ser utilizado en el pronóstico meteorológico a corto plazo de sistemas atmosféricos de escala local.

2. Materiales y métodos

La presente investigación se sustentó en el modelo de pronóstico del tiempo ARPS (versión 4.5.1), siendo el módulo de refinamiento ARPSAGRI el núcleo principal del trabajo. De forma general, existen tres métodos de refinamiento usados para lograr obtener rejillas con cantidades de nodos suficientes como para describir características meteorológicas de pequeña escala, estos son: el anidamiento de rejillas, el método de rejillas expandidas y el refinamiento adaptativo, siendo este último en el que se basa el módulo ARPSAGRI, específicamente el del tipo local y de rejillas superpuestas: BORAR, (Figura 1).

Con el refinamiento adaptativo de rejillas se logra disminuir el tiempo de ejecución del modelo en comparación con un refinamiento total del dominio (no confundir con refinamiento global que consiste en la redistribución de los nodos de acuerdo con las regiones donde existen mayores variaciones de la solución). Además, se representan con mayor claridad determinados procesos atmosféricos de escalas pequeñas que influyen en los de gran escala.

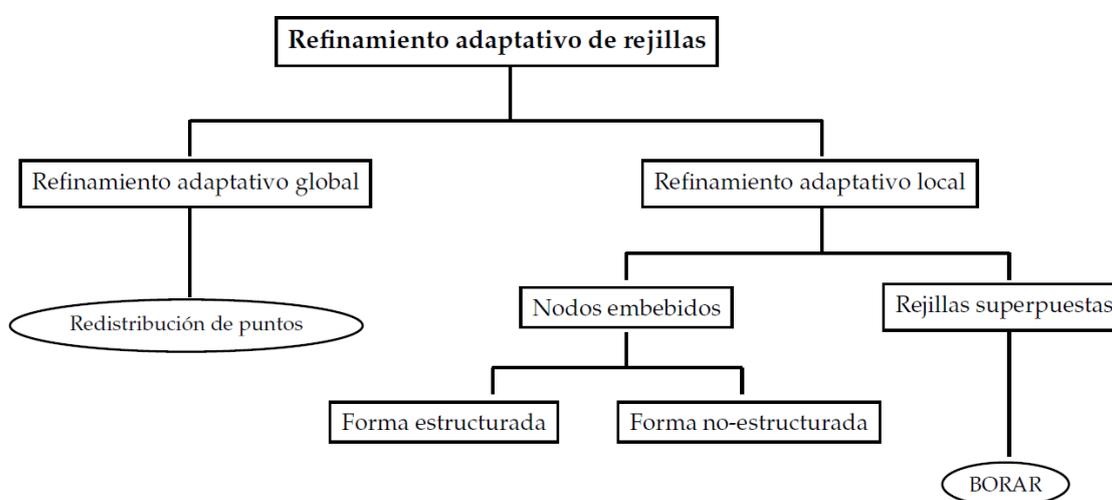


Fig. 1. Estrategias y enfoques del refinamiento adaptativo de rejillas

Al ARPSAGRI se le añadió, en correspondencia con los objetivos específicos planteados, una nueva subrutina (compuesta a la vez por otras subrutinas complementarias) encargada de la selección, en tiempo de corrida, de las zonas de interés sobre las cuales superponer subrejillas de mayor resolución donde también se calculan las ecuaciones que describen los procesos de la atmósfera. Además, se creó un script que, utilizando la capacidad de reinicio del modelo a partir de corridas anteriores, se encarga de realizar el proceso de reestructuración de los distintos niveles de refinamiento.

Todo el código fuente de la versión utilizada del modelo ARPS, incluyendo al módulo de refinamiento, está programado en FORTRAN 77 (*Formula Translating System*). Sin embargo, para la implementación de la nueva subrutina de selección adaptativa se utilizó Fortran 90, posibilitándose la utilización de la memoria dinámica computacional. Para la correcta inserción de la misma se modificaron los archivos *makefile* y *makearps* encargados de dirigir y unificar todo el proceso de compilación y creación de los ejecutables. Como compilador común para ambos lenguajes de programación se usó *gfortran* (Ver Figura 2).

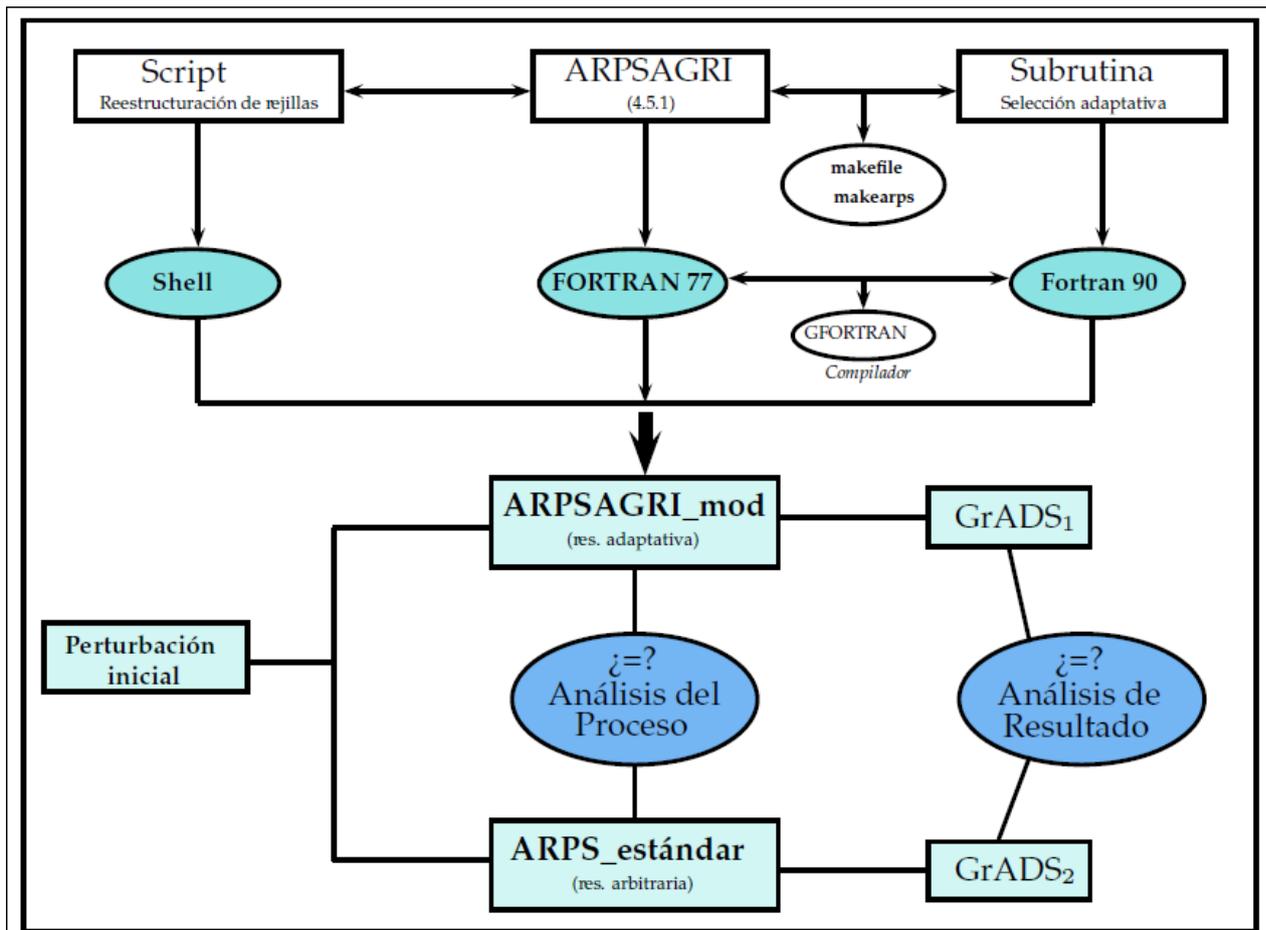


Fig. 2. Diagrama de los procedimientos realizados y los materiales empleados

Una vez dotado al módulo ARPSAGRI de la capacidad real de selección adaptativa y reestructuración de niveles, se procedió a la comprobación de dichas tareas. Además, se realizó un análisis del proceso total de integración y de los resultados obtenidos en las ejecuciones realizadas del modelo. Se hicieron varias simulaciones de prueba que fueron comparadas con otras inicializadas con los mismos parámetros de control pero utilizando el ARPS estándar (sin emplear el ARPSAGRI ni otros módulos avanzados). Se utilizó una computadora de ocho procesadores (Intel(R) Xeon(R) con 2.00GHz de frecuencia) y 8GB de memoria de acceso aleatorio (RAM por sus siglas en inglés). Se emplearon, como herramientas auxiliares, al GrADS (*Grid Analysis and Display System*) para graficar las soluciones, Fortran para la realización de la subrutina de selección adaptativa y Shell para la confección de los script de reestructuración y los vinculados con GrADS.

2.1 Modelo numérico de mesoescala para el pronóstico del tiempo, ARPS

El ARPS, Sistema Avanzado de Predicción Regional, es un modelo tridimensional, compresible y no hidrostático y se usa en un rango espacial que va desde los pocos metros hasta los cientos de kilómetros. Este modelo está basado en las ecuaciones de Navier-Stokes que describen el flujo atmosférico como un fluido compresible y toma en cuenta un gran número de procesos de microfísica que interactúan con la dinámica del sistema. Además, utiliza un sistema de coordenadas generalizado para el terreno.

El modelo atmosférico ARPS tiene entre sus ecuaciones principales, las de balance del momento lineal, de calor (temperatura potencial), de masa (presión), de energía cinética turbulenta (TKE), las ecuaciones de estado y las de la parte líquida. Estas son representadas en un sistema de coordenadas curvilíneas que es ortogonal en la horizontal. Las ecuaciones que gobiernan el modelo son el resultado de la transformación directa de un sistema de coordenadas cartesianas, escritas completamente en sus formas conservativas y resueltas en un espacio computacional rectangular usando el método numérico diferencias finitas.

En el modelo, el estado medio puede ser inicializado usando funciones analíticas usando un sondeo externo. Cuando el modelo es inicializado usando un conjunto externo de datos, el estado medio es construido usualmente como un promedio en el dominio horizontal. Las variables del modelo pueden ser escritas entonces de la siguiente forma:

$$u(x, y, z, t) = \bar{u}(z) + u'(x, y, z, t) \quad (1)$$

$$v(x, y, z, t) = \bar{v}(z) + v'(x, y, z, t) \quad (2)$$

$$w(x, y, z, t) = \bar{w}(z) + w'(x, y, z, t) \quad (3)$$

$$\theta(x, y, z, t) = \bar{\theta}(z) + \theta'(x, y, z, t) \quad (4)$$

$$p(x, y, z, t) = \bar{p}(z) + p'(x, y, z, t) \quad (5)$$

$$\rho(x, y, z, t) = \bar{\rho}(z) + \rho'(x, y, z, t) \quad (6)$$

$$qv(x, y, z, t) = \bar{qv}(z) + qv'(x, y, z, t) \quad (7)$$

$$qli(x, y, z, t) = \bar{qli}(z) + q'li(x, y, z, t) \quad (8)$$

Donde u , v y w son las componentes cartesianas de la velocidad (momentum), θ es la temperatura potencial, p la presión, ρ la densidad, qv la razón de mezcla del vapor de agua y qli es una de las seis categorías de relación de mezcla de la sustancia agua. Las variables con una barra representan el estado medio y con una comilla representan las desviaciones. Inicialmente se asume que w y qli son iguales a cero. (XUE et al., 1995).

El ARPS resuelve las ecuaciones pronóstico para u , v , w , θ' , p' y qv' que son las componentes de la velocidad en un sistema cartesiano, la perturbación en la temperatura potencial, la perturbación de la presión y las seis categorías de relación de mezcla de la sustancia agua (vapor de agua, agua de nube, lluvia, hielo de nube, nieve y granizo) respectivamente (XUE et al., 2000). El modelo cuenta con varios módulos complementarios de cálculo que permiten acciones como la asimilación de datos y el refinamiento de rejillas.

2.2 Módulo de refinamiento de rejillas, ARPSAGRI

El modelo ARPS cuenta con un módulo de refinamiento de rejillas denominado ARPSAGRI. Este contiene implementada la estructura de datos de una de las técnicas más importantes de refinamiento adaptativo, específicamente la clasificada como de tipo local y bloque-estructurada, BORAR. Para esto se basa en una interfaz de refinamiento adaptativo de rejillas generalizado (AGRI) desarrollado por Skamarock et al., (1989). AGRI es general en el sentido de que cualquier modelo que satisfaga ciertas reglas de construcción en el código puede utilizar parte del software y adquirir fácilmente la capacidad de refinamiento. El módulo en su forma original, a pesar de su nombre y de utilizar la estructura de datos de la técnica BORAR, constituye un híbrido entre la estrategia de refinamiento adaptativo de rejillas y la de anidamiento de rejillas (en dos direcciones).

AGRI maneja la inicialización, la integración en el tiempo y la transferencia de información (interpolación de la solución en la frontera de la rejilla gruesa a la fina y promedio de la solución de la rejilla fina a la gruesa) entre los distintos niveles de resolución. El módulo manipula la separación de memoria de las distintas variables y los arreglos a utilizar. También refina en tiempo y espacio y posibilita la creación de varias rejillas de diferentes tamaños y orientación en cada nivel de resolución. Sin embargo, no es capaz, en su concepción original, de seleccionar adaptativamente, en tiempo de corrida, las áreas de interés a refinar y tampoco realiza la reestructuración de los distintos niveles jerárquicos de refinamiento. El usuario debe indicar desde el momento inicial, antes de la corrida, el/los lugar(es) donde se necesita obtener mayor resolución. Esta característica no es idónea pues es extremadamente difícil conocer con antelación el lugar exacto donde se va a producir un fenómeno extremo, más si posee características de la pequeña escala.

AGRI está diseñado especialmente para modelos atmosféricos tridimensionales (3D). Dado el hecho de que el refinamiento horizontal es, en la mayoría de los casos, más importante y más efectivo que el refinamiento en la vertical, AGRI refina las rejillas solamente en la dirección horizontal. En la vertical se pueden obtener mejores resultados mediante una distribución apropiada de los distintos niveles verticales a procesar, por ejemplo, utilizando la estrategia de rejillas extendidas disponible en el ARPS.

Para el trabajo con el módulo están habilitados varios parámetros de control, agrupados en un *namelist*, que pueden ser modificados por el usuario. Los últimos parámetros del *namelist* original (se tratan en la sección 2.3) deben ser calculados por el usuario (con el presente trabajo se modifica la forma en que se realiza este proceso) e indican las dimensiones y ubicación de cada conjunto de subrejillas en todos los niveles de refinamiento, estos se expresan con respecto a la rejilla principal perteneciente al nivel de resolución cero en la jerarquía de niveles.

2.3 Proceso de selección adaptativa

Para la realización del proceso de selección adaptativa, en tiempo de corrida, de las áreas de interés a refinar, se programó una nueva subrutina (formada por varias subrutinas independientes) que fue acoplada al módulo ARPSAGRI. Esta es ejecutada justo después de inicializarse la rejilla principal (nivel cero de refinamiento) para cada nivel vertical y antes de comenzar el proceso de integración. Esto es fundamental, pues es en este momento en el que se cuenta con datos para procesar y determinar zonas de interés.

En el proceso de implementación de la nueva subrutina se añadieron varios parámetros de control (Figura 3), así el usuario determina la opción que desea utilizar sin necesidad de modificar directamente el código programado. Los parámetros (se explican con profundidad más adelante) son:

```
grad = 1,
zbuffer = 5,
umbral = 0.0001,
nvvert(1) = 1,
nvvert(2) = 35,
```

Fig. 3. Parámetros de control añadidos (con valores arbitrarios asignados) para ser utilizados en la subrutina encargada del proceso de selección adaptativa de zonas de interés a refinar

Los datos que se procesan para determinar las zonas de interés donde es necesario refinar son extraídos del arreglo principal que utiliza el ARPS, en este se guardan todos los valores calculados de las distintas variables y es también empleado por el módulo ARPSAGRI para simular el mecanismo de memoria dinámica. El proceso de selección del área de interés consiste, de forma general, en un marcaje de puntos a partir de una condición específica y posterior delimitación del área en donde se incluyen todos los nodos seleccionados.

Para marcar los puntos que determinan la posición de la rejilla del nuevo nivel jerárquico de refinamiento, se utiliza un criterio de selección basado en el gradiente de la variable meteorológica escogida por el usuario. En la técnica BORAR la extrapolación de Richardson es el mecanismo sugerido para esta tarea, no obstante, implementar este supone un aumento considerable de capacidad computacional algo no es factible en este caso. Según las necesidades de cada situación se puede seleccionar, a partir de unas pequeñas modificaciones en el código de la subrutina (que consiste en habilitar y deshabilitar) la variable meteorológica a analizar para llevar a cabo el proceso de refinamiento.

El parámetro de control añadido al modelo: *grad* (que puede tomar valores entre 1 y 3), determina la forma del gradiente a utilizar, es decir, existe la posibilidad de elegir una de las tres formas propuestas del gradiente para calcular esta magnitud en cada nodo en dependencia de la variable meteorológica seleccionada (ecuaciones 9, 10 y 11):

$$|\text{datos}(i, j, k) - \text{datos}(i, j - 1, k)| \quad (9)$$

$$|\text{datos}(i, j, k) - \text{datos}(i - 1, j, k)| \quad (10)$$

$$\sqrt{(\text{datos}(i, j, k) - \text{datos}(i, j - 1, k))^2 + (\text{datos}(i, j, k) - \text{datos}(i - 1, j, k))^2} \quad (11)$$

Con la ecuación 9 se calcula el gradiente horizontal en cada nodo y por tanto se pierde la primera columna de cada subrejilla correspondiente a los niveles verticales que van a ser analizados, con la ecuación 10 se calcula el gradiente vertical, perdiéndose la primera fila, por último, con la ecuación 11 se calcula la componente total del gradiente, obviándose la primera fila y la primera columna. Un aspecto importante en todo el proceso es que el marcaje se realiza en los niveles de la vertical que son especificados a partir de los parámetros de control añadidos *nvvert(1)* y *nvvert(2)*. Tomar todos los niveles verticales asegura que la inclinación del sistema meteorológico, al aumentar en altura, se vea reflejada en los nuevos niveles de refinamiento.

Después de obtenido el valor del gradiente, de la variable seleccionada, en cada uno de los nodos de las subrejillas de los niveles verticales de estudio, se realiza un marcaje de puntos a partir de la comparación de estos valores y un umbral (especificado en los parámetros de control). Los puntos donde el gradiente sobrepase dicho umbral son tenidos en cuenta para determinar el tamaño y posición de la nueva (solo una) subrejilla para cada nivel vertical que van a formar parte en conjunto del nuevo nivel de mayor resolución. Estas van a ser todas iguales y tener forma rectangular (sin rotación), cada lado va a estar limitado en primer lugar por el/los punto(s) extremo(s) en cada dirección correspondiente sin importar en qué nivel en la vertical, de los analizado, estén estos puntos.

Otro aspecto a mencionar es la existencia de la llamada zona buffer (*zbuffer*). Este parámetro fue añadido y es también especificado para cada simulación. La zona buffer es un número entero que representa la cantidad extra de celdas, respecto a las rejillas del nivel anterior de refinamiento, que serán añadidas a cada lado de las subrejillas en el nuevo nivel para lograr que el sistema meteorológico, con su movimiento, permanezca mayor tiempo dentro de las subrejillas formadas y la reestructuración de los niveles jerárquicos no se tenga que realizar de forma seguida comprometiendo la eficiencia computacional del proceso. Además, la zona buffer contrarresta la propagación de los errores de un nivel de resolución a otro por concepto de interpolación de condiciones iniciales y de frontera.

A continuación, el diagrama de flujo (Figura 4) con los principales procesos que se encuentran programados en la subrutina encargada de la selección adaptativa:

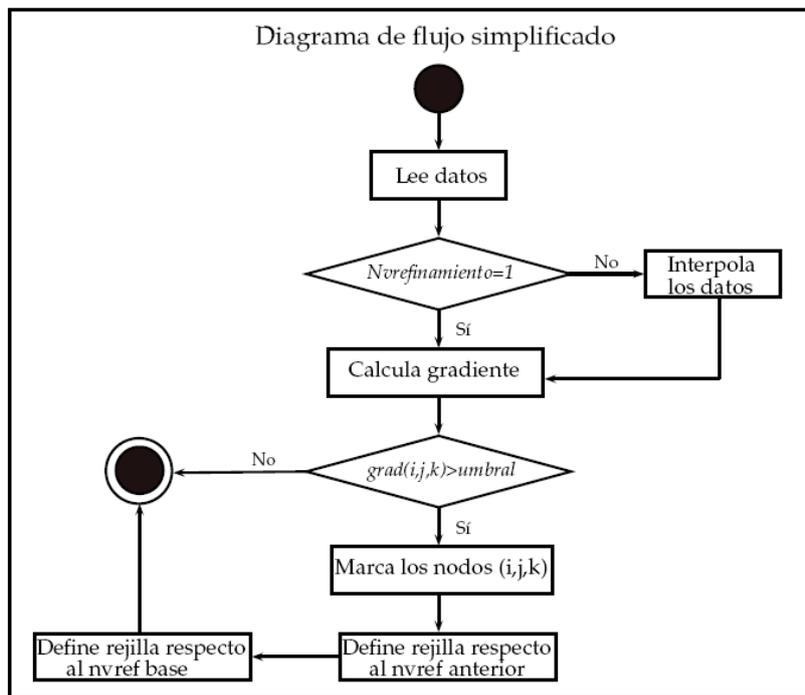


Fig. 4. Diagrama de flujo con los principales procesos que se encuentran programados en la subrutina encargada de la selección adaptativa

Con la implementación de dicha subrutina se eliminan los siguientes parámetros de control destinados originalmente al módulo ARPSAGRI, estos pasan a ser calculados en tiempo de ejecución del modelo:

- ixc()* - Indica el centro de las nuevas subrejillas con respecto al nivel de refinamiento base (en la dirección de x),
- jyc()* - Indica el centro de las nuevas subrejillas con respecto al nivel de refinamiento base (en la dirección de y),
- ixln()* - Indica el largo de las nuevas subrejillas con respecto al nivel de refinamiento base (en la dirección de x),
- jyln()* - Indica el ancho de las nuevas subrejillas con respecto al nivel de refinamiento base (en la dirección de y).

2.4. Reestructuración de niveles de refinamiento

Para el proceso de reestructuración de los niveles jerárquicos de refinamiento se confeccionó un script en el lenguaje de programación Shell. Este utiliza la capacidad de reinicio, que posee el módulo de refinamiento, a partir de simulaciones hechas con anterioridad y además maneja todo el proceso de ejecución del ARPSAGRI aunque no se pueda o desee realizar la reestructuración. Se añadieron, para la utilización específica en el script, dos nuevos parámetros de control (Figura 5).

resrej = .true., Indica si se realizan o no las reestructuraciones.
 cpresrej = 50, Cantidad de pasos entre dos reestructuraciones consecutivas.

Fig. 5 Parámetros de control añadidos para ser utilizados en el script encargado de las reestructuraciones

El script, a partir del tiempo total de corrida, el paso temporal y el valor para el parámetro *cpresrej* (todos especificados para cada simulación) calcula los diferentes momentos en que se deben realizar las reestructuraciones de los niveles de refinamiento. Todo se basa en indicar estos tiempos exactos donde es necesario producir los archivos que serán utilizados en la próxima simulación (reinicio) y por tanto reestructuración. Estos archivos contienen la información para cada variable meteorológica en el momento en que se crean, información que será utilizada (específicamente la información del nivel de resolución base) para la selección de los nuevos conjuntos de subrejillas.

Según la cantidad de veces que se determine realizar la reestructuración (cálculo hecho con los pasos temporales especificados, a producirse entre dos reestructuraciones consecutivas, y el tiempo total de simulación), van a ser las sub-ejecuciones o ejecuciones secundarias que se producen del modelo. Antes de cada sub-ejecución el script se encarga de manipular los parámetros de control relacionados con tiempo final de simulación y de creación de archivos para reinicio, el proceso se repite hasta que se llegue al tiempo total de simulación. En la figura 6 se puede observar mejor todo lo explicado anteriormente, en ese ejemplo se producen tres reestructuraciones y cuatro sub-ejecuciones del modelo.

Si la cantidad de pasos temporales de integración entre dos reestructuraciones consecutivas es mayor que el tiempo total de corrida entonces dicho proceso no se llevará a cabo. Queda a opinión del usuario determinar según las necesidades, los recursos disponibles y las características del fenómeno meteorológico, los momentos en que se realiza o no la reestructuración.

Para el correcto funcionamiento del script se modificó, en el código fuente del módulo, lo relacionado con los parámetros que se leen de los archivos de simulaciones anteriores, se eliminó la lectura de todo lo vinculado con los niveles de refinamiento creados con anterioridad. Así, encada ejecución secundaria, se crean nuevas subrejillas sin tener en cuenta las creadas en otras sub-ejecuciones.

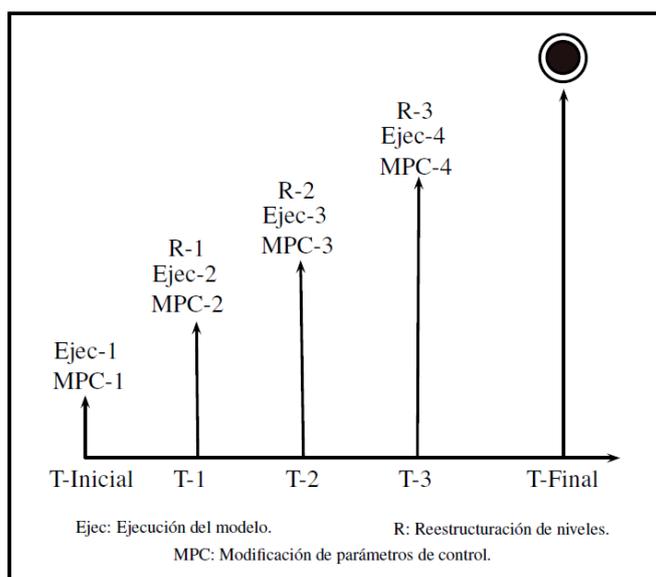


Fig. 6. Representación del proceso de reestructuración de niveles de refinamiento

2.5 Caso de estudio y perturbaciones iniciales

Para comprobar las modificaciones realizadas en el módulo ARPSAGRI, el caso de estudio seleccionado fue la tormenta de super celda con tornados ocurrida el 20 de mayo de 1977 en Oklahoma, E.U. La morfología y evolución de esta tormenta ha sido ampliamente estudiada¹ y además constituye el caso que, por defecto, trae implementado el modelo ARPS.

El dominio de estudio estuvo representado inicialmente por 67x67 x35 puntos de rejillas, con resolución de 1km en la horizontal y 500m en la vertical, aunque para algunas simulaciones realizadas con el modelo fue necesario realizar algunos cambios que serán especificados posteriormente. Como condiciones iniciales se utilizaron los datos del sondeo aerológico efectuado a las 2100 UTC para el día especificado, lo que implica un campo inicial homogéneo en la horizontal variando solo entre un nivel vertical y otro. Por esto, fue necesario introducir una perturbación inicial forzada para realizar el estudio, esta perturbación fue dada en la variable temperatura potencial (θ) y con forma de burbuja elipsoidal.

Todas las simulaciones se realizaron con una configuración tridimensional muy sencilla que no tuvo en cuenta los efectos de la orografía, de la radiación, uso de suelo, fuerza de fricción y de Coriolis. Se incluyó el esquema de parametrización de la microfísica de Kessler (1969) para la fase líquida. Se usó, para la turbulencia, la parametrización 1.5 TKE mezcla turbulenta, con el número de turbulencia de Prandtl igual a 1.

¹Ver Ray et al., (1981) y Klemp y Rotunno, (1983).

3. Resultados y discusión

Una vez añadida al módulo ARPSAGRI la capacidad de selección adaptativa de las zonas de interés a refinar y de reestructuración en el tiempo de los niveles jerárquicos de refinamiento se procedió a la comprobación de dichas tareas. Además, se realizó un análisis del funcionamiento general del módulo para ser utilizado en el estudio de fenómenos de pequeña escala.

3.1 Proceso de selección adaptativa

En las imágenes de la figura 7 se observan algunos resultados obtenidos en la simulación 1, estas muestran la correcta creación de las nuevas subrejillas de mayor resolución en $t = 0$. Por ser los valores de casi todas las variables meteorológicas, en el momento inicial, homogéneos en cada nivel vertical, se seleccionó a la temperatura potencial como magnitud de estudio ya que en este caso solo se quería comprobar el proceso de selección adaptativa desde un punto de vista geométrico. Se tuvieron en cuenta para la selección adaptativa los 35 niveles verticales, aunque para el tiempo en que se realizó, la burbuja solo abarcaba los primeros 7.

En el dominio principal (imagen de la izquierda), se encuentra representada la burbuja de perturbación con su ubicación exacta, arriba una ampliación de la misma, señalándose las zonas refinadas. También se encuentran los tres nuevos niveles de refinamiento con resoluciones respectivas de 500m, 250m y 125m, esto en la horizontal (disminuye siempre la mitad por utilizarse un factor de refinamiento espacial igual a 2). La cantidad de detalles del sistema, observados en las gráficas, aumenta a medida que mejora la resolución.

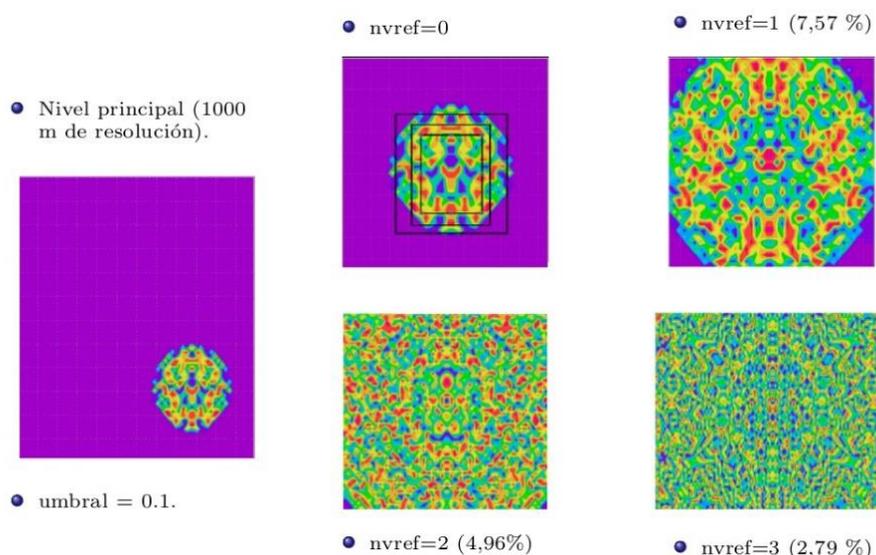


Fig. 7. Representación de la temperatura potencial en los distintos niveles de refinamiento ($t = 0$).

La representación corresponde al tiempo inicial y al nivel vertical número cinco (1750m, nivel en el que para el tiempo especificado la burbuja posee el mayor radio). Se muestran además los porcentajes que representan cada nuevo dominio con respecto al principal, siendo, para este ejemplo, valores muy pequeños (menores al 8%) debido en parte al hecho de no haber comenzado todavía el desarrollo del fenómeno meteorológico. Con este caso se demuestra que el proceso de selección, viendo sus características más generales, se realiza satisfactoriamente.

3.2 Proceso de reestructuración de niveles de refinamiento

Comprobado el proceso de selección adaptativa se procedió a la verificación de la reestructuración en el tiempo de los distintos niveles jerárquicos de refinamiento. En el ejemplo que a continuación se analiza se utilizó una simulación (simulación 2) donde la variable meteorológica a tener en cuenta para la selección fue qr (razón de mezcla de agua de lluvia).

El número de pasos temporales entre dos reestructuraciones consecutivas ($cpresrej$) fue de 50, por tanto, el tiempo entre estas es de 150s (paso temporal de integración utilizado, $dt = 3s$). El fenómeno de estudio al ser un sistema convectivo de escala local, tiene un rápido desarrollo por lo que para evitar realizar de forma frecuente reestructuraciones y mantenerlo siempre dentro de las nuevas subrejillas se aumenta la zona buffer ($zbuffer = 5$).

En la figura 8 se observan tres momentos diferentes de la integración y en ellos los nuevos niveles de refinamiento creados tienen diferentes características. Las tres imágenes inferiores muestran el dominio principal

y las dos superiores el nivel de refinamiento 1, todas correspondientes al nivel vertical 12 (5250m). A los 3 minutos todavía no existía en dicho nivel vertical, según los datos calculados por el modelo, agua líquida por condensación, por tanto el gradiente calculado por la subrutina de selección solo tomó el valor cero. Ante tal situación no se refinó sobre zona alguna. Luego a los 15 min, el modelo da por primera vez agua líquida para el nivel vertical 12. Debido a que se utilizó un valor del umbral muy bajo se logró detectar la zona de interés desde el mismo momento inicial en que aparece. Se crea entonces el nuevo nivel de refinamiento con resolución de 500m.

La última reestructuración que se muestra en la figura 8 se corresponde con los 30 min de pronóstico. Obsérvese que en este tiempo el fenómeno ha ganado en intensidad y tamaño por lo que las subrejillas correspondientes al nivel 1 de refinamiento, para cada nivel vertical, también se modifica. Siempre teniendo en cuenta la zona buffer añadida.

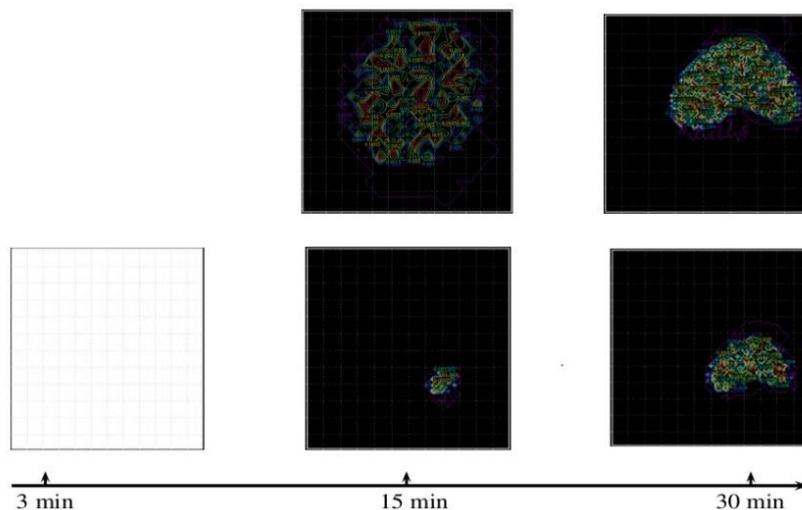


Fig. 8. Proceso de reestructuración de rejillas. Imágenes inferiores correspondientes al nivel principal de refinamiento, imágenes superiores correspondientes al nivel 1 de refinamiento. Todas del nivel vertical 12 (5250m).

3.3 Análisis del funcionamiento general del módulo ARPSAGRI modificado

Ya añadida y demostrada la capacidad de selección adaptativa y de reestructuración con el paso del tiempo de los niveles de refinamiento, se procedió a comprobar el funcionamiento general del módulo. Se realizaron nuevas simulaciones que junto con las presentadas anteriormente aportaron los datos necesarios para el análisis de todo el proceso. A continuación, se exponen los resultados obtenidos.

Con el objetivo de establecer comparaciones en cuanto a la cantidad total de nodos en las rejillas, espacio almacenado en memoria y tiempo total de corrida, todos parámetros de eficiencia, se estudiaron los resultados obtenidos en diferentes ejecuciones que fueron inicializadas todas con los datos del sondeo y la perturbación inicial de la temperatura potencial en forma de burbuja elipsoidal. Solo se realizó la selección adaptativa en el momento inicial teniendo en cuenta los valores del gradiente para la temperatura potencial y no se llevaron a cabo reestructuraciones por tratarse de períodos muy cortos de tiempo.

En un primer paso se analizó el proceso de refinamiento adaptativo aplicado al dominio de estudio con resolución inicial de 1 km, se utilizó un factor de refinamiento espacial y temporal igual a 2 y se creó un solo nivel de mayor resolución. El dt para la rejilla principal fue de 6s y para la integración de las ondas acústicas el dt inicial fue de 1s. La tabla I muestra los valores obtenidos para diferentes parámetros relacionados con la eficiencia de las ejecuciones (el tiempo total pronosticado fue de 1 h).

Se compararon los datos entre la simulación sin refinamiento para el dominio principal, la simulación con refinamiento (resolución alcanzada 500 m) y la realizada utilizando un dominio con resolución espacial en la horizontal uniforme e igual a 500 m. Teniendo en cuenta los valores que indican la cantidad de nodos y el máximo espacio almacenado en memoria, determinado por la dimensión utilizada del arreglo principal (n_{temp} indica la dimensión del arreglo principal que es ocupada justo en el momento en que finaliza la ejecución del modelo), los mejores resultados se obtuvieron como era esperado, para la rejilla gruesa, sin embargo, en la práctica es necesario trabajar con valores más altos de resolución para obtener mejores pronósticos de fenómenos de escala local. En la rejilla fina uniforme la resolución es buena en todo el dominio no obstante obsérvese como los valores de los parámetros calculados son elevados.

Tabla I. Valores obtenidos para varios parámetros relacionados con las simulaciones llevadas a cabo con configuraciones diferentes de rejillas, para 1 h de pronóstico y resolución máxima alcanzada de 500m.

Rejilla /Parámetros	Resolución	Cantidad de nodos	Almacenamiento	
			máximo	ntemp
Gruesa	1000m	4489 x 35	15728023	11139150
Fina	500m	17689 x 35	61791799	43737870
Con Refinamiento	500m	6244 x 35	20107128	15518255

En la corrida con refinamiento, para el ejemplo analizado, se obtienen valores de los parámetros cantidad de nodos y espacio almacenado en memoria que no llegan a ser bajos si tenemos en cuenta las condiciones del experimento, pero pueden ser considerados aceptables. El espacio máximo utilizado en memoria (20107128, dimensión utilizada del arreglo principal) es considerablemente menor que el utilizado en la simulación donde se obtuvo la misma resolución en todo el dominio (61791799, dimensión utilizada de arreglo principal).

Otro parámetro de eficiencia que se debe tener en cuenta es el tiempo total que demora todo el proceso de ejecución. Los valores de los parámetros contenidos en la tabla II demuestran los beneficios que con respecto a este factor se pueden obtener al utilizar el módulo de refinamiento ARPSAGRI. En este caso, donde por el tamaño inicial del fenómeno y los valores especificados para los diferentes parámetros de control se creó un primer nivel jerárquico de dimensiones medias, el tiempo total de corrida para la simulación con refinamiento fue siempre muy inferior al obtenido en la simulación con alta resolución uniforme.

Tabla II. Tiempos de corrida para diferentes tiempos pronosticados. Resolución máxima alcanzada en la rejilla fina uniforme y la simulación con refinamiento igual a 500m.

Rejilla/ T. pronosticado	1 hora		45 minutos		30 minutos		15 minutos	
Gruesa	588 (≈ 10 min)		441 (≈ 7 min)		278 (≈ 5 min)		116 (≈ 2 min)	
Fina uniforme	4857 (≈ 81 min)		3633 (≈ 61 min)		2208 (≈ 37 min)		981 (≈ 16 min)	
Con Refinamiento	970 s	21 s	744 s	17 s	487 s	11 s	210 s	5 s
	arpsolver	agri	arpsolver	agri	arpsolver	agri	arpsolver	agri
	991 (≈ 16 min)		761 (≈ 12 min)		498 (≈ 8 min)		215 (≈ 4 min)	

En cada uno de los plazos de tiempo analizados se mantuvo, como se muestra en la figura 9, el tiempo total de corrida de la simulación con refinamiento por debajo del tiempo pronosticado (por encima de la curva que representa la función LINEAL). Además, la tendencia es a ir aumentando la diferencia a medida que se aumenta el tiempo pronosticado. Esto demuestra que al utilizarse el módulo de refinamiento a pesar de trabajar con altas resoluciones, es posible obtener conjuntos de datos en momentos todavía adecuados para su análisis y posterior divulgación de los resultados.

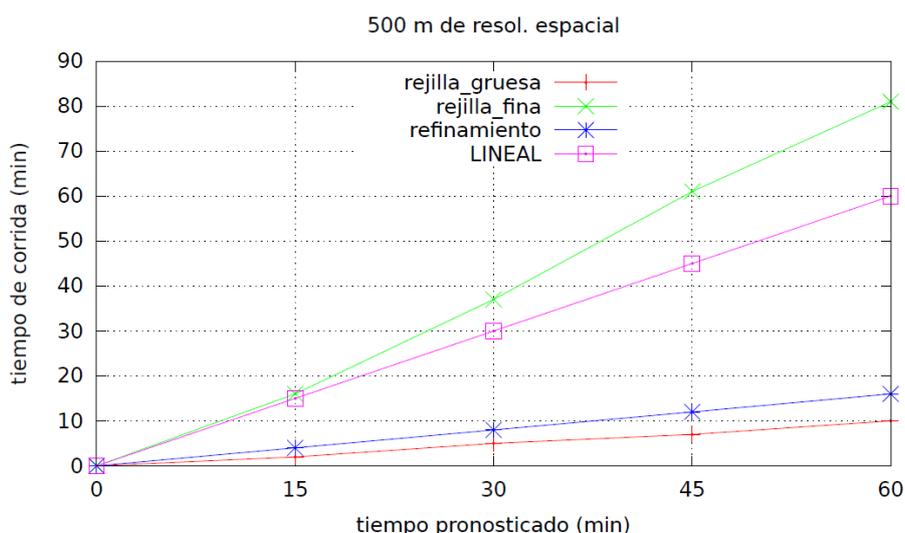


Fig. 9. Gráfica que representa, para cada simulación realizada, el tiempo total de corrida en dependencia del tiempo real pronosticado.

Es preciso aclarar que cuando el intervalo de tiempo pronosticado aumenta, es necesario realizar la reestructuración de los niveles jerárquicos lo que se traduce, en la mayoría de los casos, en un aumento del tamaño de las subrejillas, proceso que encarece, desde un punto de vista computacional, la integración de las ecuaciones en el modelo.

Para el caso en que se utilizó una resolución horizontal uniforme de 500m en todo el dominio, el tiempo total de corrida siempre fue superior al tiempo total pronosticado por lo que su utilización para este caso deja de ser válida para el pronóstico operativo, esto con los recursos computacionales disponibles.

Para la comparación mostradas hasta aquí solo se han tenido en cuenta las simulaciones donde la resolución máxima alcanzada es de 500m y la realizada utilizando el dominio principal con resolución de 1 km. Las tablas III y IV muestran los resultados obtenidos cuando la resolución máxima alcanzada fue de 250m (2 niveles de resolución en el caso de la simulación con refinamiento) y 125m (3 niveles de resolución en el caso de la simulación con refinamiento), además se mantienen los resultados para la simulación que utiliza la rejilla gruesa.

Tabla III. Datos obtenidos para simulaciones con diferentes configuraciones de rejillas para 1h de pronóstico y resolución máxima alcanzada de 250m.

Rejilla /Parámetros	Resolución	Cantidad de nodos	Almacenamiento	Tiempo de ejecución	
Gruesa	1000m	4489 x 35	15728023	588 (≈ 10 min)	
Fina	250m	70225 x 35	245003311	39225 (≈ 11 horas)	
Con Refinamiento	250m	10819 x 35	31546923	3178 s arpsolver	78 s agri
				3257 (≈ 54 min)	

Tabla IV. Datos obtenidos para simulaciones con diferentes configuraciones de rejillas para 1h de pronóstico y resolución máxima alcanzada 125m.

Rejilla /Parámetros	Resolución	Cantidad de nodos	Almacenamiento	Tiempo de ejecución	
Gruesa	1000m	4489 x 35	15728023	588 (≈ 10 min)	
Fina	125m	279841 x 18	514070480	+ 1 día	
Con Refinamiento	125m	20090 x 35	59294380	12486 s arpsolver	278 s agri
				12764 (≈ 213 min)	

El número total de nodos es proporcional al espacio almacenado en memoria. Los cálculos correspondientes al dominio de alta resolución uniforme utilizaron dimensiones elevadas del arreglo principal(Figura 10). Para el caso en donde se obtuvo 125mde resolución, sin utilizar el refinamiento, fue necesario disminuir a 18 los niveles verticales a tener en cuenta pues se utilizó más de 2GB de memoria cuando se hicieron los cálculos con los 35 niveles verticales definidos para el resto de las simulaciones lo que llevó a la interrupción de las ejecuciones por falta de capacidad computacional.

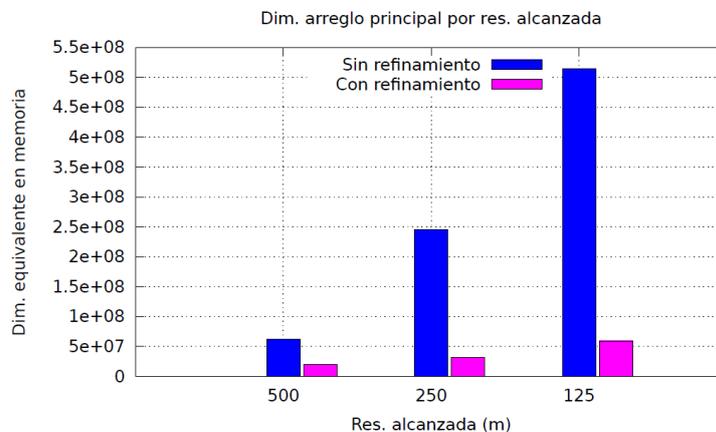


Fig. 10. Dimensión máxima utilizada del arreglo principal para diferentes resoluciones alcanzadas

También la gráfica de la figura 11 muestra la forma en que se comporta el número total de nodos a medida que se avanza en el tiempo. Los datos graficados se corresponden con la *simulación 2* en donde se utilizó el proceso de reestructuración de niveles. Se observa claramente como la cantidad de puntos de rejilla aumenta progresivamente debido al desarrollo del sistema meteorológico y al consecuente aumento del tamaño de las nuevas subrejillas, esto se traduce en mayor capacidad operacional requerida para utilizar este proceso.



Fig. 11. Número total de nodos obtenidos en cada reestructuración de niveles jerárquicos

Conclusiones

Después de un análisis de los resultados obtenidos al aplicar el módulo de refinamiento a un mismo caso de estudio con configuraciones diferentes, se puede concluir que el proceso de reestructuración de niveles de refinamiento y el de selección adaptativa contribuyen con la disminución del costo computacional en las simulaciones e independizan el funcionamiento del módulo ARPSAGRI del modelo de pronóstico del tiempo ARPS. Con la implementación de ambos procesos es posible obtener, en la mayoría de los casos, un número total de nodos y de espacio almacenado en memoria menor cuando para una misma resolución máxima alcanzada se utiliza el refinamiento adaptativo y no el dominio único de resolución uniforme. En general se determinó que el módulo de refinamiento adaptativo ARPSAGRI, con las modificaciones añadidas, constituye una herramienta que puede ser empleada en el estudio de fenómenos de pequeña escala, más en condiciones de limitada capacidad computacional.

Recomendaciones

El resultado de esta investigación puede ser mejorado a partir de las siguientes recomendaciones:

- Utilizar otros criterios más avanzados para la selección adaptativa que tengan en cuenta la variación real en el tiempo de la variable meteorológica seleccionada.
- Añadir la capacidad de crear más de un conjunto de subrejillas por cada nuevo nivel de refinamiento.
- Implementar el módulo de refinamiento, con todo lo añadido, en las nuevas versiones del modelo ARPS.
- Paralelizar todo el proceso de refinamiento adaptativo de rejillas incluido en el módulo ARPSAGRI.

Referencias

- Adlerman, E. J., Droegemeier, K. K., y Davies R. P. J. 1999. A numerical simulation of cyclic mesocyclogenesis. *J. Atmos. Sci.*, 56, 2045-2069.
- Berger, M. y Olinger, J. 1984. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations. *J. Comput. Phys.*, 53, 484-512.
- Jablonowski, C. 2004. *Adaptive grids in weather and climate modeling*. Ph.D. dissertation, University of Michigan, Ann Arbor, MI, Department of Atmospheric, Oceanic and Space Sciences, 266 pp.
- Kessler, E. 1969. *On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation*. Meteor. Monogr., 10, no. 32, Amer. Meteor. Soc.
- Klemp, J. B. y Rotunno, R. 1982. A study of the tornadic region within a supercell thunderstorm. *J. Atmos. Sci.*, 40, 359-377.
- Martínez, E. 2012. *Implementación de un método híbrido Wavelet + Diferencias Finitas para la resolución de ecuaciones en derivadas parciales con aplicación a la Meteorología*. Tesis (Graduación) – Facultad de Medio Ambiente, Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas.
- Ray, P. S., Johnson, B., Johnson, K. W., Bradberry, J. S., Stephens, J. J., Wagner, K. K., Wilhelmson, R. B. y Klemp, J. B. 1981. The morphology of severe tornadic storms on 20 May 1977. *J. Atmos. Sci.*, 38, 1643-1663.
- Sierra, M. 2011. *Wavelets en refinamiento de rejillas y detección de Rollos Convectivos Horizontales*. Tesis (Maestría) - Facultad de Matemática y Computación, Universidad de la Habana.
- Skamarock, W., Olinger, J., y Street, R. 1989. Adaptive grid refinement for numerical weather prediction. *J. Comput. Phys.*, 80, 27-60.
- Skamarock, W. y Klemp, J. B. 1993. Adaptive grid refinement for two-dimensional and three-dimensional nonhydrostatic atmospheric flow. *Mon. Weather Rev.*, 121, 788-804.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., y Woodward, P. 1993. *Simulation of tornado vortices within a supercell storm using adaptive grid refinement technique*. Preprints, 17th Conference on Severe Local Storms. St. Louis, MO, Amer. Met. Soc., 362-365.
- Xue, M., Droegemeier, K. K., Wong, V., Shapiro, A. y Brewster, K. 1995. *ARPS Version 4.0 user's guide*. Center for Analysis and Prediction of Storms, University of Oklahoma, 388p.
- Xue, M.; Droegemeier, K. K.; Wong, V. 2000. The Advanced Regional Prediction System (ARPS) -A multi-scale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction model. Part I: Model dynamics and verification. *Meteorol. Atmos. Phys.* 75, 161-193.

Acerca de los autores:

Ángel Domínguez Chovert: Graduado de Licenciatura en Meteorología en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), Cuba, 2013. Ha participado en numerosos eventos relacionados con meteorología y ha actuado como docente en dos universidades. Actualmente es becario de Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) y alumno de la Maestría en Meteorología de la Universidad Federal de Pelotas, RS – Brasil, donde realiza investigaciones vinculadas con modelos numéricos del tiempo y contaminación atmosférica.

Maibys Sierra Lorenzo: Graduada de Licenciatura en Ciencias de la Computación en Universidad de la Habana, 2008. Obtuvo el Máster en Ciencias Matemáticas en la Universidad de la Habana, 2011. Se desempeña como Especialista Superior en Meteorología Aplicada en Instituto de Meteorología y como profesora de la carrera de Licenciatura en Meteorología con Categoría Docente Instructor. Las líneas de investigación en que se desarrolla abarcan el Pronóstico Numérico (modelos MM5V3 y ARPS), Wavelets y solución de Ecuaciones Diferenciales en Derivadas Parciales y Tormentas Locales Severas. Domina los idiomas español, inglés y portugués. Se desempeña además como Árbitro de la Revista Cubana de Meteorología.

Nivian Quintana Rodríguez: Graduada de Licenciatura en Meteorología en el Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas (InSTEC), 2008. Se desempeña como Especialista Superior en Meteorología Aplicada en Instituto de Meteorología. Las líneas de investigación en que se desarrolla abarcan el pronóstico numérico (*Advanced Regional Prediction System, ARPS*), los métodos de clasificación (Redes neuronales artificiales) y las Tormentas Locales Severas. Domina los idiomas español e inglés. Se desempeña además como Árbitro de la Revista Cubana de Meteorología.