

# Cómputo Paralelo Aplicado a Modelos Numéricos del Clima

Fernando G. Tinetti\*, Pedro G. Cajaraville<sup>#</sup>, Juan C. Labraga<sup>###</sup>, Mónica A. López<sup>###</sup>

<sup>#</sup>Departamento de Informática, Facultad de Ingeniería – (UNPSJB<sup>1</sup>)

<sup>###</sup>Centro Nacional Patagónico (CENPAT-CONICET<sup>2</sup>)

Facultad de Informática – (UNLP<sup>3</sup>)

fernando@info.unlp.edu.ar, gustavo.cajaraville@gmail.com, labraga@cenpat.edu.ar, monica@cenpat.edu.ar

## RESÚMEN

En este proyecto se aplicarán las estrategias y métodos de cómputo paralelo a un modelo numérico del clima existente (para cómputo secuencial). Aunque el modelo del clima es específico, los modelos numéricos (y sus implementaciones en programas de cómputo), tienden a ser similares en cuanto al tipo de procesamiento (integración o derivación parcial con métodos numéricos) y en cuanto a las dependencias de datos que deben ser tenidas en cuenta para resolver el problema. Por otra parte, la transformación de un programa de cómputo intensivo secuencial a uno paralelo presenta un desafío importante a ser resuelto por un grupo interdisciplinario. El producto final de este proyecto es la obtención de un programa paralelo a ser utilizado en un cluster de PCs con rendimiento optimizado de acuerdo a los recursos disponibles. No menos importante es la conformación de un grupo de investigación interdisciplinario abierto a la generación de recursos humanos y de investigación.

**Palabras Clave:** Cluster de PCs, Cómputo Intensivo, Modelado Climático, Evaluación de Rendimiento Paralelo.

## 1. INTRODUCCIÓN

El área de cómputo paralelo ha evolucionado en muchos sentidos, desde el hardware de cómputo hasta los algoritmos y bibliotecas especializados en determinadas tareas. Desde el punto de vista del hardware de procesamiento numérico intensivo, los clusters de computadoras de escritorio se han establecido firmemente para resolver los problemas de cómputo científico tradicionales y se están aplicando a nuevos problemas también [2] [3] [4]. Tanto el alto costo de las computadoras paralelas como la reducción de costo y el incremento de capacidad del hardware de procesamiento que se puede denominar estándar y de uso masivo ha llevado a que las computadoras paralelas actuales tengan una fuerte tendencia a incorporar este hardware estándar como básico. La idea de cómputo paralelo en las redes locales (denominadas *clusters* de computadoras cuando se utilizan para cómputo paralelo) de alguna manera es posible a partir de la interconexión misma de las computadoras, dado que se tiene todo lo básico que se necesita para llevar a cabo cómputo paralelo: unidades de procesamiento con su propia memoria y la interconexión de las mismas [9] [10] [11].

---

<sup>1</sup> Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco

<sup>2</sup> Centro Nacional Patagónico - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>3</sup> Universidad Nacional de La Plata

\* Investigador Asistente, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires

Por otro lado, la comprensión del sistema climático es un problema de gran interés científico mundial. Si bien es cierto que se han realizado avances considerables en el tema, aún son muchos los factores que continúan limitando la capacidad de detectar, atribuir y comprender el cambio climático actual y proyectar los cambios climáticos que podrían ocurrir en el futuro [8]. En la actualidad, las herramientas más confiables para la investigación del clima, sus fluctuaciones y variaciones, son los Modelos de Circulación General de la Atmósfera (*MCGA*). Un *MCGA* es una representación numérica, espacial y temporal, aproximada de los principales procesos físicos que ocurren en la atmósfera y de las interacciones con los otros componentes del medio ambiente. Esencialmente, está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que expresan los principios de conservación de la cantidad de movimiento, la energía termodinámica y la masa del sistema. Actualmente, los *MCGA* están integrados con modelos numéricos de funcionamiento de los océanos, la criosfera, y representaciones simplificadas de la biosfera (*MCGA* acoplados), lo que permite simular las interacciones de la atmósfera con su entorno, en distintas escalas de tiempo.

Mediante el uso de computadoras con gran capacidad de procesamiento y la aplicación de diversos métodos de cálculo numérico pueden obtenerse soluciones numéricas aproximadas del sistema de ecuaciones de un *MCGA*. De este modo, se obtiene la evolución temporal y espacial (tridimensional) del sistema climático, en función de las condiciones iniciales y de contorno elegidas y de los valores de ciertos parámetros climáticos (ejemplo: concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico). La solución numérica de un *MCGA* en condiciones preestablecidas se denomina experimento climático.

El modelo de Circulación General de la Atmósfera CSIRO versión MII, es uno de los *MCGA* actualmente en uso por la comunidad científica, fue desarrollado en la División de Investigaciones Atmosféricas, CSIRO, Australia [CSIRO] y participa junto con otros modelos del The Program for Climate Model Diagnosis e Intercomparison (PCMDI) [6][7]. En el año 1999 fue cedido, luego de un período de capacitación, a un grupo de investigación de la Unidad de Investigación de Oceanografía Física y Meteorología (UIOM) del CENPAT-CONICET. La versión cedida incluye un modelo atmosférico, un modelo oceánico y un modelo de la capa de hielo, integrados en un modelo acoplado océano-atmósfera.

El código original del modelo CSIRO evolucionó hasta la versión MII, la cual fue desarrollada para supercomputadoras (CRAY, Silicon Graphics, etc) con varios procesadores bajo sistema operativo UNIX. Para su utilización en la Argentina fue necesario portar el modelo en computadores de rango intermedio (Sun Ultra10, Enterprise) con un solo procesador. Puede decirse que existen en la actualidad tres factores que limitan los avances en el estudio del clima utilizando la versión cedida del modelo CSIRO MII:

1. Algunos experimentos climáticos que aportarían conocimientos teóricos nuevos sobre el clima, representan un costo computacional muy alto o son inviables en términos de tiempo de procesamiento.
2. Aplicaciones rutinarias de los *MCGA*, como el pronóstico del tiempo o el clima que requieren numerosas repeticiones de simulaciones de períodos cortos (Ej. Varios días a 1 año) también se ven limitadas en el número de repeticiones posibles cuando forman parte de un pronóstico operativo.
3. Los cambios económicos producidos en la Argentina a partir del año 2001, han dificultado el mantenimiento y actualización de los computadores (workstation SUN) disponibles en el CENPAT, debido al alto costo de los repuestos y de los nuevos equipos.

La búsqueda de optimización del software de éste modelo y el replanteo del hardware utilizado es un objetivo viable en el corto a mediano plazo a través de un trabajo cooperativo interdisciplinario,

cuyo logro ampliaría el campo de aplicaciones de los MCGA y es una alternativa científica posible frente a la creciente complejidad de los modelos dinámicos.

## **2. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

Las líneas de investigación y desarrollo sobre las cuales avanzar están relacionadas con los objetivos generales del proyecto de investigación definido en este contexto:

- Optimizar el rendimiento de un modelo acoplado océano-atmósfera.
- Generar una versión paralela del modelo acoplado océano-atmósfera con las mismas características numéricas que el existente, pero para clusters de PCs [5].
- Evaluar la ganancia de rendimiento obtenida con la versión paralela generada y la posibilidad de aplicación de otras optimizaciones de rendimiento.
- Formar recursos humanos, consolidando un grupo de investigación en cómputo intensivo de modelos numéricos de clima.

### **2.1 Estudio del Modelo Numérico y del Modelo de Procesamiento Secuencial**

Esta línea abarca temas como:

- Comprensión del modelo numérico de base para el modelo computacional acoplado océano-atmósfera. Esto implica el estudio de los procesos modelados numéricamente. [1] [12] y luego, más específicamente los modelos oceánico y atmosférico por separado. Una vez analizados/estudiados estos modelos, se debe avanzar hacia el modelo acoplado océano-atmósfera.
- Comprensión de la estructura del programa o programas de cómputo secuencial que implementa/n el modelo acoplado océano-atmósfera CSIRO MII. Esto implica el estudio de las transformaciones de los datos de entrada, los programas secuenciales asociados a cada uno de los modelos por separado (oceánico y atmosférico respectivamente) y del programa asociado al modelo acoplado. También será importante la aplicación de programas específicos de análisis ejecución y de rendimiento. Dos de los resultados más importantes de este estudio serían la identificación de los procesos físicos modelados en cada subrutina y la posibilidad de documentación adecuada de los programas secuenciales (que actualmente no cuentan con esta documentación).

### **2.2 Métodos de Paralelización del Modelo de Cómputo Numérico**

Una vez estudiado y conocido en detalle el modelo de cómputo secuencial y sus programas asociados ya disponibles, las tareas a realizar con relación a la paralelización del cómputo serían:

- Proponer o descartar una paralelización funcional (o partición funcional) del modelo acoplado. En este sentido, se deben identificar funciones (preferentemente relacionadas de manera directa con los subprogramas actuales implementados en FORTRAN 77), tales que cada una de ellas se pueda resolver en paralelo con las demás al menos de manera parcial.
- Proponer o descartar una paralelización de datos (o partición de datos) del modelo acoplado. En este sentido se deben identificar los datos o la estructura de datos (normalmente un arreglo bidimensional o en general multidimensional) tales que se puedan distribuir entre diferentes procesadores (PCs completas, específicamente) y procesar en paralelo al menos de manera parcial.
- Proponer o descartar una paralelización de pipeline (o en cascada o segmentada) del modelo acoplado. En este sentido se deben identificar (sub)procesos (o procesamiento) sobre los datos que se suceden en el tiempo y que se pueden llevar a cabo en paralelo. Nuevamente,

estos (sub)procesos deberían estar relacionados preferentemente con el código actual del programa.

- En caso de no ser posible ninguna de las posibilidades de paralelización anteriores, se debería proponer la paralelización de uno o de los dos modelos (atmosférico-oceánico respectivamente) por separado, es decir independientemente de que luego se lo utilice en el modelo acoplado.

### 2.3 Implementación Paralela y Evaluación de Rendimiento

De la investigación de las alternativas de paralelización surgirán una o más posibilidades a implementar. En el contexto de la implementación misma, se debería no solamente *codificar un programa paralelo* sino también:

- Definir el criterio de selección de la o las propuestas. Es posible que la diferencia de complejidad para la implementación de cada propuesta sea muy significativa o que la diferencia de rendimiento esperado lo sea.
- Instalar y probar una herramienta o middleware o biblioteca de software que provea un entorno de desarrollo y ejecución de programas paralelos en clusters de PCs. A priori, la primera alternativa y la más probable es alguna de las implementaciones de uso libre de MPI (Message Passing Interface) [MPI] tales como MPICH [MPICH], LAM/MPI [LAM/MPI] u OpenMPI [OpenMPI].
- Seleccionar e implementar al menos una de las propuestas de paralelización (distribuida) de acuerdo con el criterio de selección definido antes y utilizando la herramienta de desarrollo y ejecución de programas paralelos instalada y probada.  
Analizar la posible adaptación de la paralelización implementada a los recursos disponibles (cantidad de computadoras, por ejemplo). Analizar la posible implementación de esta adaptación si la relación costo/beneficio es favorable.
- Analizar la posible adaptación de la paralelización implementada a la probable heterogeneidad de los recursos disponibles (computadoras diferentes, por ejemplo, que proporcionan diferentes capacidades de cómputo). Nuevamente, analizar la implementación de esta adaptación si la relación costo/beneficio es favorable.

## 3. RESULTADOS OBTENIDOS/ESPERADOS

El objetivo principal de este proyecto es la optimización y paralelización (total o parcial) del modelo climático acoplado océano-atmósfera (CSIRO MII) para su utilización en un cluster de PCs con Linux.

La consecución de dicho objetivo permitirá además al grupo de investigación consolidarse como tal, avanzar en el conocimiento sobre modelos numéricos y cómputo paralelo, así como incorporar becarios/tesistas de maestría y/o doctorado, con la consecuente formación de recursos humanos.

## 4. BIBLIOGRAFÍA

[1] Alder B., S. Fernbach and M. Rotenberg, *Methods in Computational Physics, Advances in Research and Applications*, Academic Press, N. York, 1977.

[2] Anderson T., D. Culler, D. Patterson, and the NOW Team, "A Case for Networks of Workstations: NOW", *IEEE Micro*, Feb. 1995.

- [3] Baker M., R. Buyya, "Cluster Computing at a Glance", in R. Buyya Ed., High Performance Cluster Computing: Architectures and Systems, vol. 1, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, pp. 3-47, 1999.
- [4] Becker D. J., T. Sterling, D. Savaresse, J. E. Dorband, U. A. Ranawak, C. W. Packer, "Beowulf: A Parallel Workstation for Scientific Computation", Proc. of the International Conference on Parallel Processing, vol. 1, pp. 11-14, Boca Raton, Florida, Aug. 1996.
- [5] Beyerle U, C. Raible, R. Knutti, T. Stocker, T. Craig, Climate modeling with a Linux cluster, EOS, 85/31, 290, 2004. Disponible en [http://people.web.psi.ch/beyerle/publications/Papers/Renold\\_EOS\\_2004.pdf](http://people.web.psi.ch/beyerle/publications/Papers/Renold_EOS_2004.pdf)
- [6] CAS/JSC Working Group on Numerical Experimentation, prepared by Dr. G.J. Boer et al, Intercomparison of climates simulated by 14 atmospheric general Circulation model, WMO/TD-No 425.
- [7] Global and Planetary Change, An Overview of results from the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP), Febrero de 2001, UCRL-JC 140274.
- [8] Intergovernmental Panel on Climate Change, Tercer Informe de Evaluación – Cambio Climático 2001 – Base Científica, disponible en <http://www.ipcc.ch/pub/un/ipccwg1s.pdf>
- [9] Ridge D., D. Becker, P. Merkey, T. Sterling, "Beowulf: Harnessing the Power of Parallelism in a Pile-of-PCs", Proceedings IEEE Aerospace, 1997, disponible en <http://www.beowulf.org/papers/papers.html>
- [10] Tinetti F. G., Cómputo Paralelo en Redes Locales de Computadoras, Tesis Doctoral (Doctorado en Informática), Universidad Autónoma de Barcelona, Marzo de 2004.
- [11] Warren M. S., T. C. Germann, P. S. Lomdahl, D. M. Beazley, J. K. Salmon, Avalon: An Alpha/Linux Cluster Achieves 10 Gflops for \$150k. Disponible en <http://loki-www.lanl.gov/papers/sc98/> propuesto para el 1998 Gordon Bell Price/Performance Prize.
- [12] World Meteorological Organization, Numerical Method Used in Atmospheric Models, GARP Publication Series 17, 1979.
- [CSIRO] <http://www.csiro.au/>
- [MPI] MPI Forum, "MPI: a message-passing interface standard", International Journal of Supercomputer Applications, 8 (3/4), pp. 165-416, 1994.
- [MPICH] <http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>
- [LAM/MPI] <http://www.lam-mpi.org/>
- [OpenMPI] <http://www.open-mpi.org/>