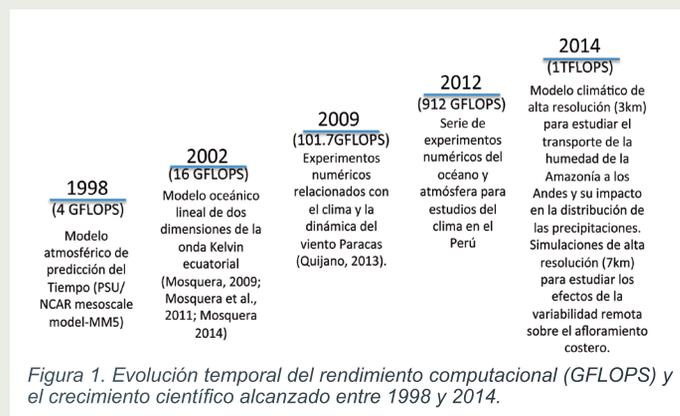


## Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos

Berlin Segura<sup>1</sup>, Ivonne Montes<sup>1</sup> y Kobi Mosquera<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Instituto Geofísico del Perú

En la actualidad, a nivel mundial, el desarrollo y empleo de modelos numéricos implica el uso de supercomputadores y/o computadoras de alto rendimiento para resolver problemas que involucren la dinámica de la Tierra, su interacción con los seres vivos, los procesos naturales que pueden afectar al ser humano y el efecto de este sobre los procesos físicos naturales en diferentes escalas de espacio y tiempo (e.g., sobre todo el planeta o una región en particular y, además, en el pasado, presente o futuro). El Instituto Geofísico del Perú (IGP), por medio del área de Variabilidad y Cambio Climático, no ha estado alejado de esta línea técnica, ya que desde inicios del año 1998 ha venido utilizando, de manera permanente (Figura 1), tecnología de última generación para el desarrollo y aplicación de modelos numéricos que contribuyan a comprender mejor la física de la atmósfera y el océano, a fin de desarrollar su capacidad de pronóstico en temas que son cruciales para el Perú como, por ejemplo, el Fenómeno El Niño.

A inicios del siglo XXI, gracias a un préstamo del Banco Mundial para un proyecto relacionado con el estudio del Fenómeno El Niño, el IGP (junto con otras instituciones) logró adquirir estaciones de trabajo de dos tipos con una capacidad de cálculo de 4 y 16 GFLOPS (Compaq Server DS20 y ES40). Estos equipos fueron de utilidad para continuar con la investigación del clima de la atmósfera y el océano usando modelos numéricos, así como para mantener una base de datos en tiempo real de información oceánica y atmosférica de estaciones automáticas. Fue en estas estaciones de trabajo donde se inició el desarrollo de un modelo oceánico lineal de dos dimensiones de la onda Kelvin ecuatorial (Mosquera, 2009; Mosquera et al., 2011; Mosquera, 2014), cuyos resultados se usan, hasta la actualidad, como uno de los insumos para el diagnóstico y predicción de la dinámica oceánica relacionada al Fenómeno El Niño.



## Modelado numérico actual y proyección

El avance tecnológico ha impulsado el desarrollo e implementación de modelos numéricos que describen el proceso geofísico de manera más compleja, ya que la nueva arquitectura computacional, acompañada de un conjunto de librerías y compiladores que ejecutan muchas instrucciones simultáneamente, permite mejorar la velocidad de las soluciones. Es así que, actualmente, el IGP cuenta con una arquitectura computacional tipo *cluster* (obtenido mediante el proyecto "Impacto de la variabilidad y cambio climático en el ecosistema de manglares de Tumbes" y el proyecto de colaboración SPIRALES2012 IRD<sup>3</sup>-IGP) para la implementación de modelos numéricos paralelizados, es decir, que hacen uso del lenguaje de programación en paralelo (interface de programación de aplicaciones, OpenMP, para la programación multiproceso de memoria compartida e interface de paso de mensajes, MPI, para la ejecución de múltiples tareas, ambos creados por un único programa) para mejorar la eficiencia de cálculo y tener una mejor descripción de la evolución espacial y temporal del proceso geofísico.

## Inicios del modelado numérico en el IGP

A fines del año 1998, el IGP logró revolucionar la meteorología en el Perú al implementar un modelo numérico de la atmósfera (PSU/NCAR *mesoscale model-MM5* instalado en una 'Estación de Trabajo'<sup>1</sup> que alcanzaba los 4 GFLOPS<sup>2</sup>) para la predicción en tiempo real de las condiciones atmosféricas en la región de Sudamérica, lo cual permitió brindar al público especializado (nacional e internacional) un nuevo insumo para el pronóstico de hasta tres días de las condiciones atmosféricas (ver Figueroa et al., 1998 para mayores detalles). Asimismo, en el aspecto de la investigación, esta nueva herramienta numérica fue usada para responder algunas preguntas científicas (ver Silva y Takahashi, 2000).

Es así que en la actualidad contamos con:

- El modelo regional atmosférico WRF (*Weather Research and Forecasting*, Skamarock et al., 2008) para el estudio de nubes bajas sobre el Pacífico. WRF es un modelo numérico de mesoescala creado para el pronóstico y la investigación atmosférica. En el IGP ha sido implementado con una configuración que cubre el Pacífico Este (0°N-35°S/70°W-110°W) y la costa oeste de América, teniendo una resolución horizontal de 30 km. Para las condiciones iniciales y de frontera se usaron datos de reanálisis FNL (NCEP *Final Analysis*) cuyo periodo de estudio cubre los meses de abril y octubre del 2006. En una etapa inicial, se comparan los resultados de la simulación obtenida en el *cluster* IGP con el modelo WRF

<sup>1</sup>Estación de trabajo (workstation): minicomputador de alta rendimiento Digital Equipment Corporation dual - processor Alpha workstation

<sup>2</sup>FLOPS (Floating point operations per second): una medida del rendimiento de la computadora que representa las operaciones de coma flotante por segundo, siendo 1 gigaFLOP (GFLOPS) = 109FLOPS, 1 teraFLOP (TFLOPS) = 1012FLOPS.

<sup>3</sup>Institut de recherche pour le développement.

# Evolución del Sistema Computacional de Alto Rendimiento en el IGP para un mejor pronóstico y estudio de los fenómenos climáticos

Segura B., Montes I. y Mosquera K.

implementado en el *clúster* del IRD que usa diferente número y modelo de procesadores. Los resultados mostraron que, a pesar que las simulaciones tuvieron la misma configuración y condiciones iniciales y, además, usaron las mismas parametrizaciones físicas, hubo una diferencia significativa en la simulación de cobertura de nubes bajas. Esto se debería a que los modelos fueron corridos con distintas versiones de compiladores Fortran, librerías Netcdf y procesador (ver Figura 2).

- El Modelo Lineal Oceánico (LOM) para el estudio de ondas ecuatoriales (LOM, Mosquera, 2009; Mosquera et al., 2010; Mosquera, 2014) que ha sido diseñado usando el lenguaje de programación científico Fortran. Este modelo es forzado con diferentes esfuerzos de vientos provenientes del reanálisis NCEP/CDAS de baja resolución y ASCAT (dispersómetro *Advanced SCATterometer*) y WINDSAT (radiómetro polimétrico) de alta resolución (0.25°). El modelo da como resultado la anomalía del nivel del mar, que ha sido comparada con datos observados de altura dinámica de TAO y temperatura superficial del mar (TSM) de TAO y Reynolds.

- El Modelo Oceánico Regional (ROMS, Shchepetkin and McWilliams, 2009, 2005) para estudiar el rol del océano sobre el clima. ROMS ha sido configurado, en alta resolución (7km), para la región que cubre el Pacífico Tropical Este (12°N-40°S/90°W-67°W) y está siendo empleado para estudiar cómo la variabilidad remota

ejercida por las regiones tropicales (El Niño-Oscilación del Sur, ENOS) y extratropicales influye en la circulación y el clima frente al Perú. El modelo es corrido desde enero de 2000 y diciembre de 2008, siendo introducida la señal interanual relacionada a ENOS a través de las fronteras laterales, como el forzante oceánico remoto, y a través del viento regional, como el forzante local. Los resultados preliminares muestran que el modelo es capaz de reproducir la dinámica conocida de la región: el agua fría aflorada a lo largo de la costa, los filamentos extendidos desde el frente de afloramiento, la corriente hacia el Ecuador fluyendo a lo largo de la costa, la Corriente Ecuatorial Sur durante La Niña y aguas ligeramente más cálidas y una circulación más lenta durante El Niño del Pacífico Central.

En la actualidad, el desafío de la investigación en el área de Variabilidad y Cambio Climático está relacionado a la implementación de un modelo acoplado regional de la atmósfera y el océano (WRF-OASIS<sup>4</sup>-ROMS) para estudiar la dinámica de la interacción atmósfera-océano y la variabilidad climática en el Perú. Para ello se necesita implementar un módulo de acoplamiento (sistema de acoplamiento) para la interacción y la interpolación de los campos entre las componentes de los modelos atmosféricos y oceánicos. Asimismo, se viene trabajando en una serie de experimentos de sensibilidad tanto con el modelo atmosférico como el oceánico para obtener la mejor asignación de las parametrizaciones, así como los parámetros que resuelvan la dinámica de manera más realista; lo mismo que ha permitido medir la eficiencia de la implementación de los modelos numéricos en el *clúster* (ver ejemplo sobre el WRF en la Figura 2). Además, esto será la base para la implementación de un modelo climático que involucre la dinámica océano-atmósfera-tierra, lo que requiere, en consecuencia, de una arquitectura computacional moderna para integrar estas tres componentes. Por esta razón, nuestros proyectos futuros deberán contemplar el incremento de la capacidad computacional, es decir, la adición de nodos computacionales y/o adquisición de otras estructuras computacionales más eficientes.

Procesador	Cluster IRD Altix ICE 8200	Cluster IGP Intel Xeon
Aplicación	WRFv3.3.1	WRFv3.3.1
Compiladores fortran y lenguaje C	ifort v11.1 icc	ifort v13.0 gcc v4.7.1
Librerías Netcdf	Netcdf v4.0.1	Netcdf v3.6.3
Message Passing Interface (MPI)	MPI v3.2	Open MPI v1.6.3
Planificador de tareas	Portable Batch System PBS	SLURM v2.4.4

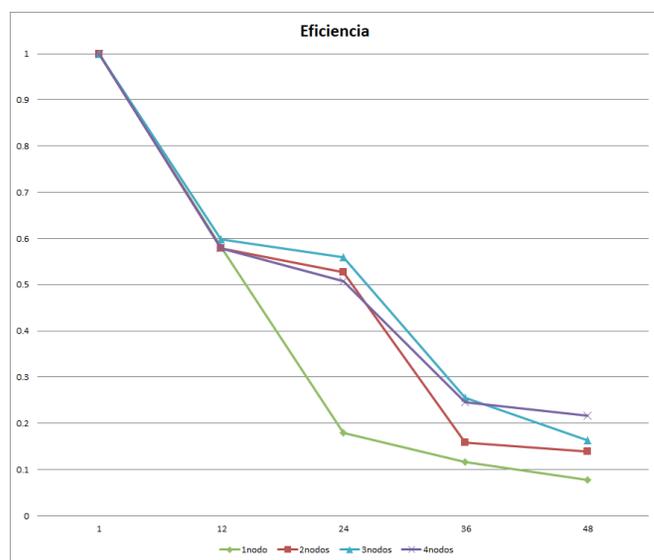


Figura 2. (Arriba) Los compiladores y librerías usados en los clusters IRD e IGP para la implementación del modelo WRF. (Abajo) Eficiencia de la implementación del modelo WRF en el cluster IGP usando MPI con 1 nodo (línea verde), 2 nodos (línea roja), 3 nodos (línea celeste) y 4 nodos (línea morada); mostrando que, aunque la eficiencia disminuye con el número de nodos, su nivel más significativo está asociado al uso de 2 y 4 nodos.

<sup>4</sup>Acoplador Ocean Atmosphere Sea Ice Surface (Valcke et al., 2006).

## Referencias

Figuroa, S. N., P. Lagos, J. P. Fernandez, y K. Takahashi, 1998: Aplicación Operacional del Modelo MM5 para el Pronóstico del Tiempo y la Modernización de la Meteorología en el Perú, Presented at the "VIII Congreso Latino-americano e Iberico de Meteorología y X Congreso Brasileiro de Meteorología".

Mosquera, K., 2009: Variabilidad Intra-estacional de la Onda de Kelvin Ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): Simulación Numérica y datos observados, Tesis para optar el grado de Magíster en Física - Mención Geofísica en la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Mosquera, K., B. Dewitte y P. Lagos, 2011: Variabilidad Intra-estacional de la onda de Kelvin ecuatorial en el Pacífico (2000-2007): simulación numérica y datos observados. Magistri et Doctores, Revista de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Año 5, No9, julio-diciembre de 2010, 55.

Mosquera, K., 2014: Ondas Kelvin oceánicas y un modelo oceánico simple para su diagnóstico y pronóstico, Boletín Técnico "Generación de modelos climáticos para el pronóstico de la ocurrencia del Fenómeno El Niño", Vol. 1, No. 1, Enero, Instituto Geofísico del Perú4-7.

Quijano, J., 2013: Estudio numérico y observacional de la dinámica del viento Paracas, asociado al transporte eólico hacia el océano frente a la costa de Ica-Perú, Tesis para optar el grado de Magíster en Ciencias del Mar - Universidad Peruana Cayetano Heredia.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2005: The regional oceanic modeling system (ROMS): A split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model, Ocean Modelling, 9, 347-404.

Shchepetkin, A. F., and J. C. McWilliams, 2009: Correction and commentary for "Ocean forecasting in terrain-following coordinates: Formulation and skill assessment of the regional ocean modeling system" by Haidvogel et al., Journal of Computational Physics, 227, 3595-3624.

Skamarock, W., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. Barker, M. G. Duda, X.-Y. Huang, and W. Wang, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3, NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR, DOI: 10.5065/D68S4MVH.

Valcke, S., R. Budich, M. Carter, E. Guilyardi, M-A Foujols, M. Lautenschlager, R. Redler, L. Steenman-Clark, N. Wedi, 2006: The PRISM software framework and the OASIS coupler, Proceedings of the eighteenth annual BMRC Modelling Workshop 'The Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS) - challenges and opportunities', A.J. Hollis and A.P. Karito editors, Melbourne, Australia.