

# **Acople entre modelos numéricos en el Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos (SPOA)**

## *Coupling between numerical models into the Oceanic and Atmospheric Forecast System (SPOA)*

Fecha de recepción: 2014-02-03 / Fecha de aceptación: 2014-04-01

Juan Carlos Andukia<sup>1</sup>, Serguei Lonin<sup>2</sup>

**Oceanmet Ltda.** Castillogrande, Carrera 10 No. 5-58, Cartagena, Colombia. Correo electrónico: janducki@yahoo.com<sup>1</sup> y slonin@costa.net.co<sup>2</sup>.

**Andukia JC, Lonin S. 2014.** Acople entre modelos numéricos en el Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos (SPOA). Bol. Cient. CIOH (32): 197-210.

### **RESUMEN**

Se presentan algunos aspectos del acople entre el modelo oceánico sbPOM, el modelo de oleaje CARIBWAM y el modelo atmosférico WRF para gran parte de la cuenca del mar Caribe. El acople consiste en el intercambio de energía en forma de calor, impulso y radiación en la superficie entre océano y atmósfera, rompimiento de olas de viento, generando la turbulencia en la capa superficial del océano en el modelo hidrodinámico, parámetro de rugosidad entregado al WRF, teniendo en cuenta la estratificación de la capa próxima de la atmósfera y temperatura de la superficie del agua para el modelo atmosférico. Lo anterior es la base del Sistema Integrado de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos (SPOA) de la Dirección General Marítima. El Sistema incluye el pronóstico de derrames y búsqueda y rescate, tanto para el Caribe, como para el Pacífico colombiano.

**PALABRAS CLAVES:** SPOA, interacción océano-atmósfera, mar Caribe, acople de modelos.

### **ABSTRACT**

Some aspects of coupling between ocean model sbPOM, wave model CARIBWAM and atmospheric model WRF for the major part of the Caribbean are presented. The coupling consists of energy exchange through heat, sea-surface stress and solar radiation on the sea surface, wave breaking, providing turbulence in the upper-ocean layer for the hydrodynamic model, roughness parameter taken for WRF with stratification of the near-surface layer and sea-surface temperature for the atmospheric model. These are the basis of the integral system of oceanic and atmospheric forecasting (SPOA) of the General Maritime Directorate (DIMAR). The system includes oil spill and Search & Rescue prediction for Colombian Caribbean as well as for its Pacific coast.

**KEYWORDS:** SPOA, ocean-atmosphere interaction, Caribbean Sea, model coupling.

## INTRODUCCIÓN

Desde hace cuatro años opera en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), de la Dirección General Marítima (Dimar), un Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos (SPOA) [1] soportado en supercomputación. Dicho sistema consiste en la integración de diferentes modelos numéricos regionales adaptados para el mar Caribe y el Pacífico colombiano en un ambiente de computación distribuida. Los modelos son: el *Princeton Ocean Model* [2], versión *Stony Brook Parallel Ocean Model* (sbPOM); una evolución del modelo de olas *Netherlands Wave Model* (NedWaM) [3], llamada CARIBWAM [4], y el modelo atmosférico regional *Weather Research and Forecast* (WRF) [5].

El Sistema cuenta con asimilación de datos [6] y ha sido contrastado con observaciones de distintas plataformas (cruceos oceanográficos, registros satelitales, etc.) [7]. Para finales de 2010 el Sistema ofrecía pronósticos operativos completos de la atmósfera y el océano para cinco días [8]. El propósito del presente artículo es presentar algunos aspectos de dicho acople, sin profundizar en detalles técnicos, ni exhibir resultados de investigación. En la metodología se esbozan los pasos esenciales de integración de los modelos, mientras que en la sección de resultados se presentan algunos casos particulares que permiten visualizar las bondades del acople, sin dar aún alguna medida del error.

## ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se circunscribe a parte de la cuenca del mar Caribe y la jurisdicción colombiana del océano Pacífico.

## METODOLOGÍA

La base conceptual del SPOA es la definición de un esquema de acople entre el modelo atmosférico WRF y los modelos oceánico sbPOM y de oleaje CARIBWAM, que, como se afirmó en la Introducción, consiste en un intercambio de energía en la frontera entre atmósfera y océano en forma de: impulso (momentum o tensión de cizalladura del viento), calor latente y sensible (entalpías), radiación (onda corta incidente,

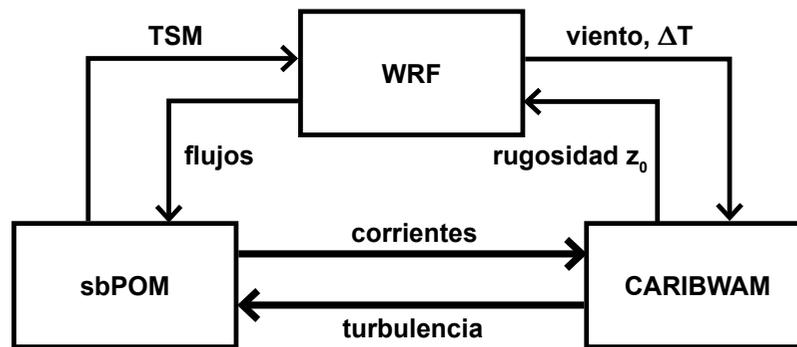
onda larga incidente y emergente), temperatura de la superficie y su rugosidad (en el caso de la superficie del mar).

En este esquema y en primera aproximación, **a)** WRF recibe los datos de temperatura de la superficie del mar —temperaturas que son ya un campo con asimilación de datos de satélite [6]— de sbPOM en el momento de su inicialización, y estos se consideran constantes a lo largo de las 120 horas de simulación con las que opera diariamente el sistema (este procedimiento es una alternativa a la ‘asimilación de cada 3 horas’ del campo satelital de temperaturas que se realiza en el Sistema de Pronóstico Oceánico de Dimar —SPOD—, resultando en la asimilación de un campo suave y no de parches correspondientes al paso de los satélites); **b)** WRF entrega a sbPOM los flujos de intercambio en la interfaz atmósfera-océano: calor latente, calor sensible, impulso y radiación de onda larga y solar cada 10 minutos; **c)** WRF entrega a CARIBWAM las temperaturas del aire de referencia en la capa próxima atmosférica para la determinación de su estabilidad y los vientos para el cálculo de espectros del oleaje; **d)** CARIBWAM entrega a sbPOM la información sobre olas rompientes, y a WRF el parámetro de rugosidad  $z_0$  cada 10 minutos, que a su vez incide sobre los flujos de intercambio, reemplazando la fórmula de Charnock (en la que se supone una rugosidad única que no tiene en cuenta el estado de desarrollo del mar —edad de olas—), utilizada por WRF [5]<sup>1</sup>.

La introducción de una alternativa de cálculo de  $z_0$ , diferente a la fórmula de Charnock usada como aproximación “en grueso” en WRF, está basada en la integración del espectro del oleaje para hallar el parámetro de rugosidad de la superficie del mar, teniendo en cuenta la edad de las olas. El comportamiento de la nueva parametrización de la rugosidad cumple con el comportamiento asintótico del parámetro [9] y permite esperar una mejora del sistema integrado de pronóstico, aspecto que sería deseable poder examinar en un futuro cercano.

Finalmente, sbPOM envía las corrientes a CARIBWAM y éste le devuelve las tasas de disipación de la energía por turbulencia. Estos dos últimos intercambios son independientes del modelo atmosférico. El esquema de la Figura 1 resume lo dicho.

<sup>1</sup> Cfr. pág. 72: “No thermal roughness length parameterization is included in the current version of this scheme. A Charnock relation relates roughness length to friction velocity over water”.



**Figura 1.** Esquema inicial de acoplamiento océano-atmósfera entre modelos del sistema SPOA, visto desde el modelo atmosférico WRF.

Por razones de extensión del presente artículo no se comentan la configuración y modificaciones realizadas en el modelo atmosférico (microfísica, radiación, cúmulos para los subdominios de alta resolución, paso temporal) de cara a su integración en el sistema. Si bien hasta el momento, de acuerdo con los resultados obtenidos, no se ha visto la necesidad de cambiar el esquema que controla la física de la capa próxima atmosférica, basado en la teoría de la similitud de Monin-Obukhov y en funciones universales para los perfiles del viento, un estudio completo de sensibilidad del modelo atmosférico a diferentes combinaciones de esquemas de física, así como validaciones en casos particulares, deben ser realizados en el futuro para caracterizar mejor la transmisión de impulso y demás flujos de intercambio en la frontera entre aire y agua.

Para introducir la longitud de rugosidad  $z_0$  desde el modelo de olas CARIBWAM, tal como se esquematiza en la Figura 1, se realizaron modificaciones al código fuente de WRF en los módulos que controlan la física de la superficie, modificaciones que han sido descritas con detalle en los informes finales que sustentan la consolidación del sistema [10, 11].

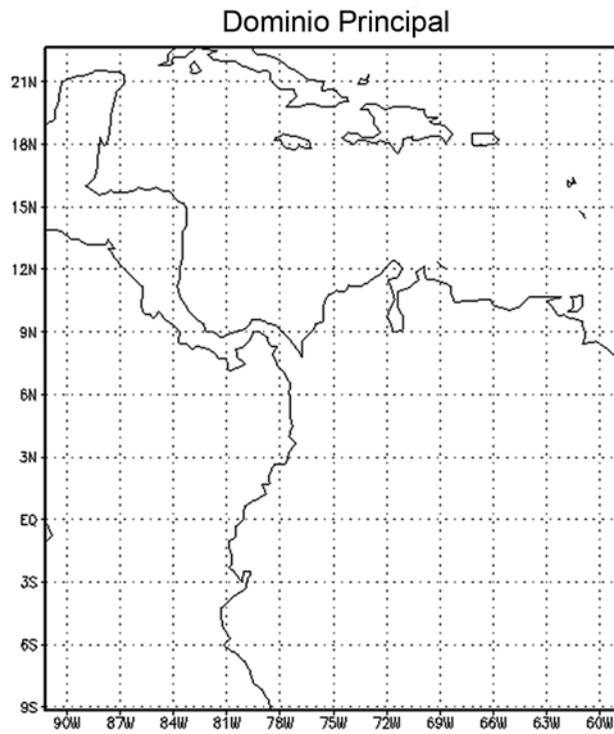
Para el acople de la temperatura superficial del mar que WRF deberá recibir de sbPOM (Figura 1) se ha modificado el programa selector del módulo

de superficie, `module_surface_driver.F`. Todas las modificaciones hechas han sido compiladas con éxito en el ambiente distribuido y el modelo ha sido recompilado en consecuencia, modificando además su registro para la inclusión y escritura de las nuevas variables definidas.

El acople con sbPOM, a través de la temperatura de la superficie del mar, se realiza una sola vez antes de la corrida de WRF. El acople con CARIBWAM se realiza durante el procesamiento de WRF, de manera que CARIBWAM se ejecuta varias veces durante la ejecución de WRF. En consecuencia, hay que esperar un aumento en el tiempo de cómputo en el dominio principal de cálculo en el mar Caribe (6 km de resolución), con respecto a los tiempos de cómputo sin el acople (alrededor de 105 minutos para un pronóstico de 120 horas).

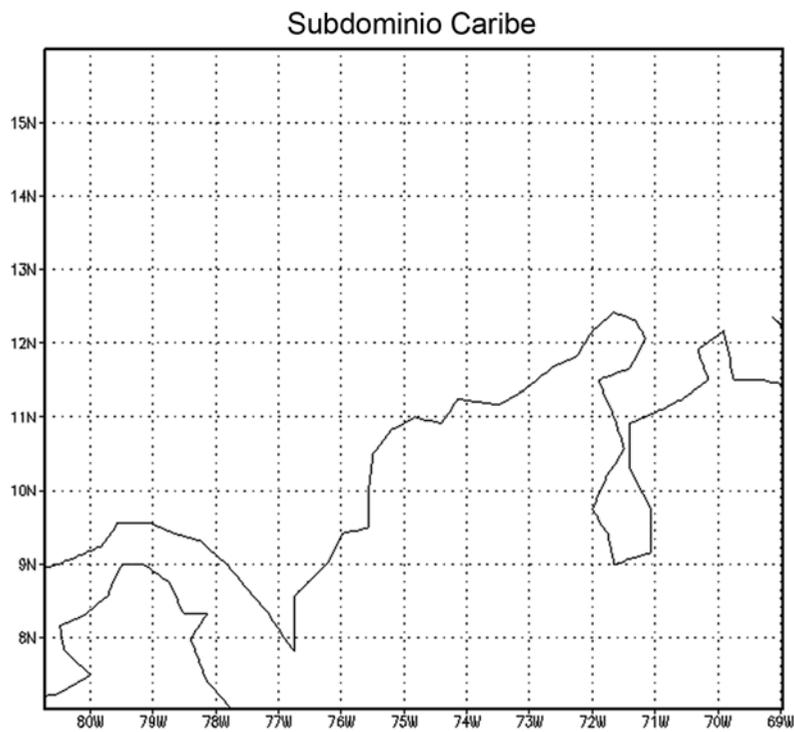
## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En vista de que los tres modelos, oceánico, atmosférico y de oleaje tienen mallas de diferente cobertura, fue necesario para efectos de un buen acople, definir un solo dominio en WRF para todo el Caribe con un paso espacial de 6 km y 459 x 203 nodos, en lugar de emplear los dominios anidados (uno principal de 18 km, 198 x 198 nodos; y uno anidado de 6 km, de 217 x 169 nodos) que se venían utilizando (Figura 2).



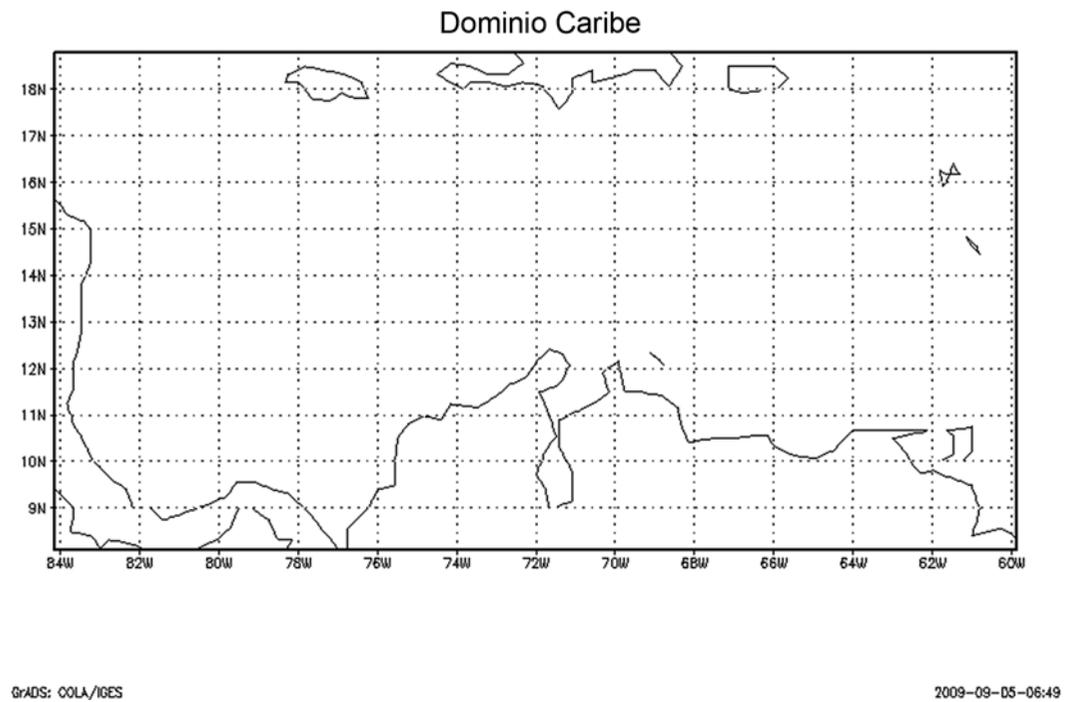
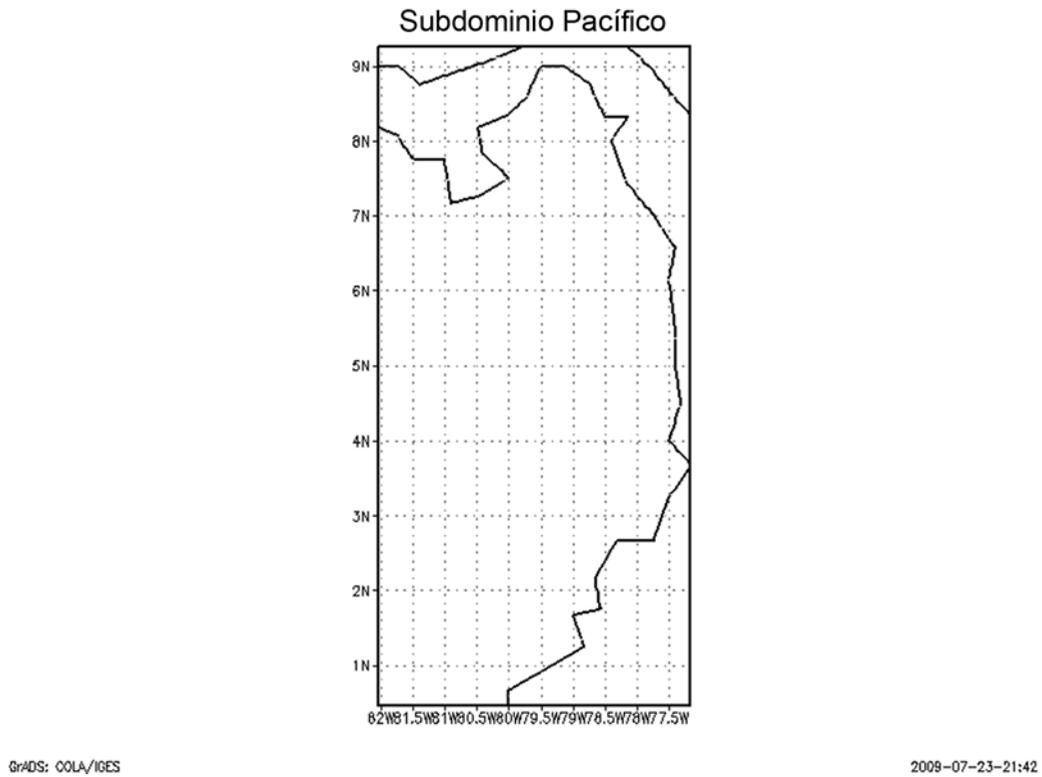
GrADS: COLA/IGES

2008-09-05-20:37



GrADS: COLA/IGES

2008-09-05-20:42



**Figura 2.** Arriba: dominio principal (18 km, 198 x 198 nodos) y subdominios Caribe (6 km, 217 x 169 nodos) y Pacífico (6 km, 97 x 113 nodos) utilizados hasta septiembre de 2009. Abajo: nueva malla Caribe (6 km, 459 x 203 nodos) la malla del Pacífico se mantiene.

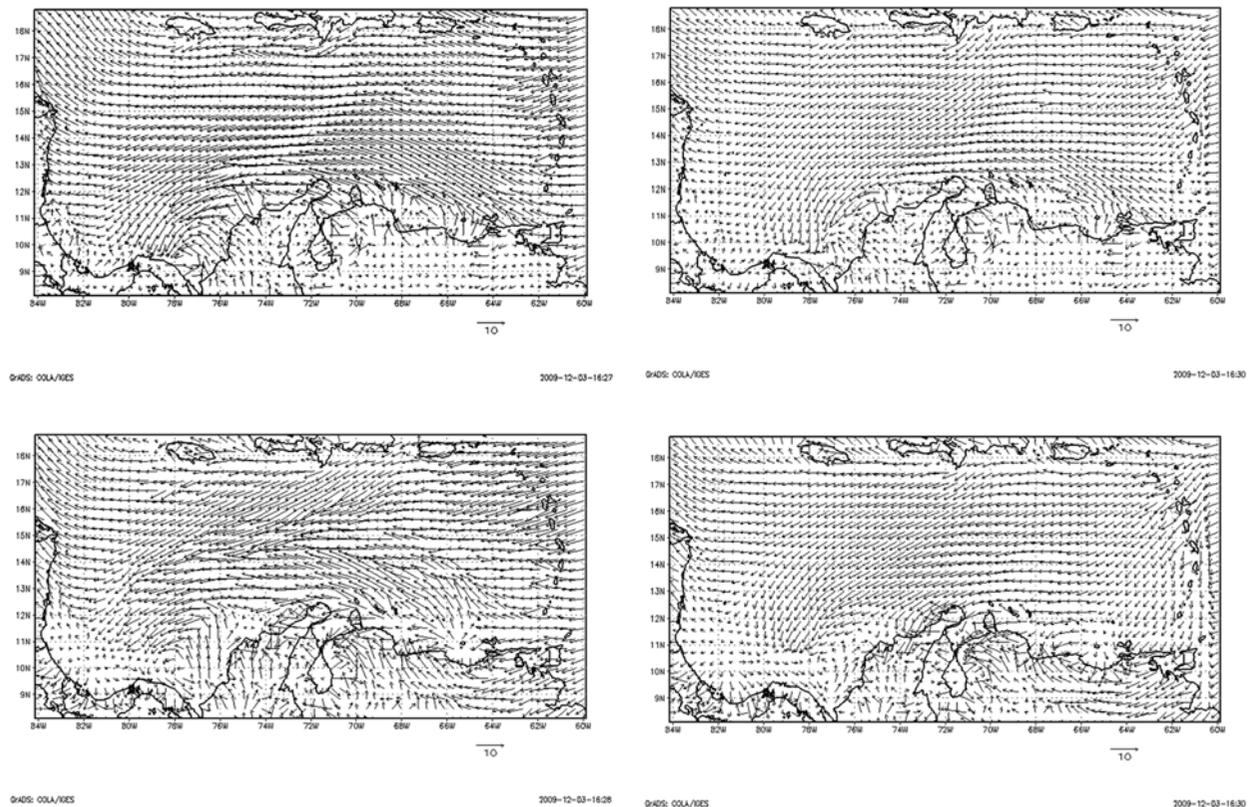
Esta nueva malla (paso espacial de 6 km, topografía de 4 km, paso temporal de integración de 24 s, 459 x 203 nodos de cálculo, condiciones iniciales tomadas del modelo global *Global Forecast System* -GFS- cada 6 horas y 0.5° de resolución espacial) se acopla más apropiadamente con la de sbPOM, sin necesidad de procedimientos adicionales de interpolación/extrapolación de los campos, evitándose así la aparición de "frentes" térmicos dentro del modelo atmosférico. Para la nueva malla los tiempos de cómputo para un pronóstico de 120 horas con toda la capacidad de cómputo (cluster 5 nodos HP DL360G5, 40 CPUs Intel Xeon Quad 1.60GHz, 20GB RAM, 292 GFLOPS) son cercanos a los 120 minutos.

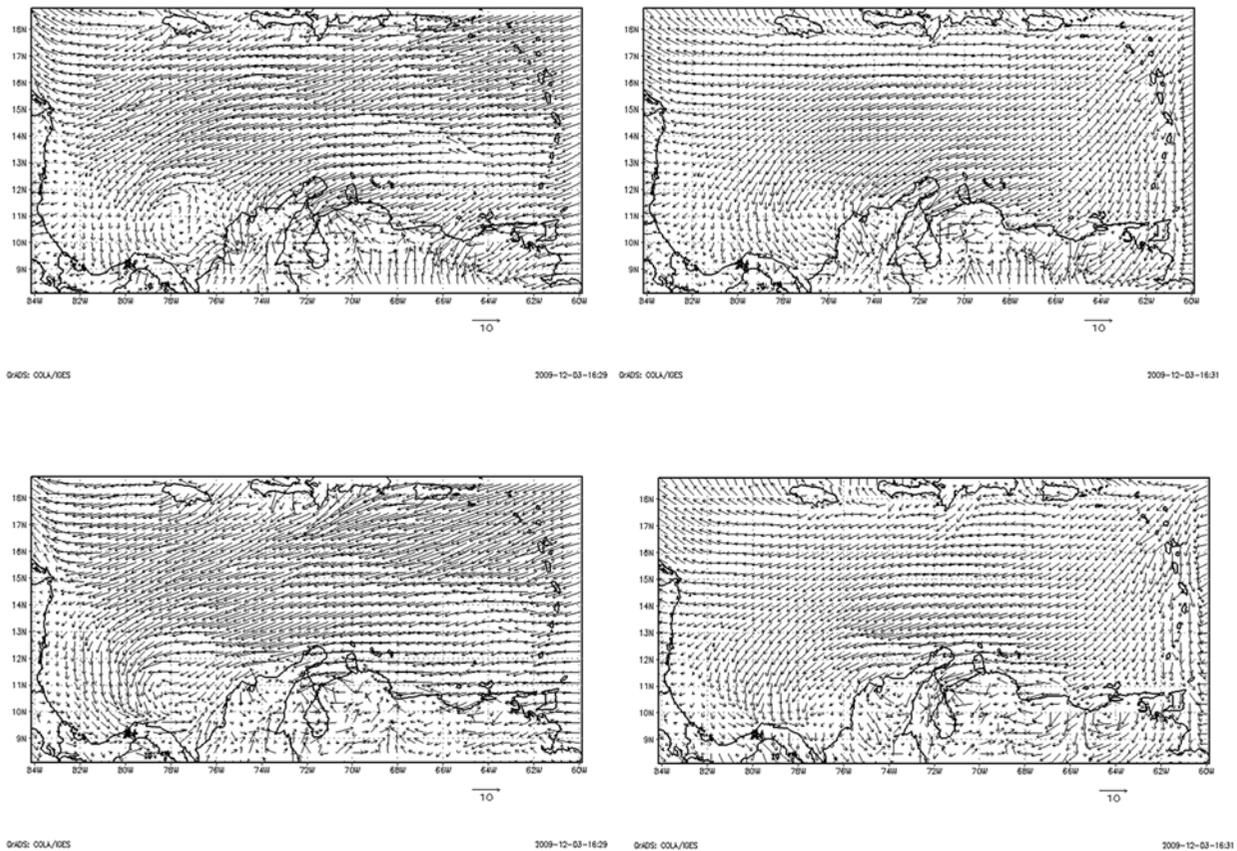
Asimismo se definió una malla nueva para el Pacífico, con resolución de 6 km, idéntica a la del subdominio existente (97 x 160 nodos), con un tiempo de cómputo de alrededor de 50 minutos para 120 horas de pronóstico. Actualmente, esta malla no está en operación.

Tal como se afirmó en la definición del esquema inicial de acople, en lugar de la climatología usada normalmente por el modelo atmosférico, se introduce un campo de temperatura de la superficie del mar procedente del modelo oceánico, el cual es

un campo diario con asimilación satelital (radiómetro AVHRR). El nuevo campo de temperatura es más preciso que el campo climatológico, mejora que también puede ser corroborada por sus efectos sobre el comportamiento de otras variables meteorológicas. En diferentes escenarios operativos se ha comparado el desempeño del sistema con y sin acople con mediciones de viento, resultando evidente el efecto positivo. Es aceptable "congelar" el campo de temperatura de la superficie del mar durante el período de pronóstico a corto plazo, debido a que la termodinámica del agua es más lenta en comparación con el aire. Sin embargo, se considera que esta suposición es válida para las escalas regionales (Figura 2), mientras que los efectos locales (como vendavales de corta duración en la bahía de Cartagena) en el caso de pronósticos detallados, deben omitir dicha aproximación, empleando los modelos hidrodinámicos locales con acople instantáneo de los modelos.

El efecto del acople entre WRF y sbPOM, a través de la temperatura de la superficie marina producida por este último, se puede ver en las secuencias de velocidad y dirección de los vientos en superficie pronosticados a lo largo de 24 horas por WRF (Figura 3), con (derecha) y sin acople (izquierda).



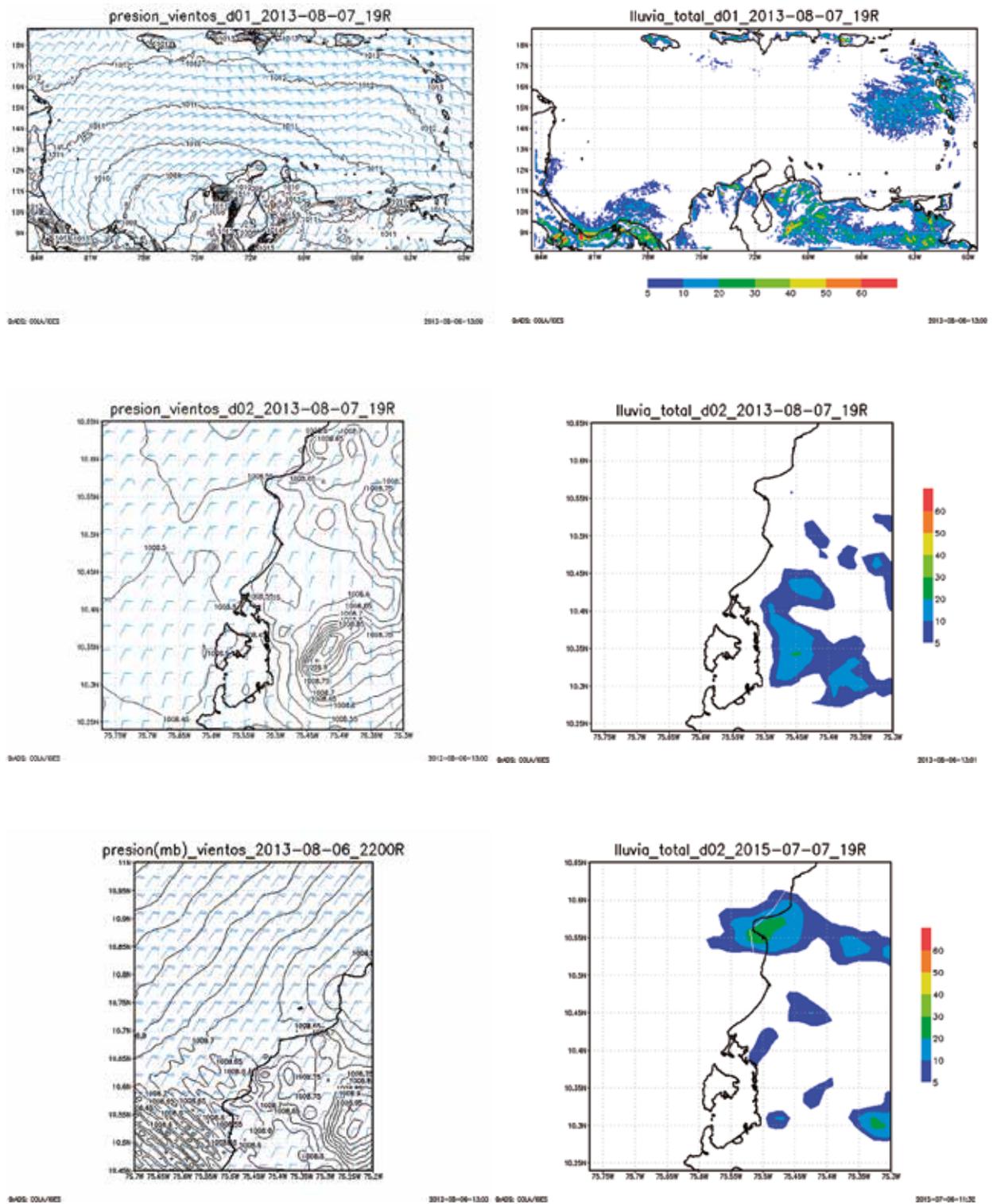


**Figura 3.** Efecto del acople entre WRF y sbPOM a través de la temperatura de la superficie marina en la dirección y velocidad de los vientos en superficie, pronosticados cada 6 horas para el 27 de septiembre de 2009 (panel izquierdo: solo WRF; panel derecho: WRF acoplado con sbPOM. La flecha en las figuras da la escala y corresponde a 10 m/s).

En las actuales condiciones de supercomputación del CIOH, el tiempo de cómputo para los tres modelos que integran el sistema SPOA es de aproximadamente 8 horas (de las cuales, una es para la descarga diaria de datos y cinco más para el cómputo de WRF, el modelo más exigente), tiempo que puede mejorar de manera significativa en un futuro cercano con el crecimiento de los recursos de cómputo a disposición y con la incorporación de mejoras de optimización en cada uno de los modelos numéricos.

En el sitio <http://www.cioh.org.co/meteorologia/>, bajo los enlaces 'Modelación y Productos', se encuentran publicados diariamente algunos de los productos gráficos

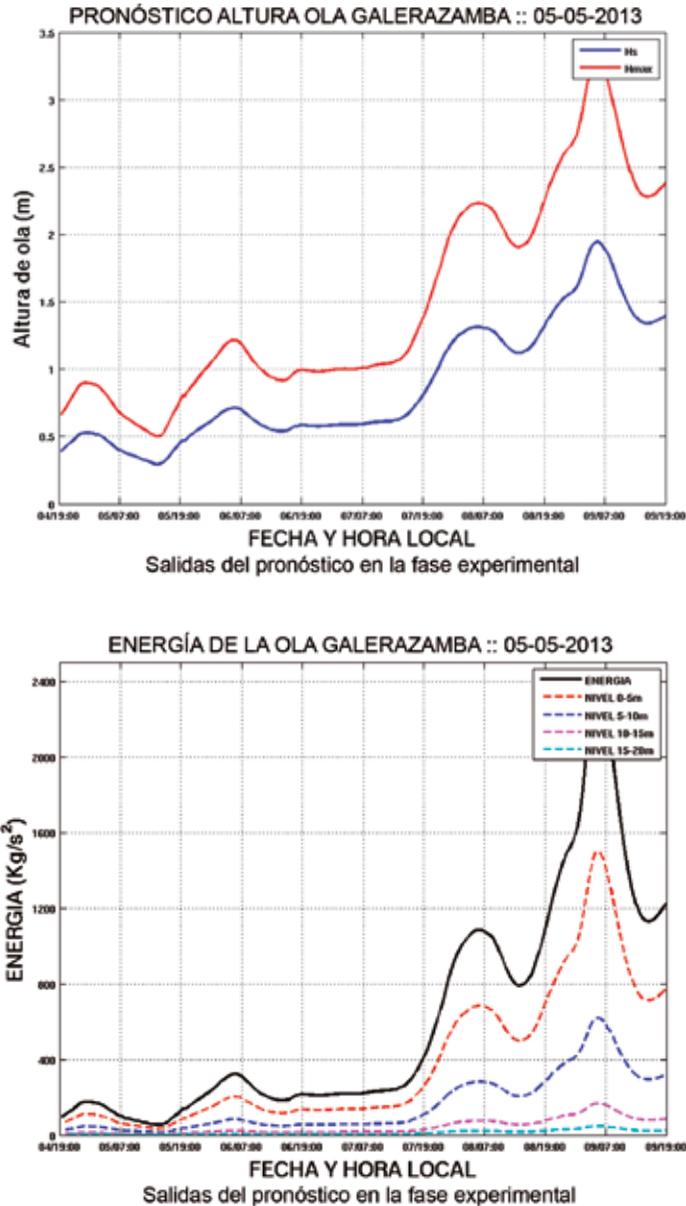
producidos por el sistema. A la medida de este proceso constructivo del sitio web y de afinamiento de los componentes del sistema, han aparecido en él otros productos de interés público sobre los pronósticos del océano y la atmósfera. Actualmente, además del pronóstico para el Caribe, se tiene un pronóstico también a 120 horas para Cartagena y sus alrededores, así como para el proyecto de exploración de Galerazamba, desarrollado por Equión al norte de Cartagena. En la Figura 4 se presentan imágenes para cada una de estos subdominios (que se computan como dominios anidados dentro de WRF) y cubren una completa gama de las variables atmosféricas y oceánicas (por limitaciones de extensión del texto, se presentan sólo algunos ejemplos).



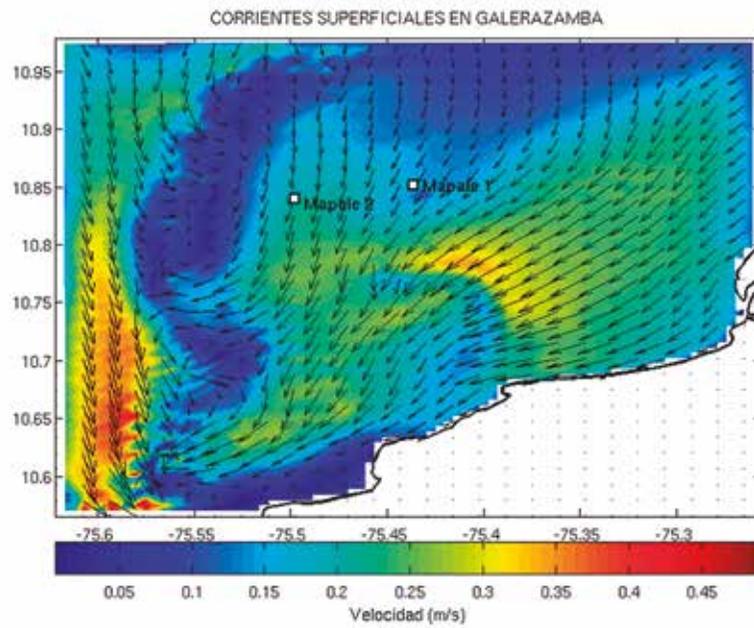
**Figura 4.** Algunas imágenes del pronóstico meteorológico en el sistema SPOA para el mar Caribe (Arriba, panel izquierdo: presión y vientos en superficie), Cartagena (centro; ídem) y Galerazamba (abajo: ídem).

Para el caso específico de Galerazamba están disponibles otros productos, mostrados en la Figura 5, como la altura de ola y energía de olas en el tiempo, en el punto de exploración de la plataforma. Dichos productos pueden adaptarse a la necesidad de la industria petrolera de manera puntual, pero también a otras industrias y entidades territoriales.

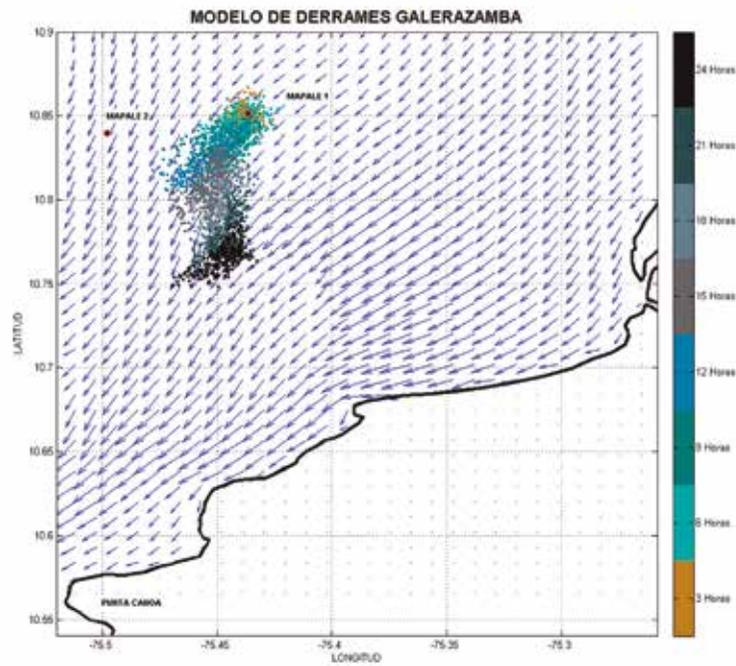
Las figuras 6 y 7 muestran ejemplos de pronóstico de las corrientes y derrames de hidrocarburos en los bloques de exploración de gas Mapalé-1 y Mapalé-2. Es de mencionar que con el fin de brindar un servicio operacional, el cálculo de derrames hipotéticos se ejecuta diariamente, junto con el resto de procesos de pronóstico meteorológico. El resultado se guarda sin publicar para disponerlo de manera rápida en el caso de un siniestro.



**Figura 5.** Comportamiento en el tiempo de la altura de ola (arriba: Hs–altura significativa; Hmax–altura máxima) y de la energía de olas (abajo: total y en distintos niveles).



**Figura 6.** Corrientes superficiales pronosticadas en el área de Galerazamba.



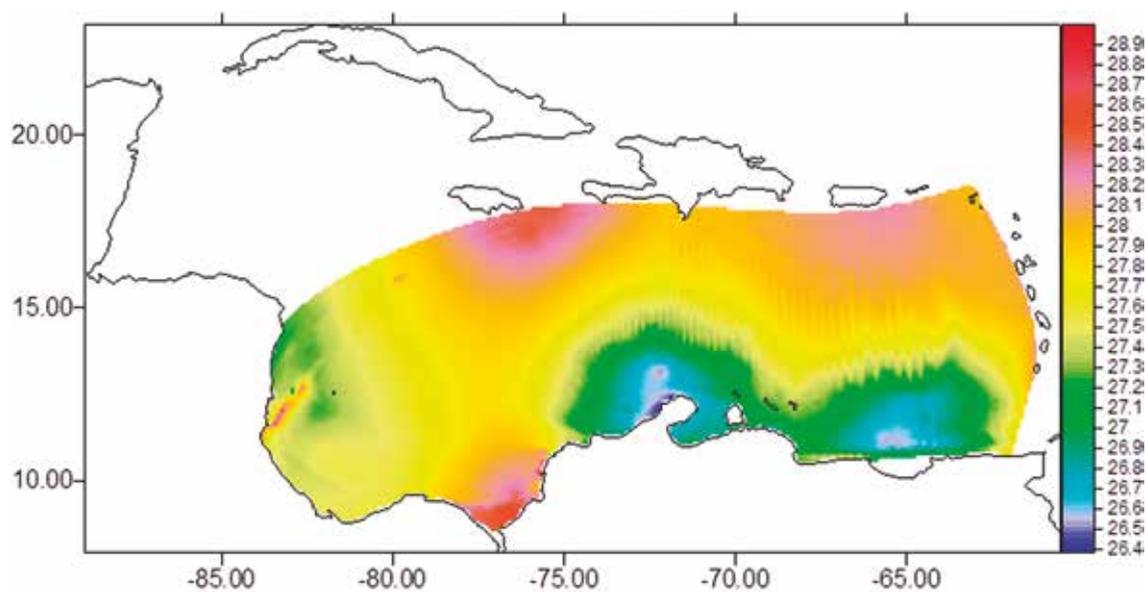
**Figura 7.** Corrientes superficiales y pronóstico de un derrame hipotético en el punto de exploración de gas Mapalé-1. Los colores muestran la posición de la mancha de hidrocarburos en distintos momentos de tiempo.

## CONCLUSIONES

El sistema integrado de predicción del océano y la atmósfera SPOA, resultado del acople entre modelos numéricos del océano, las olas y la atmósfera, opera de manera estable diariamente en el CIOH, produciendo una vasta gama de productos de escala regional (mar Caribe) y local (Cartagena y Galerazamba). El sistema no sólo es útil para el pronóstico Meteomarino, también es un laboratorio para la investigación de fenómenos nuevos y extremos, y para la reconstrucción y análisis de series históricas (mediante técnicas de reducción de escala) necesarias en la consolidación de nuevas climatologías regionales. El sistema requiere actualmente la destinación

de recursos para realizar nuevos desarrollos, y para satisfacer las demandas de información de sus usuarios.

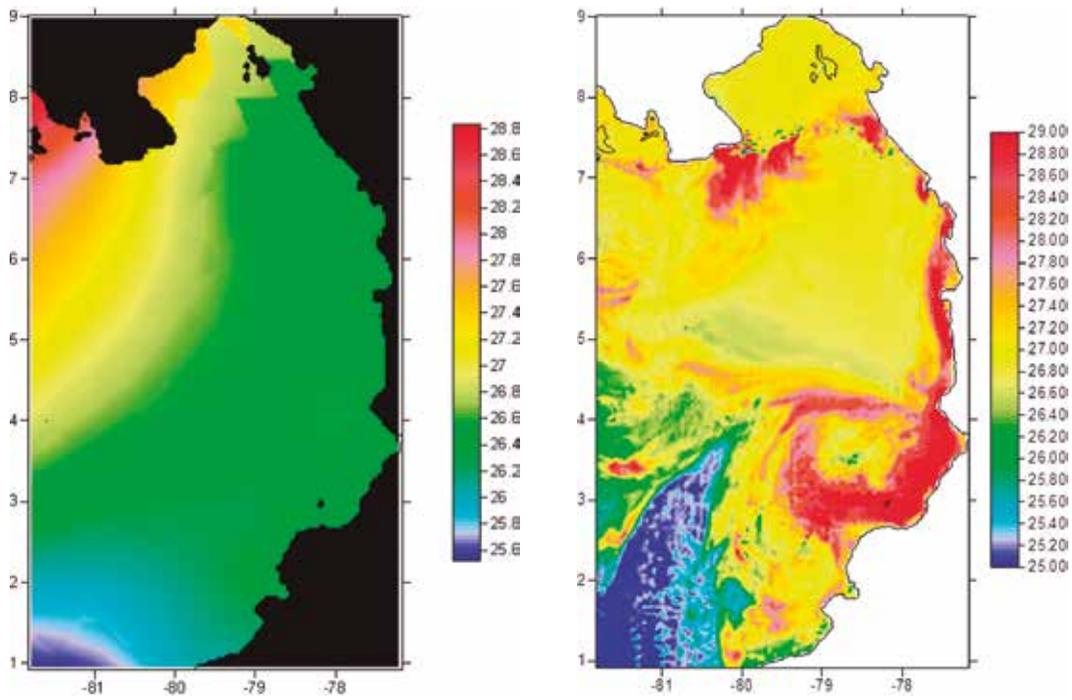
Existen nuevos horizontes en el desarrollo del sistema y su implementación en las ramas tales como la pesquería, operaciones navales y ecosistemas marinos. La Figura 8 muestra un ejemplo de la temperatura de la superficie del mar, producto del sistema luego de asimilación de datos satelitales en el modelo hidrodinámico. Esta información puede ayudar a monitorear los cardúmenes para la pesca industrial y la información sobre la temperatura en tres dimensiones permite calcular los canales de sonido para los asuntos de hidroacústica civil y militar.



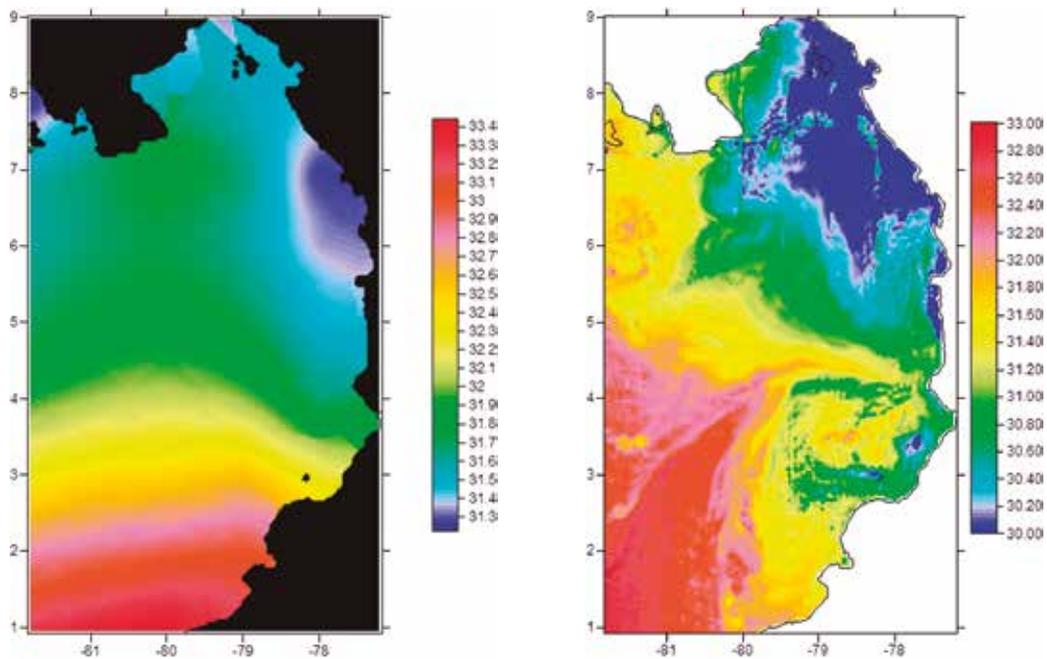
**Figura 8.** Ejemplo de producto gráfico, mostrando la temperatura superficial del mar.

La región del Pacífico no se encuentra en la operación del sistema SPOA actualmente, aunque el sistema fue creado con el propósito de mantener ambas costas de Colombia con el pronóstico operacional. En las figuras 9 y 10 se demuestra la restitución de los campos de temperatura y

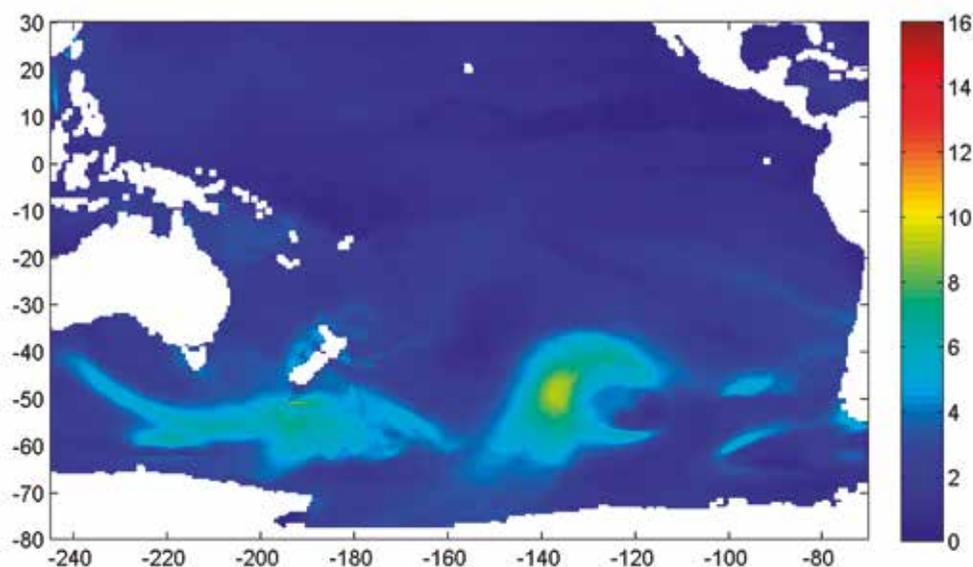
salinidad en la superficie con base en la climatología de baja resolución de 1° de latitud [12] hasta 0.04° en el modelo. La Figura 11 presenta un ejemplo de pronóstico diario del oleaje en una extensa malla del Pacífico, teniendo en cuenta el desarrollo de olas de mar de fondo de origen lejano [13].



**Figura 9.** Comparación entre la temperatura superficial del mar, interpolada de los datos de WOA-2001 (Izq.) y calculada por el modelo (Der.).



**Figura 10.** Comparación entre la salinidad superficial del mar, interpolada de los datos de WOA-2001 (Izq.) y calculada por el modelo (Der.).



**Figura 11.** Campo de oleaje (altura significativa en metros) para el dominio del Pacífico.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue elaborado bajo la financiación de la Dirección General Marítima (Dimar) en el proyecto 'Implementación de un Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos a Escala Local en el Caribe y Pacífico Colombianos (años 2007-2010)' y el convenio de cooperación Dimar-Equión Energía Ltda. (años 2012-2013).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lonin S. Implementación de un sistema de pronósticos oceánicos y atmosféricos a escala local en el Caribe y Pacífico colombianos- SPOA, fase 3, Informe Final, Oceanmet Ltda; 2009.
- [2] Mellor GL. User's Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation Numerical Ocean Model. Princeton, NJ, 35 pp.; 1993.
- [3] Lonin SA, Lonina IE, Tuchkovenko YuS. Utilización del Modelo NedWaM para el cálculo y pronóstico del oleaje en el mar Caribe. Bol. Cient. CIOH 1996;17:37-46.
- [4] Lonin S, Torres R, Lonina I. Propagación del oleaje y asimilación de datos satelitales en el modelo NedWaM (versión CIOH). Bol. Cient. CIOH 2007;25:32-44.
- [5] Skamarock W, Klemp J, Dudhia J, Gill D, Barker D, Duda M, Huang X, Wang W, Powers J. *A description of the advanced research WRF version 3*, NCAR/TN-475+STR (última actualización: enero 2007), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR, Boulder, Colorado, USA; 2007.
- [6] Anduckia J, Lonin S, Ivanov S. Asimilación de datos de temperatura superficial del mar en el modelo de pronóstico de las condiciones oceanográficas del mar Caribe, Bol. Cient CIOH 2003;21:38-50.
- [7] Anduckia, JC, Lonin, SA, Molares RJ, Parra, CA. Validación de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar mediante observaciones in situ. Bol. Cient. CIOH 2003;21:28-37.
- [8] CIOH: [www.cioh.org.co](http://www.cioh.org.co)
- [9] Lonin S, Linero J. Parametrización de rugosidad de la superficie del mar bajo la inestabilidad de la capa próxima y la edad del oleaje. Bol. Cient. CIOH 2009; 27: 22-28.

- [10] Oceanmet Ltda. Manuales técnicos y de procedimientos. Proyecto SPOA, Cartagena; 2010.
- [11] Oceanmet Ltda. Implementación de un Sistema de Pronósticos Oceánicos y Atmosféricos a escala local en el Caribe y Pacífico colombianos. Informe técnico. Cartagena: 2010.
- [12] Levitus S. *World Ocean Atlas 2001, NOAA Atlas NESDIS 54, Silver Spring, MD.*; 2001.
- [13] Leonardo Marriaga. Comunicación personal; 2013.