



## PRONOSTICO DEL VIENTO EN EL MAR CARIBE A PARTIR DE LOS MODELOS MM5 Y UKMO

### >> Resumen

### >> Abstract

SERGUEI A. LONIN

LUIS A. LÓPEZ

CENTRO DE  
INVESTIGACIONES  
OCEANOGRÁFICAS E  
HIDROGRÁFICAS CIOH  
Cartagena

**E**n el marco del proyecto de investigación científica, “Validación y operacionalización de un modelo circulación oceánica aplicado a operaciones navales de búsqueda y rescate”, desarrollado en el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Armada de Colombia), fue necesario determinar la precisión de los datos de entrada al modelo.

El grado de confianza de los productos de pronóstico del modelo UKMO (*United Kingdom Meteorological Office*) se estudia con base en comparaciones entre las salidas de este modelo y el MM5, empleado en el IDEAM, al igual que con datos de observaciones de campo, disponibles de los dos cruceros oceanográficos realizados durante el año 2003 en el mar Caribe.

El parámetro analizado es el viento, como principal factor que influye sobre el desplazamiento de las manchas de hidrocarburo y artefactos flotantes en el mar. Se determina cual es el error del análisis objetivo con respecto a la predicción a corto plazo, el error absoluto del pronóstico de viento y qué consecuencias puede tener dicho error, en términos cuantitativos, en el manejo operativo de un sistema de pronóstico de los parámetros oceanográficos para todo el mar Caribe.

**D**uring the scientific project “Validation of the ocean circulation model applied to Search and Rescue operations”, developed by the Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (Colombian Navy) is necessary to check the accuracy of the input data.

The degree of confidence of the products of the UKMO forecast model (*United Kingdom Meteorological Office*) is studied through comparisons between the output fields of both, this model and MM5 model, used in Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), as well as with the field observations available from two oceanographic cruises carried out during 2003 in the Caribbean Sea.

The analyzed parameter is the wind, being a main factor that affects the oil slick fate and floatable artifacts' motion at sea. The objective analysis error with respect to the short-term prediction, the absolute error of the wind forecast and what quantitative consequences this error may produce on the operative use of a forecast oceanographic system for the entire Caribbean are determined.

CIOH

[www.cioh.org.co](http://www.cioh.org.co)

## >> Introducción

Dentro del proyecto de investigación “Validación y Operacionalización del Modelo Numérico de Búsqueda y Rescate, CODEGO y PROPAS en las Unidades de la Armada Nacional” se desarrolla un sistema de predicción de los parámetros oceanográficos (Lonin, *et al.*, 2003), basado en el uso del modelo POM (*Princeton Ocean Model*; Mellor, 1993). El sistema está orientado para el pronóstico en todo el mar Caribe (excepto la Cuenca de Caimán) con una mayor resolución (hasta de 2-5 km) en aguas marítimas colombianas.

Los pronósticos de la deriva de los artefactos flotantes y las manchas de hidrocarburo derramado en el mar son unas de las principales tareas del proyecto. El conocimiento de las corrientes superficiales y el abatimiento de los objetos flotantes depende, en primer lugar, de la exactitud del pronóstico de los vientos. Actualmente, con este fin se utiliza la información del modelo global de UKMO, que está transmitiendo esta y otra información meteorológica vía Internet al CIOH.

Para evaluar el error que puede ocurrir en el pronóstico de desplazamiento de los objetos (sustancias) en el mar, se requiere tener en cuenta los errores producidos tanto por el modelo oceánico, como los de su entrada. La comparación oportuna con los datos de mediciones y otros modelos es la única manera de averiguar el grado de confianza al producto que sirve en calidad de entrada para el modelo oceánico.

El objetivo de este trabajo es una comparación entre los pronósticos del viento sobre el mar Caribe, efectuados por los modelos numéricos UKMO y MM5. El segundo fue empleado en el IDEAM y, junto con los datos de observaciones de los cruceros oceanográficos, hace posible una estimación de la calidad de esta información. El trabajo está organizado de la siguiente manera: en el próximo apartado se mencionan las fuentes de información utilizada, luego se habla de la precisión del análisis objetivo del modelo UKMO con respecto al error total del pronóstico; después se trata de la comparación entre los modelos UKMO y Mm5.

## >> Fuentes de Información

Las salidas de los modelos UKMO y MM5, mencionados en la Introducción, fueron utilizadas.

El modelo UKMO es un modelo global, con una resolución espacial de  $0.56^\circ \times 0.83^\circ$  y sus resultados están disponibles con una discretización de 6 horas, desde 0 hasta 120 horas (5 días de pronóstico). El modelo tiene dos arranques diarios: a las 00 GMT y 12 GMT, empezando de un análisis objetivo de los campos meteorológicos.

Por lo tanto, se puede comparar la calidad del pronóstico con respecto a un diagnóstico (error relativo o del análisis objetivo del modelo), lo que se describe en el próximo apartado.

El modelo MM5 es un modelo de mesoescala (MM5 v 3.0), el cual se corre diariamente (una vez al día) con información de superficie (estaciones meteorológicas de superficie, boyas, estaciones de altura del continente

americano Norte-Centro y SurAmérica) de las 00:00 GMT (en tiempo real), obtenida via ftp de un servidor de la NOAA. El MM5 hace pronóstico hasta de 48 horas, por períodos de tres horas: 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39, 42, 45 y 48 horas. Se puede apreciar en <http://mdk.ideam.gov.co>.

Las variables pronosticadas con el modelo MM5 son: temperatura de aire, precipitación convectiva y no convectiva acumulada, altura de la capa límite, flujos turbulentos de calor, flujo turbulento de impulso, radiación de onda larga y corta incidentes, presión atmosférica, agua de nube y de lluvia en todas las capas, componentes de viento, humedad de aire, campo geopotencial y otros parámetros derivados.

El MM5 es un modelo que permite el anidamiento múltiple. Para el caso se corrió con un anidamiento doble, con una resolución de 24 km para la malla gruesa y 8 km para la malla más fina. (Esta resolución cubre en toda su extensión el territorio colombiano).

El período de comparación entre las salidas del modelo fue escogido de acuerdo con las fechas del crucero ARC "Malpelo" entre 26 de marzo y 7 de abril de 2003 (crucero "Caribe-2003", aguas de la Guajira), en el cual fueron medidos los parámetros

meteorológicos con una discretización de tres horas aproximadamente, o más bien, en las estaciones oceanográficas espaciadas con un lapso de tiempo mencionado entre ellas. La velocidad de viento fue registrada en una altura de 4 metros sobre el nivel del mar. La intensidad fue medida con un anemómetro manual. La dirección fue tomada de una estación automática teniendo en cuenta la dirección de la deriva del buque. El medidor de la dirección fue ubicado en una altura de 15 metros, aproximadamente.

Los datos alternativos fueron utilizados para este análisis. Son provenientes del crucero estadounidense R/V "Seward Johnson", realizado en el mar Caribe a lo largo de la latitud de 13°N, aproximadamente. El crucero fue efectuado entre 25 de mayo y 6 de junio de 2003; el período de tiempo cuando el buque estaba en la zona de interés (60°W 85°W) se encuentra entre 26 de mayo y 31 de mayo de 2003. Las mediciones de viento en este crucero fueron tomadas por una estación automática con una discretización, en tiempo, de 2 segundos junto con los datos de los dos GPS y los demás parámetros meteorológicos. Para efectuar el análisis estos datos fueron promediados durante un período de 10 minutos filtrando así las perturbaciones de turbulencia en el aire.

## >> Análisis Objetivo de UKMO

Debido a que el pronóstico de UKMO, como fue mencionado arriba, para las horas 00 y 12 GMT corresponde a los momentos del análisis objetivo, entonces las horas +24, +48, +72, +96 y +120 del pronóstico van a corresponder al análisis de 00 horas GMT de cada respectivo día, y las horas +36, +60, +84 y +108 al análisis de 12 GMT de cada día. Si se recolecta esta información durante un lapso de tiempo estadísticamente representativo, se puede

comparar con la exactitud del pronóstico, considerándolo como una "extrapolación física" del estado presente hacia el futuro.

Esta comparación permite revelar el error neto del pronóstico ( $\epsilon_p$ ) con respecto al error del análisis objetivo ( $\epsilon_a$ ), cuya precisión se puede evaluar solamente con base en comparaciones con las observaciones. El error relativo (neto) del pronóstico ( $\epsilon_p$ ) indica la predictibilidad del sistema, mientras que el

error total es  $\varepsilon_T = \varepsilon_p + \varepsilon_a$  (aquí se supone que dichos errores tienen distinta naturaleza y, por lo tanto, no están correlacionados entre sí).

Un estimativo de  $O(\varepsilon_p/\varepsilon_T)$  y  $O(\varepsilon_a/\varepsilon_T)$  instantáneamente muestra si la predictabilidad del sistema es baja o los campos iniciales de los parámetros analizados no son representativos.

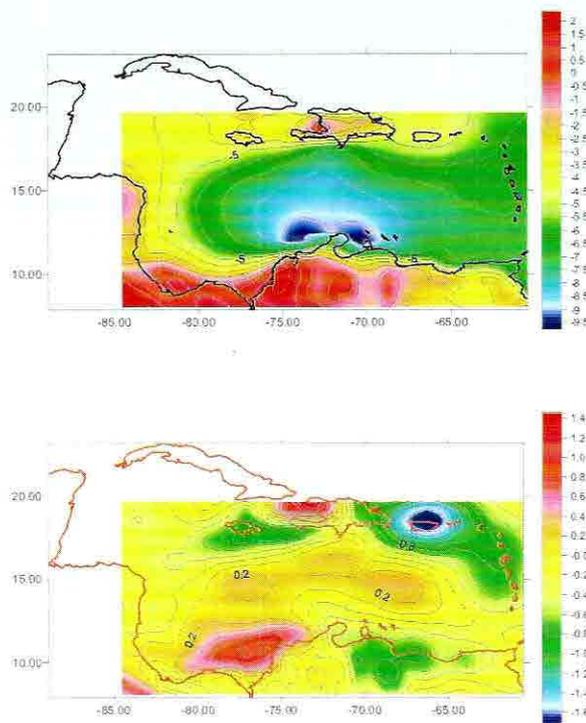
En calidad de parámetro analizado en este trabajo se escogió el viento (dirección e intensidad); en este apartado el análisis objetivo se tuvo en cuenta solamente para la hora 00 GMT y el lapso del pronóstico fue solamente hasta +24 horas.

La Figura 1 demuestra un campo promedio de la componente zonal de viento y una comparación “pronóstico - diagnóstico” para esta componente. La componente zonal de viento para el mar Caribe fue examinada por su predominancia en velocidad y la estabilidad en su dirección (vientos alisios).

Desde la Figura 1 se observa que:

- La mayor intensidad de los vientos se presenta en el mar cerca de la Península de la Guajira (hasta  $10 \text{ m s}^{-1}$  en promedio).
- El mayor grado de incertidumbre sobre el pronóstico de la componente zonal se presenta en la cuenca “Panamá-Colombia” (Golfo de Urabá, aproximadamente  $1 \text{ m s}^{-1}$  sobreestimando el diagnóstico).

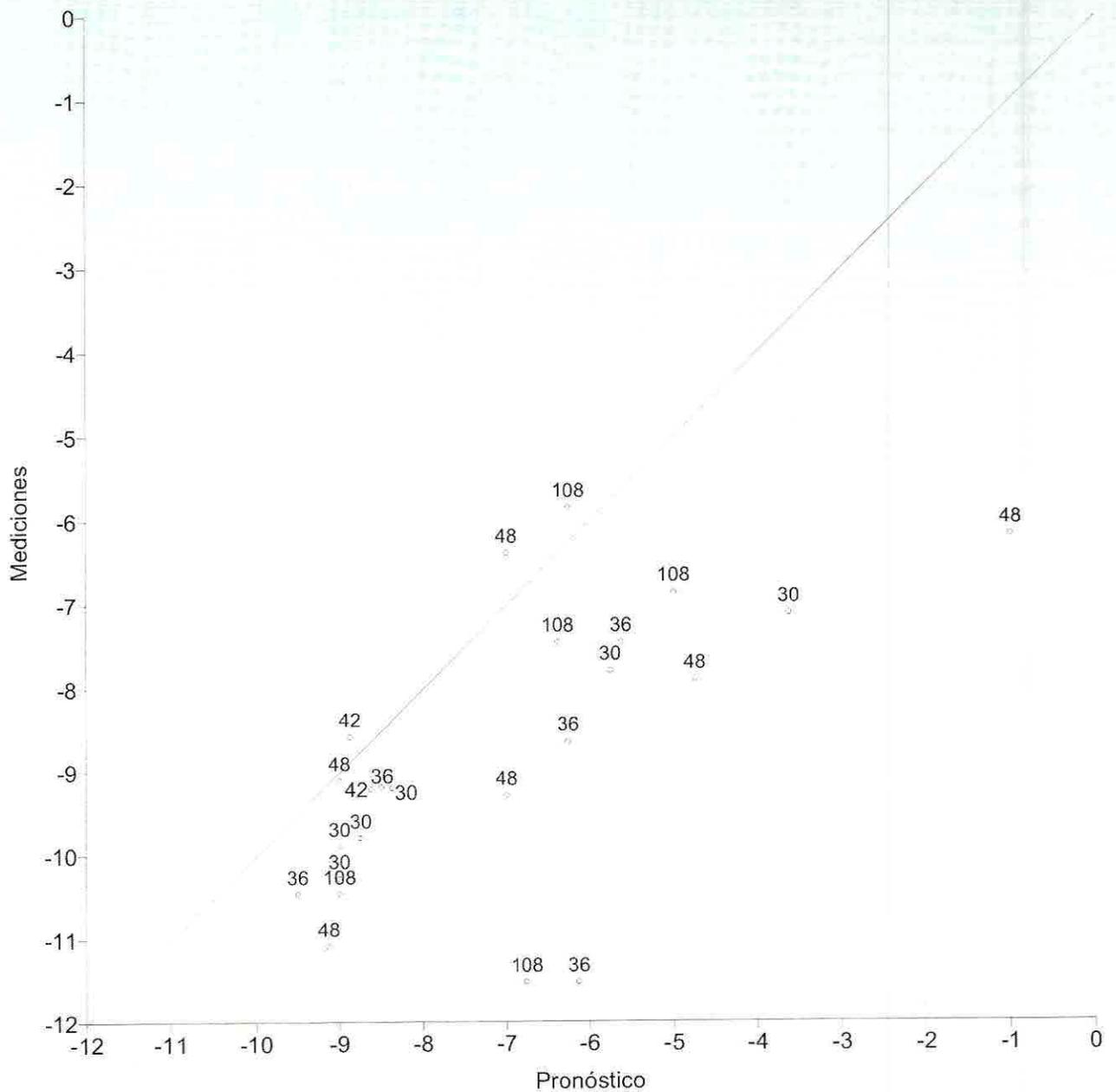
Lo observado indica que se tiene que esperar un mayor error del pronóstico de los vientos en la parte sur-occidental del mar, donde los vientos son usualmente débiles y variables en dirección; por otro lado, para una intensidad de  $5 \text{ m s}^{-1}$  en esta zona, el error máximo del pronóstico ( $\varepsilon_p$ ) es de 20%. En la mayor parte del mar Caribe, dicho error es relativamente bajo (menos de 5%).



**Figura 1.** Promedios de los datos de la UKMO durante los 41 días (01.11.02-11.12.02) de la componente zonal ( $U$ , en  $\text{m s}^{-1}$ ) del viento (arriba) y de las respectivas anomalías “pronóstico - diagnóstico” para las 24 horas (abajo).

El crucero oceanográfico a bordo R/V “Seward Johnson” tuvo un recorrido fuera de la zona crítica, donde, según la Figura 1, se observa un error relativo tolerante.

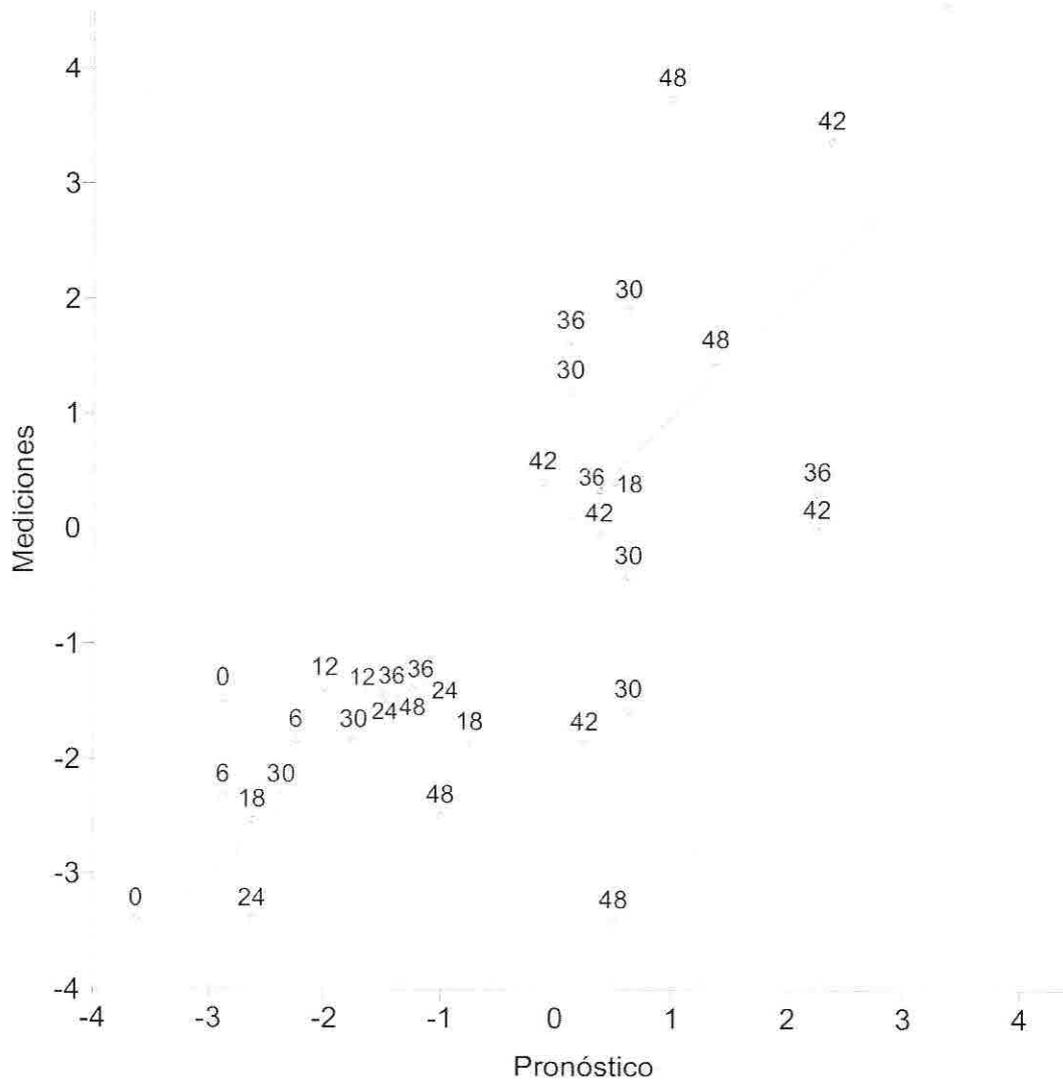
Las Figuras 2 y 3 muestran una comparación entre los vientos observados en el crucero y el pronóstico de UKMO. La Figura 2 indica que el error del pronóstico (para el caso dado es  $\varepsilon_T$ ) no depende aparentemente del lapso de tiempo desde su inicio. Por ejemplo, el pronóstico para la hora +30 puede tener el mismo orden del error como el de la hora +108.



**Figura 2.** Componente zonal (U) del viento. Comparación entre las mediciones de R/V “Seward Johnson” y el pronóstico de la UKMO durante el período entre 25 y 31 de mayo de 2003. Las cifras sobre los puntos indican la hora de pronóstico a partir de la hora del análisis objetivo de 00 GMT.

Además, desde la Figura 2 se observa que el pronóstico de UKMO subestima la intensidad del viento, caracterizándola a través de la componente zonal (U), como la más representativa. Ahora, la Figura 3 no está revelando ninguna tendencia, debido a que la componente meridional (V) tiene un comportamiento ondular, representando las perturbaciones del flujo zonal U.

En otras palabras, esto implica que las condiciones iniciales en el modelo contienen una inexactitud mayor de la que podría producir un pronóstico a corto plazo, considerado en este trabajo. Esta circunstancia provocó la necesidad de estudiar alternativas para disminuir el error entrante al modelo oceánico, lo que sugiere en principio usar el modelo regional MM5.



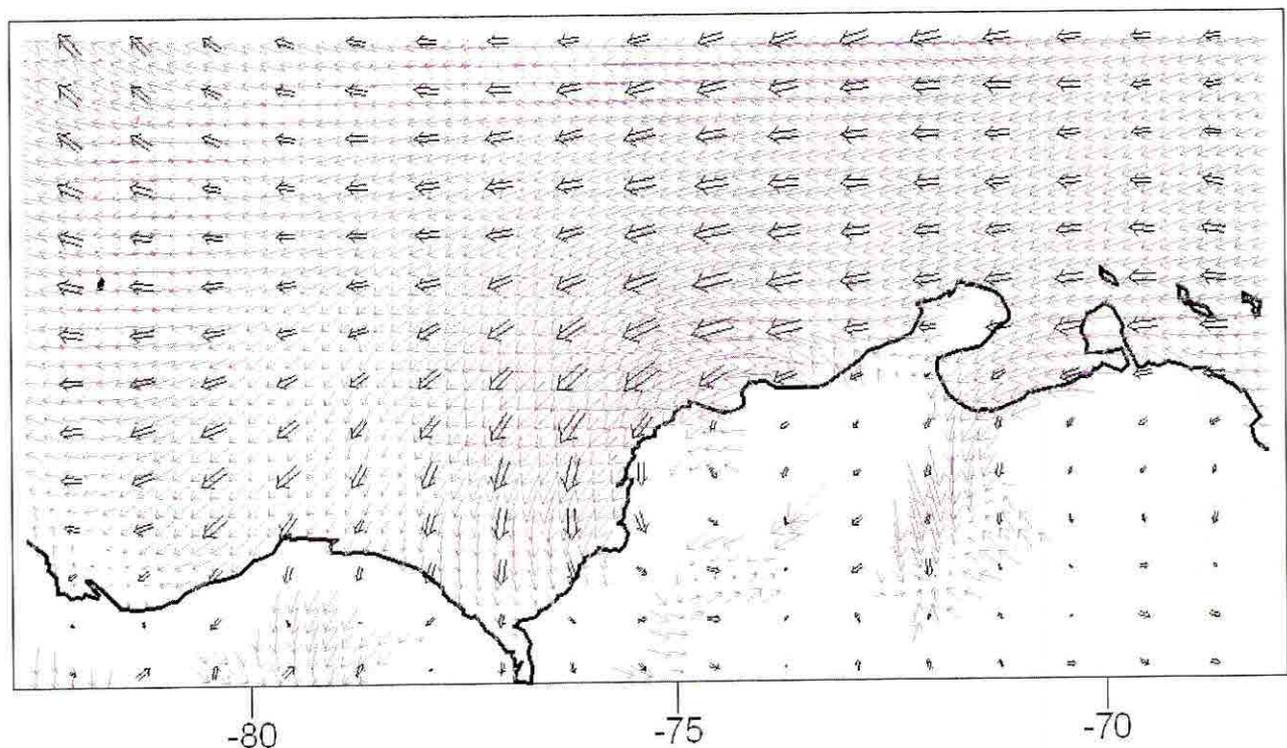
**Figura 3.** Componente meridional (V) del viento. Comparación entre las mediciones de R/V “Seward Johnson” y el pronóstico de la UKMO durante el período entre 25 y 31 de mayo de 2003. Las cifras sobre los puntos indican la hora de pronóstico a partir de la hora del análisis objetivo de 00 GMT.

## >> Análisis Comparativo

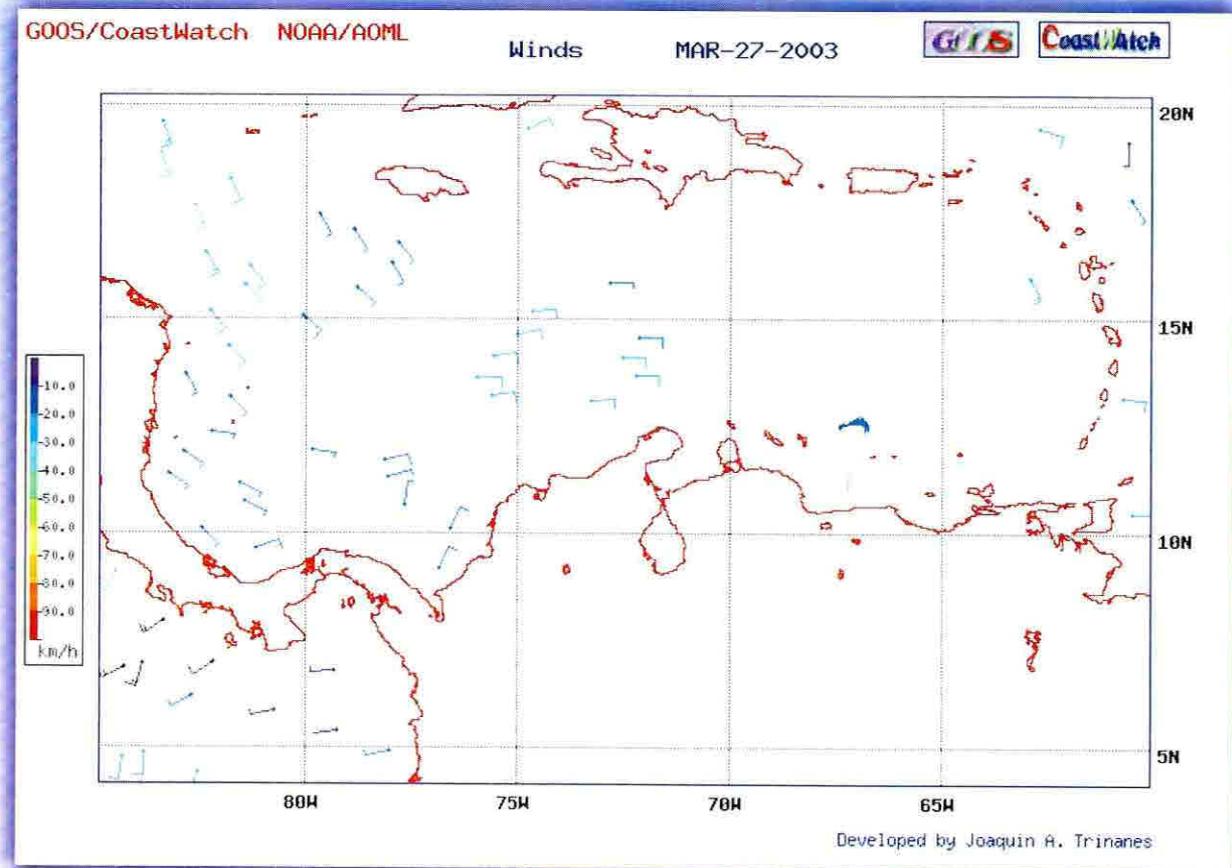
**E**l ejemplo de comparación visual de las salidas de ambos modelos se representa en la Figura 4. Las mediciones remotas de viento realizadas para la fecha dada se encuentran en la Figura 5.

La comparación visual destaca una diferencia entre los modelos y los datos de satélite. Aunque el modelo UKMO tiene una resolución más baja en comparación con el MM5, la dirección de viento sobre el mar frente a la Guajira es más coincidente entre el UKMO y el escaterómetro (flujo zonal;  $V \approx 0$ ). La dirección obtenida del MM5 difiere hasta

en 20-30° con una componente hacia el sur en este sector y puede relacionarse con un desfase en el paso de una onda atmosférica. No se aprecian otras diferencias significativas para el caso mostrado, pero se requiere un análisis cuantitativo, debido a que una diferencia advertida en forma visual puede provocar, de todos modos, un error significativo en la aplicación de estos datos. Desde la Figura 4 se observa también, que, en general, los vientos producidos por UKMO son de menor intensidad en comparación con los del Mm5.



**Figura 4.** Fragmento de comparación entre los campos de viento pronosticados por el modelo UKMO (flechas negras) y MM5 (moradas) para el día 27 de marzo de 2003 (hora +6 GMT).



**Figura 5.** Datos de los escaterómetros de la NOAA (CoastWatch) para el día 27 de marzo de 2003 (horas 00-12 GMT) provenientes de QSCAT y ERS-2.

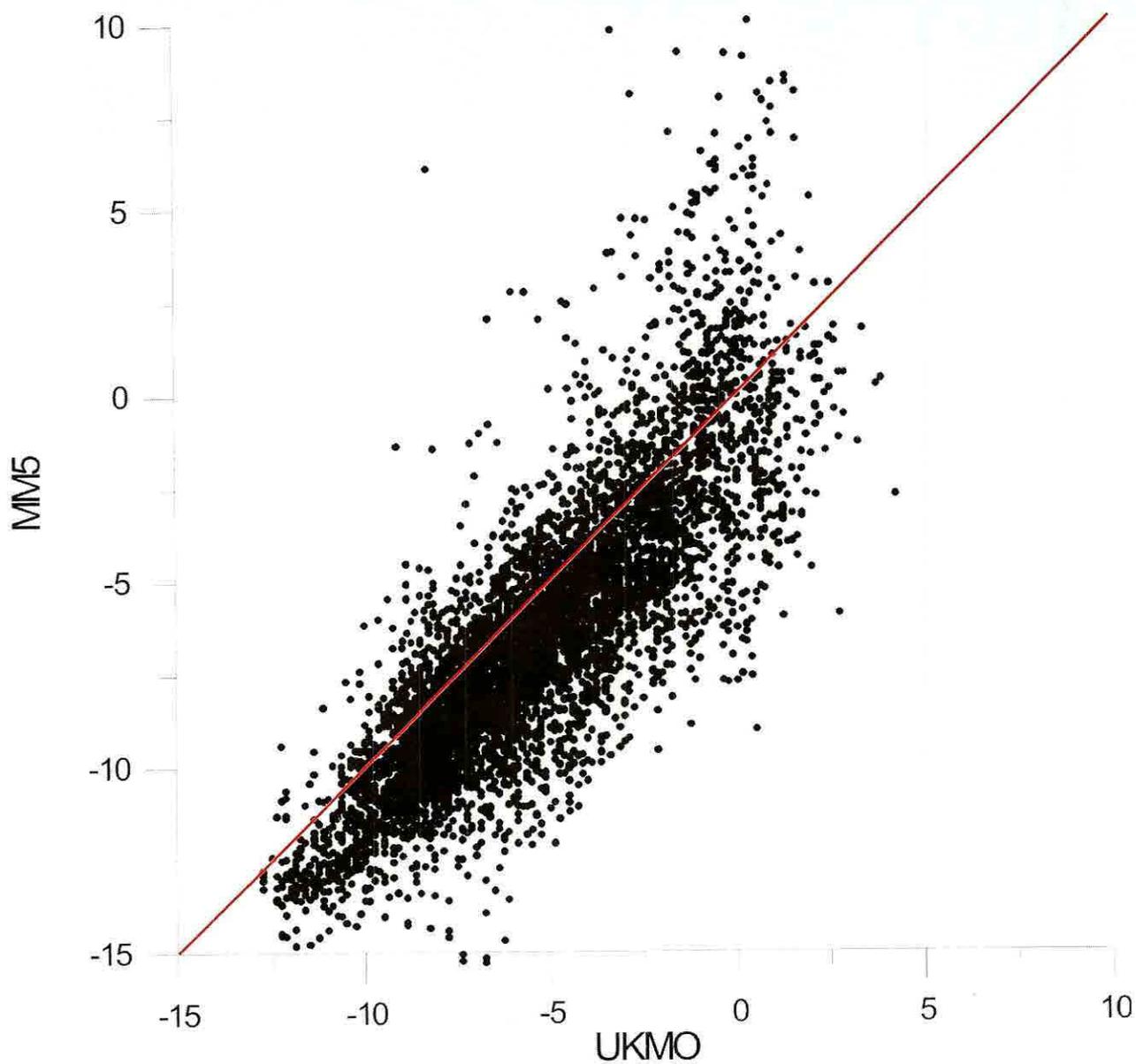
Las Figuras 6 y 7 muestran una comparación entre los modelos para un período de pronóstico de 18 días. Fueron comparados los resultados en los nodos de UKMO, teniendo en cuenta los nodos del MM5 que se encuentran ubicados no más allá de  $0.1^\circ$  de latitud.

La comparación demuestra lo siguiente:

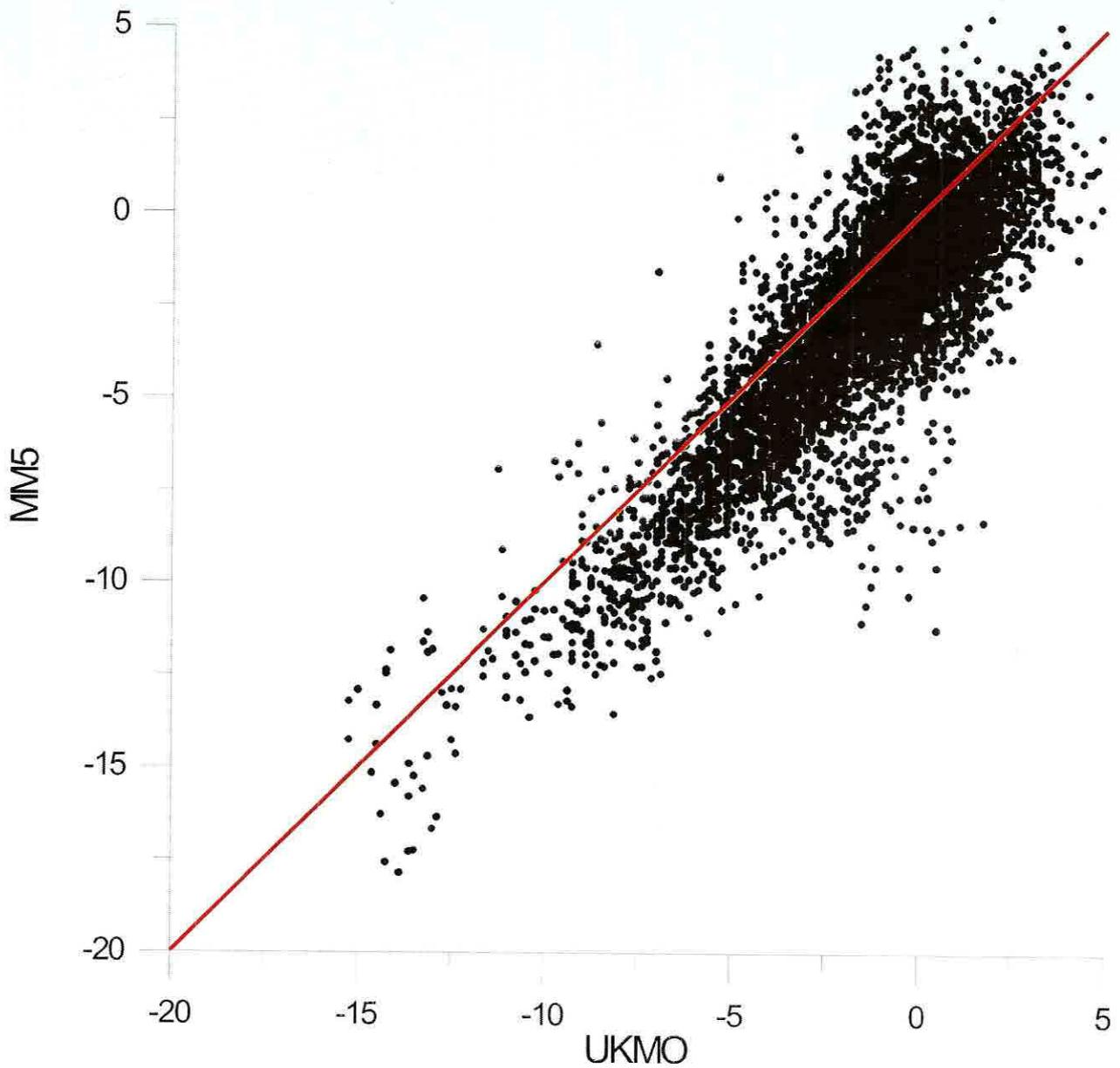
- Se nota una relación lineal la cual, para la componente zonal, se cumple cuando los vientos son del este, es decir, cuando  $U$  es negativa. Por el contrario, cuando en el modelo MM5 ocurre que  $U$  es positiva, el modelo UKMO no representa el caso.

- El modelo UKMO subestima la intensidad del viento. Esto último fue encontrado en la Figura 2 (comparación con los datos de mediciones) de donde se deduce que el modelo MM5 reproduce mejor la intensidad del viento. En promedio, la subestimación de la componente zonal de viento por el modelo UKMO llega a un 20-30 %.

- La componente meridional es relativamente débil; evidentemente esta componente es más pronunciada en la parte nor-occidental del dominio donde también se observa una subestimación por el UKMO.



**Figura 6.** Comparación entre los pronósticos de la componente zonal U (en  $\text{m s}^{-1}$ ) entre las fechas 27 de marzo y 14 de abril de 2003 para todos los nodos dentro del dominio del modelo MM5 en una distancia con los datos de la UKMO no superior a  $0.1^\circ$  de latitud. Cantidad total de puntos: 5833.



**Figura 7.** Comparación entre los pronósticos de la componente meridional V (en m s<sup>-1</sup>) entre las fechas 27 de marzo y 14 de abril de 2003 para todos los nodos dentro del dominio del modelo MM5 en una distancia con los datos de la UKMO no superior a 0.1° de latitud. Cantidad total de puntos: 5833.

La Figura 8 hace una comparación entre las mediciones del ARC "Malpelo" y los resultados de UKMO y MM5. Las mediciones corresponden a los puntos más cercanos de los nodos de los respectivos modelos en tiempos no mayores de  $\frac{1}{4}$  de día. Como indica la Figura 8, no se encuentra ninguna relación entre los datos a favor de uno de los modelos (si bien hay una ligera tendencia a una mejor representación por parte del MM5). Es posible que los errores de las mediciones estén superando las diferencias encontradas entre los modelos. De todos modos, se anota que los vientos medidos son de mayor intensidad, como regla general. Es mucho más obvio para el caso del modelo de UKMO debido a una baja resolución espacial en comparación con el modelo MM5. Sin embargo, en ambos casos existe una subestimación del parámetro analizado. Los ensayos, algunos resultados de los cuales se demuestran en Lonin et al. (2003), sobre los experimentos con balsas salvavidas, en forma indirecta indican que a veces la intensidad de viento introducida al modelo de acuerdo con el pronóstico de UKMO, no es suficientemente alta para simular la velocidad de desplazamiento de las balsas.

Para estimar el error práctico posible en el desplazamiento de los objetos flotantes se supone que el viento se pronostica con un error promedio de 25%. Para un caso particular cuando su velocidad es de  $10 \text{ m s}^{-1}$  y la velocidad de las corrientes de deriva corresponde a un 3% de la intensidad de viento, entonces, el error en la definición de la corriente superficial será mayor o igual a  $(10 \text{ m s}^{-1} \times 0.03 \times 0.25) = 7.5 \text{ cm s}^{-1}$ . (El error puede ser mayor por no tener en cuenta la influencia indirecta de viento en las corrientes de distinta naturaleza). Si se asume, además, de que el factor de abatimiento de viento para un objeto es también de 3%, el error total en la definición del movimiento del objeto será mayor de  $15 \text{ cm s}^{-1}$ .

La última estimación indica que para un lapso de tiempo de 24 horas del pronóstico, el error en la posición del objeto alcanza llegar hasta 13 km para un desplazamiento pronosticado de 52 km.

Otro aspecto importante es como los modelos representan otras características vectoriales, por ejemplo, la vorticidad del campo de viento. El vórtice del plano horizontal representa la cantidad de enstrofia que se genera en el océano gracias a la influencia del viento y es la responsable por la circulación oceánica, en particular, sobre el talud del fondo.

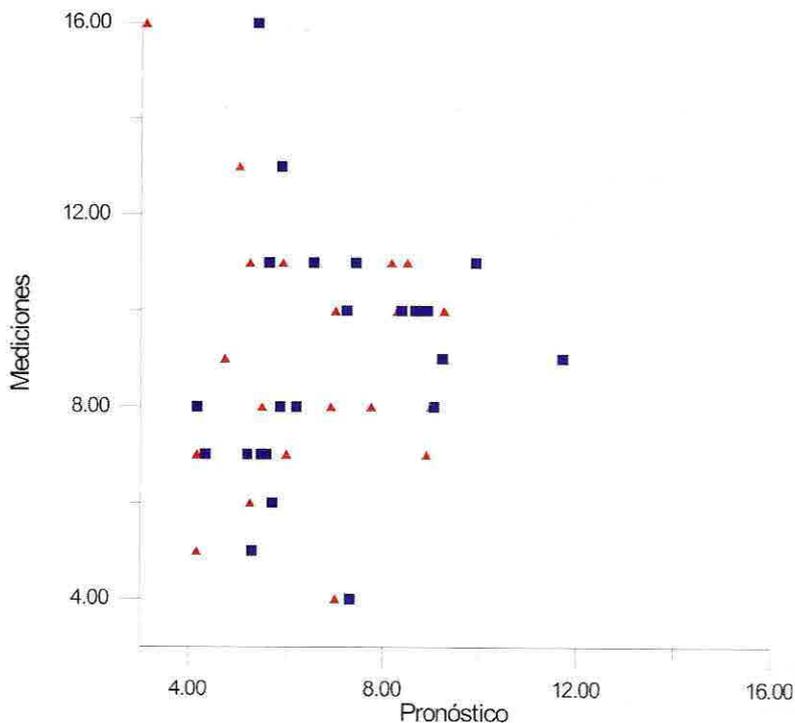
Una de las zonas de mayor interés en este sentido es la zona litoral del Caribe entre la Guajira y el Golfo de Urabá. De acuerdo con la Figura 1, el cambio de la intensidad (y dirección) de los vientos es notable en esta zona. La Figura 9 muestra los campos de vorticidad, calculados con los datos de UKMO y MM5 para el mismo momento del tiempo (los valores negativos representan una vorticidad ciclónica). Además, el primer cálculo (la Figura 9, arriba) tuvo en cuenta los vientos sobre el continente, mientras que el segundo caso (Figura 9, centro) excluye los nodos terrestres. La razón para esta exclusión fue la resolución baja del modelo de UKMO; por tanto, en una franja del mar a lo largo de la costa, la intensidad de vientos está subestimada, debido a que usualmente el modelo muestra los vientos mucho más débiles sobre la tierra. En otras palabras, para definir la intensidad de vientos en esta franja a través de una interpolación entre los nodos del modelo, es preferible no tomar en cuenta los nodos terrestres.

A favor de esta conclusión está el resultado mostrado en la Figura 9 (abajo), donde se presenta el campo de vorticidad calculado desde el modelo MM5.

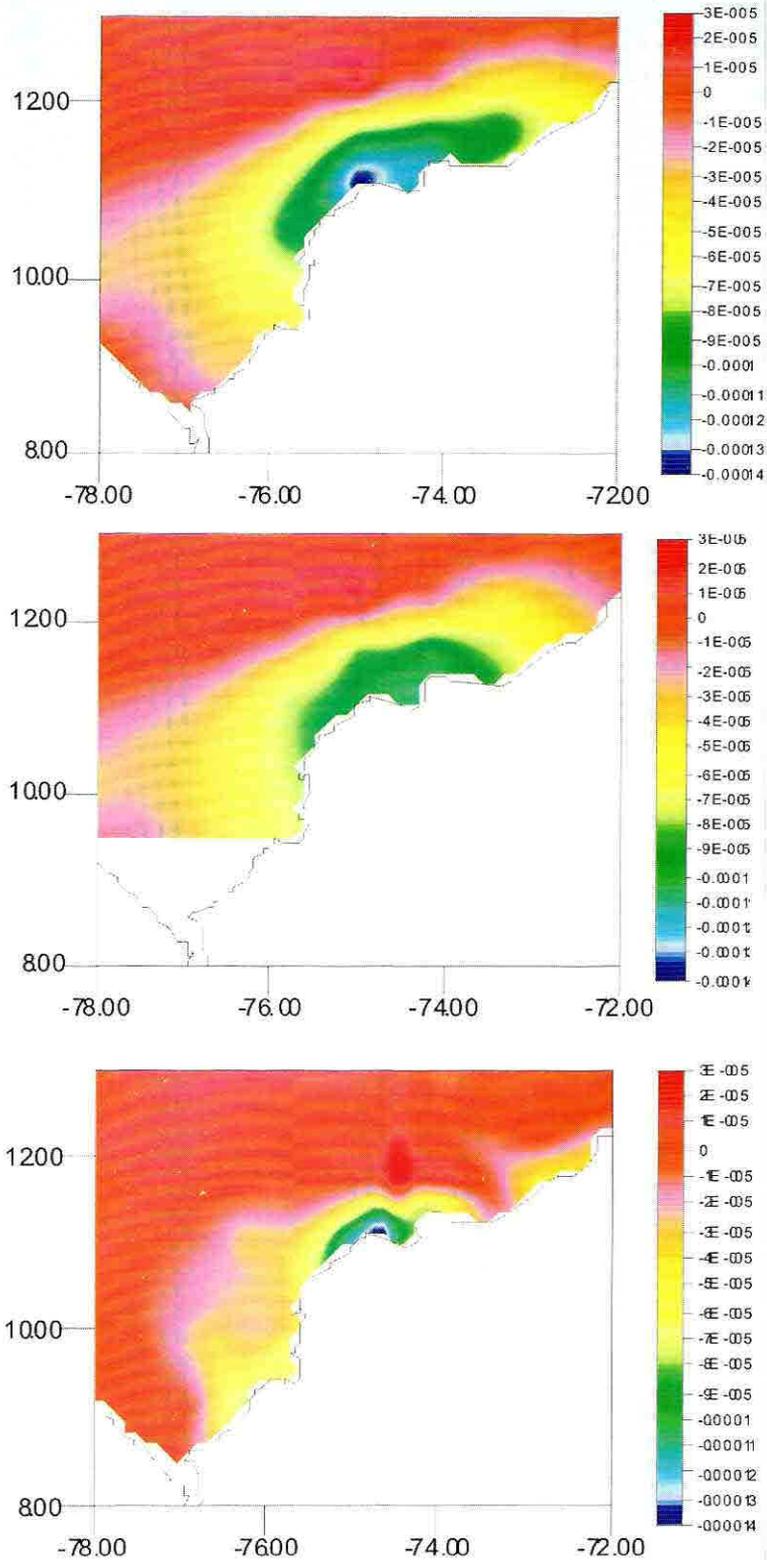
La comparación muestra los siguientes detalles:

- El rango de variación de la vorticidad en ambos modelos es aproximadamente igual para esta zona;
- Sin embargo, la extensión de la zona de la vorticidad ciclónica en el modelo MM5 es mucho menor (el valor máximo del vórtice se encuentra en vecindad de la desembocadura del río Magdalena);
- Sin tener en cuenta los nodos terrestres, la vorticidad del campo de viento “se mejora”, pero el área ocupada por la circulación ciclónica es mayor en el UKMO y se conserva.

Una consecuencia directa de esta circunstancia se considera en lo siguiente. La presencia de la vorticidad ciclónica en la zona mencionada está produciendo condiciones favorables para una intensificación de la corriente sub-superficial, dirigida de la costa panameña a lo largo de la costa colombiana. En los casos cuando por la situación sinóptica los vientos se debilitan en este sector, la corriente puede llegar hasta la superficie. El área afectada por la corriente dependerá de la cantidad de la enstrofia transmitida desde la atmósfera. Una sobreestimación de esta área en el modelo de UKMO resulta en un mayor período de tiempo para la respuesta del modelo oceánico en el momento de restauración de las condiciones de los vientos alisios en esta zona. La reacción cuantitativa al efecto de sobrestimación de la enstrofia se puede verificar sólo a través de los ensayos con el modelo oceánico.



**Figura 8.** Comparación entre los datos de mediciones (ARC “Malpelo”, Caribe-2003, Fase I) y el pronóstico de UKMO (triángulos rojos) y MM5 (cuadrados azules) para las horas 6:00 y 12:00 GMT del módulo de viento (en m s<sup>-1</sup>).



**Figura 9.** Vorticidad (en  $s^{-1}$ ) del campo de viento, calculada por el modelo UKMO con todos los nodos (arriba), quitando los nodos terrestres (centro), y obtenida desde el modelo MM5 (abajo) para el mismo momento del tiempo.

## >> Conclusiones

**E**l error del análisis objetivo de viento en el modelo UKMO está superando el error del pronóstico a corto plazo. La razón de esta circunstancia, evidentemente, es la ausencia de los datos de observaciones que utiliza UKMO en la América Central.

El pronóstico de UKMO está subestimando la intensidad del viento. Este resultado fue obtenido comparando la componente zonal del viento (medido en R/V "Seward Jonson" y pronosticado por UKMO). La componente zonal se caracteriza por predominar sobre el mar Caribe, lo que permite concluir que el valor subestimado es de 1.5 a 2 m s<sup>-1</sup> para una intensidad de 7 a 9 m s<sup>-1</sup> con un valor de r.m.s. de 1.6-1.7 m s<sup>-1</sup>.

La componente meridional del viento tiene un carácter ondular, debido a que representa las perturbaciones del flujo zonal en la atmósfera, por lo tanto, esta componente no refleja en forma directa la tendencia de pronóstico con respecto a los datos de observaciones, por lo

menos en la zona cubierta por los datos de observaciones durante los cruceros del año 2003. Para una componente meridional promedia alrededor de 0 m s<sup>-1</sup> (ausencia de las perturbaciones del flujo zonal), la diferencia entre las observaciones de R/V "Seward Jonson" y el pronóstico fue de 4 m s<sup>-1</sup> con un valor de r.m.s. de 1.3 m s<sup>-1</sup>.

La utilización del modelo MM5 podría ser una mejor alternativa como un modelo regional con más alta resolución espacial, una opción de asimilación de los datos terrestres, disponibles en tiempo real, y los datos aerológicos. El proyecto PACS-SONET sobre la red de lanzamiento de los globos-pilotos soportaría la última información. El modelo debe ser adaptado especialmente para toda la cuenca del mar Caribe. Una de las ventajas de esta adaptación sería una forma viable de aprovechar el cálculo de la temperatura de la superficie del mar en el modelo oceánico para suministrar esta información al modelo MM5 y, en tal manera, acoplar los bloques oceánico y atmosférico en la escala regional.

## >> Agradecimientos

**E**ste trabajo fue realizado bajo el aporte de la Dirección General Marítima dentro del proyecto de investigación "Validación y Operacionalización del Modelo Numérico de Búsqueda y Rescate, CODEGO y PROPAS en las Unidades de la Armada Nacional". La información del pronóstico meteorológico de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (UKMO) está disponible bajo un crédito a largo plazo. Los autores agradecen a James R. Ledwell, Woods Hole Oceanographic Institution, por los datos suministrados del crucero a/b R/V Seward Johnson (2003), operado por Harbor Branch Oceanographic Institution, y al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, IDEAM, por su valioso apoyo.

## >> Bibliografía

- Lonin, S.A., Anduckia, J.C., Parra, C.A., Molares, R.J. (2003): Sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas del mar Caribe para operaciones navales. *Presente Boletín*.
- López, L.A. (2002): Desarrollo e Implementación de Técnicas de Reducción de Escala para Ajustar a Condiciones Locales la Predicción de la Precipitación a partir de Modelos Numéricos Regionales. Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá.
- Mellor, G.L. (1993): User's Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation Numerical Ocean Model, Princeton, NJ, 35 p.