



PARA OPERACIONES NAVALES

## SISTEMA DE PRONÓSTICO DE LAS CONDICIONES OCEANOGRÁFICAS DEL MAR CARIBE

### >> Resumen

Se presenta un sistema de pronóstico de los parámetros oceanográficos basado en un modelo hidrodinámico para el mar Caribe. El sistema recibe información en tiempo cuasi-real sobre la temperatura superficial del mar procedente de satélites de la NOAA, para ser asimilada; adicionalmente, recibe datos de viento del modelo global meteorológico de alta resolución, UKMO (*United Kingdom Meteorological Office*), los cuales se utilizan como entradas diarias para realizar pronósticos hasta de 72 horas. El sistema está en capacidad de pronosticar el movimiento de una mancha de hidrocarburo derramada y la trayectoria de un artefacto flotante a la deriva; suministra información útil a las unidades de guerra sobre la estructura térmica de la columna de agua y puede tener aplicaciones en la pesquería, entre otras. Se describe el funcionamiento del sistema en el régimen de operación diaria, en caso de un accidente y cuando se requiere re-inicializar el modelo (régimen de falla).

Se describen en detalle la información de entrada al modelo, la formulación del bloque de transporte, y el *software* amigable que permite su operación.

### >> Abstract

An oceanographic forecast system is presented, based on a hydrodynamic model for the Caribbean Sea. The system receives data from remote sensors on board of NOAA's satellites, to be assimilated in quasi-real time mode. Weather forecast from a high-resolution global meteorological model (UKMO, United Kingdom) enters the system daily for prediction up to 72 hours. The system may forecast an oil spill or an object on the sea. For the Navy units, it provides useful information about the vertical thermal structure of the water column and could have applications for the fishery industry. The functioning of the system is described for the cases of daily operation, accidents and model re-initialization. Descriptions for the inputs, the transport block formulation and the friendly software designed for its operation are presented.

SERGUEI A. LONIN

JUAN CARLOS ANDUCKIA

CARLOS PARRA

RICARDO MOLARES

CENTRO DE  
INVESTIGACIONES  
OCEANOGRÁFICAS E  
HIDROGRÁFICAS CIOH  
Cartagena

CIOH

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

## >> Introducción

En el marco del proyecto “Modelación numérica aplicada a operaciones navales de Búsqueda y Rescate” del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH), se desarrollaron diferentes bloques numéricos que acoplados al modelo POM (*Princeton Ocean Model*) se presentan como un sistema de predicción operativo de las condiciones oceanográficas del mar Caribe para aplicaciones en operaciones de búsqueda y rescate, planes de contingencia de derrames de hidrocarburos, pesquería y otros.

El sistema, llamado SPOD por las siglas de Sistema de Predicción Oceánica de DIMAR, permite a la Armada Nacional y a sus unidades navales la planeación de operaciones de búsqueda y rescate y el replanteamiento de las mismas por cambios en las condiciones reinantes del tiempo marítimo, contribuyendo a disminuir costos y tiempos de operación, y aumentando las posibilidades de éxito.

SPOD es un sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas para gran parte del mar Caribe, con una resolución mayor para las aguas de jurisdicción de Colombia. El sistema hace uso del modelo POM (Mellor, 1993) y es alimentado de manera automática con datos del modelo global de pronóstico meteorológico de la UKMO (*United Kingdom Meteorological Office*) y con datos de temperatura superficial del mar (TSM) de satélites de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration, EU*). Los datos de la UKMO se utilizan para forzar al modelo y pronosticar el comportamiento de los campos hidrodinámicos, en el periodo entre las 24 y 72 horas; los datos de TSM de los satélites de la NOAA se asimilan durante el proceso de cálculo, permitiendo un mejor ajuste a las condiciones reales.

Finalmente, los datos de la base de datos WOA-98 del NODC (*Nacional Oceanographic Data Center*) se utilizan para la fase de inicialización del modelo.

Durante 1995-1998, en el marco de un convenio DIMAR-COLCIENCIAS (0140-09-347-95), el CIOH desarrolló un sistema de pronóstico de desplazamiento de manchas de hidrocarburo en tres zonas de probable impacto: el Golfo de Morrosquillo, la Bahía de Cartagena y el área de Pozos Colorados de Santa Marta. Sus productos fueron: un modelo acoplado de océano y atmósfera para la plataforma continental del mar Caribe en el sector de Colombia entre el Golfo de Morrosquillo y Riohacha y los modelos de derrame para las tres áreas mencionadas.

El interés de pronosticar el movimiento de las manchas de hidrocarburo no sólo en estas tres zonas, sino en toda la plataforma cubierta por el modelo de gran escala, es obvio, debido a que un derrame puede ocurrir en cualquier punto de la ruta de los buques petroleros. Por otro lado, un modelo de transporte de sustancias en la superficie del mar permite simular el desplazamiento de cualquier objeto flotante, si se tienen en cuenta sus propiedades físicas. Esto significa que el modelo, ajustado en forma adecuada, puede emplearse en las operaciones navales de búsqueda y rescate, pronosticando la posición de los artefactos y cuerpos humanos resultados de un accidente. Con este fin, el sistema operativo reúne los siguientes elementos:

- Un bloque de transporte de trazadores que simula el comportamiento del hidrocarburo o del artefacto a la deriva.
- Facilidad de cambiar la resolución espacial del dominio de cálculo, aplicando mallas de nido, o empleando mallas curvilíneas.
- Asimilación de los datos de observaciones en tiempo real (TSM).

- Empleo en tiempo real de los datos del pronóstico de la UKMO sobre el campo de viento y otros parámetros meteorológicos.
- Tiene en cuenta las reglas y métodos de búsqueda y rescate (Manual de OMI de Búsqueda y Salvamento, 1987).

El presente artículo describe los principales aspectos en que está basado el sistema. En el siguiente apartado se da una breve descripción de los datos que se utilizan en el modelo; luego se presenta el algoritmo principal de funcionamiento del sistema; después se presenta el bloque numérico del transporte. Una breve descripción del software de operación del sistema se da en el apartado cuarto, antes de la discusión de algunos resultados.

## >> Bases de Datos Empleadas

Diferentes bases de datos se encuentran organizadas o deben ser organizadas cada vez para la realización de los cálculos numéricos. Algunas bases de datos son permanentes e inalterables, tales como la información climatológica del mar Caribe o la batimetría; otras son cambiantes y provienen de modelos globales que alimentan el modelo regional de circulación oceánica para el Caribe que hace parte del SPOD.

Los datos climatológicos son fundamentales al momento de arranque inicial del modelo y también se utilizan en el procedimiento de “amarre” (*nudging*) del campo tridimensional de salinidad. Los datos termohalinos provienen del Centro Mundial de Datos Oceanográficos (Levitus, 2001); se trata de 12 campos correspondientes a los meses del año climatológico, interpolados de la malla original de  $0.5^\circ$  de latitud a los nodos de la malla curvilínea del modelo (200 x 100 nodos en el espacio horizontal y 18 niveles en la vertical).

Los datos sobre flujos de impulso y balance de calor en la superficie del mar se toman de la climatología de Da Silva & Levitus (1994).

Los parámetros meteorológicos se toman en el modo operativo del modelo de pronóstico global de alta resolución de la UKMO. Estos datos están disponibles en una malla de  $0.56$  por  $0.83$  grados de resolución espacial, cada 6 horas y hasta 120 horas para el CIOH en los últimos años. El sistema utiliza solamente las primeras 72 horas de pronóstico.

Con el fin de establecer una condición cinemática para la frontera libre es necesario calcular las condiciones dinámicas para las tensiones del viento ( $\tau_{sx}$ ,  $\tau_{sy}$ ) y el balance de calor  $Q_T$ . Lo anterior se logra ingresando al cálculo diferentes parámetros (Tabla 1) pronosticados por el modelo UKMO para el área de interés (Figura 1), página siguiente.

**Tabla 1.** Parámetros meteorológicos pronosticados por UKMO y empleados por el modelo.

Parámetro	Utilización
Componente U del viento a 10 m.	Cálculo de flujos de calor y de impulso
Componente V del viento a 10 m.	
Temperatura del aire a 1.5 m.	Cálculo de flujos turbulentos de calor
Humedad específica del aire a 1.5 m.	
Nubosidad nivel bajo	
Nubosidad nivel medio	Cálculo de la radiación solar
Nubosidad nivel alto	

De la misma manera, se utiliza la información de nubes suministrada por el modelo global de la UKMO para calcular el flujo de radiación solar. Así, para la determinación de la radiación absorbida se hace necesario conocer una función de nubosidad, la cual se calcula teniendo en cuenta la nubosidad en el nivel bajo ( $N_L$ ), medio ( $N_M$ ) y alto ( $N_A$ ) estimada por UKMO. Si se asume que  $N_C = \max(N_L, N_M, N_A)$ , entonces se puede aplicar la fórmula (Kazakov et al., 1996):

$$F(N_C) = 1 - 0.08 N_L - 0.05 (N_C - N_L) \quad (1)$$

donde la nubosidad respectiva se expresa entre 0 y 10. La función de nubosidad es un factor que limita la radiación solar en la superficie del mar. El factor  $F(N_C)$ , se calcula de acuerdo con la fórmula (1), y su valor máximo (igual a 1.0) significa que la radiación solar no se detiene, es decir, no es absorbida por las nubes. En la Figura 1 este valor máximo se presenta con un color más oscuro, mientras que los valores menores de 1 se presentan con mayor contenido de blanco, reflejando la presencia de las nubes.

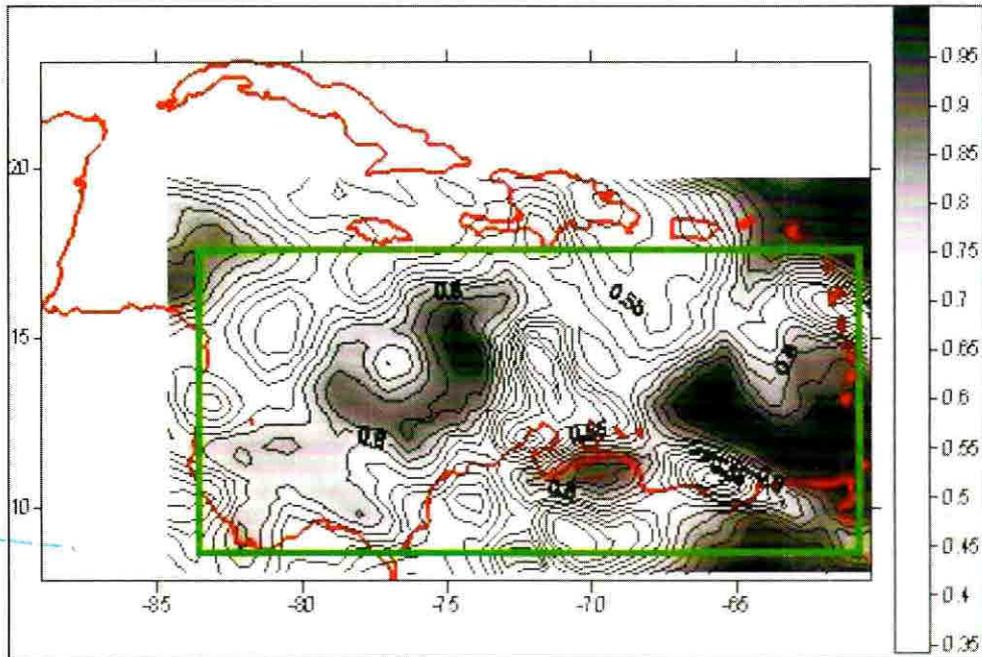
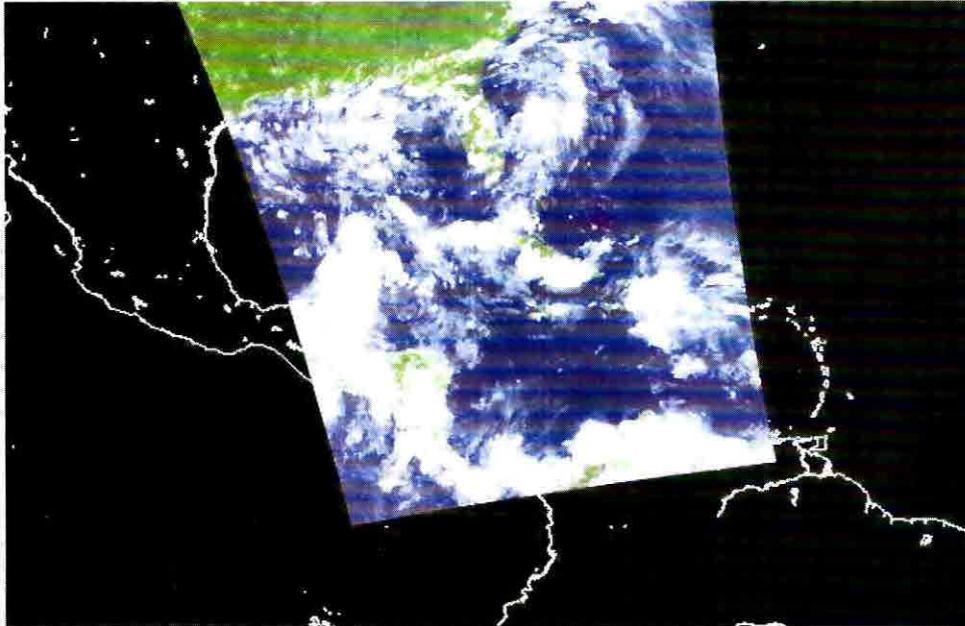
Comparando las imágenes y las distribuciones respectivas de  $F(N_C)$  se ve que las principales tendencias espaciales se reflejan en el pronóstico. No se tiene por ahora una mejor alternativa para reemplazar el uso de estos datos en la fórmula (1). La verificación debe ser hecha también en forma cuantitativa, debido a que el pronóstico de la nubosidad por capas se hace en UKMO con base en las fórmulas empíricas, construidas para los datos de las latitudes altas y no para la zona tropical.

Los datos de satélite sobre TSM determinados por el radiómetro AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) de la NOAA están disponibles en la Internet en tiempo cuasi-real. Usualmente, entre tres y ocho imágenes diarias de satélite son aceptadas, atendiendo a su calidad y cobertura en el dominio de cálculo. La calidad es controlada teniendo en cuenta la cobertura de nubes así como algunos filtros que utilizan como criterio general la climatología de Levitus en el Atlas Mundial de los Océanos (WOA-98); finalmente, son asimilados por el modelo utilizando el método de Cressman con correcciones sucesivas (Anduckia, Lonin e Ivanov; presente Boletín).

Dos cruceros oceanográficos en los años 2002 y 2003 fueron llevados a cabo por el CIOH específicamente para las necesidades de este proyecto. El crucero "Caribe-2002" (noviembre - diciembre 2002) se diseñó para:

- Calibrar la predicción del comportamiento de los parámetros de temperatura y salinidad en el perfil de la vertical del modelo (realizándose lanzamientos de CTD hasta los 2000m).
- Calibrar la predicción del desplazamiento de un artefacto flotante con el seguimiento de una balsa salvavidas durante 10 horas del modelo.
- Calibrar las imágenes de satélite de TSM de la NOAA para asimilación en el modelo.
- El crucero "Caribe-2003" (marzo - abril 2003) se organizó para validar todos los componentes del modelo, sus entradas (datos meteorológicos y remotos) y sus salidas; en el caso de las últimas, el principal interés fue observar la coincidencia entre el comportamiento de una balsa lanzada a la deriva durante varios días y las respectivas simulaciones.

CoastWatch NOAA-15 Satellite Pass -- 2002/09/01 20:04:52 EDT



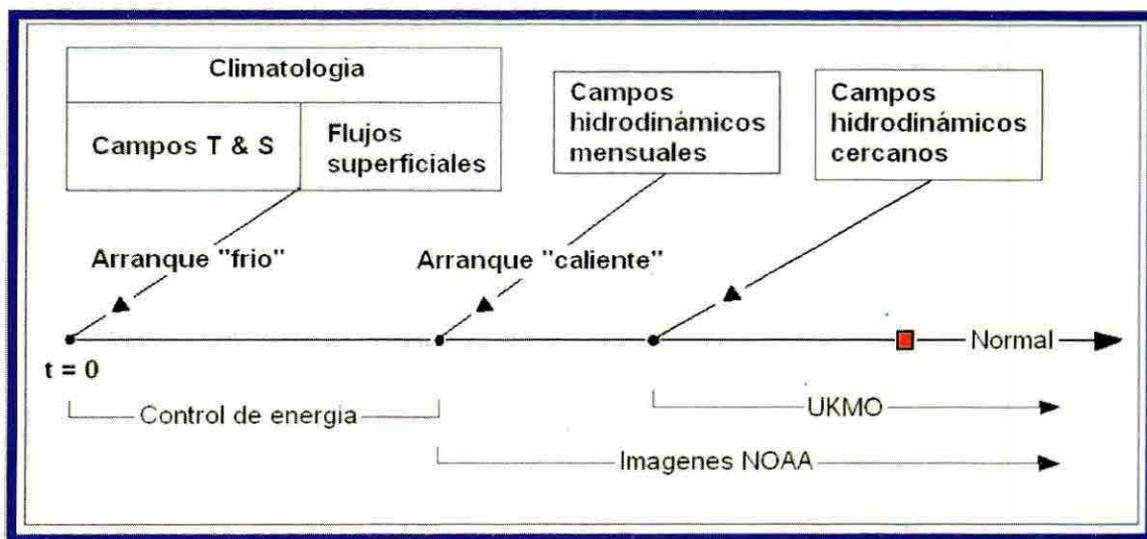
**Figura 1.** Cobertura de nubes (arriba) según la imagen de satélite de la NOAA para la hora 20:04:52 EDT del día 01 de septiembre de 2002 y el factor de detenimiento (abajo) de la radiación solar (1 es totalmente despejado), calculado con la fórmula (1), para la hora 00:00 GMT del día 02 de septiembre de 2002, basado en el pronóstico de la UKMO. El rectángulo verde indica el dominio del sistema.

## >> Funcionamiento del Sistema

El modelo en el régimen de pronóstico debe mantenerse activo permanentemente, debido a que el estado de los parámetros hidrofísicos del día actual dependen del estado del día anterior. Esta renovación continua se hace con base en datos de mediciones remotas y el pronóstico meteorológico. El funcionamiento "normal" diario del sistema se describe más adelante.

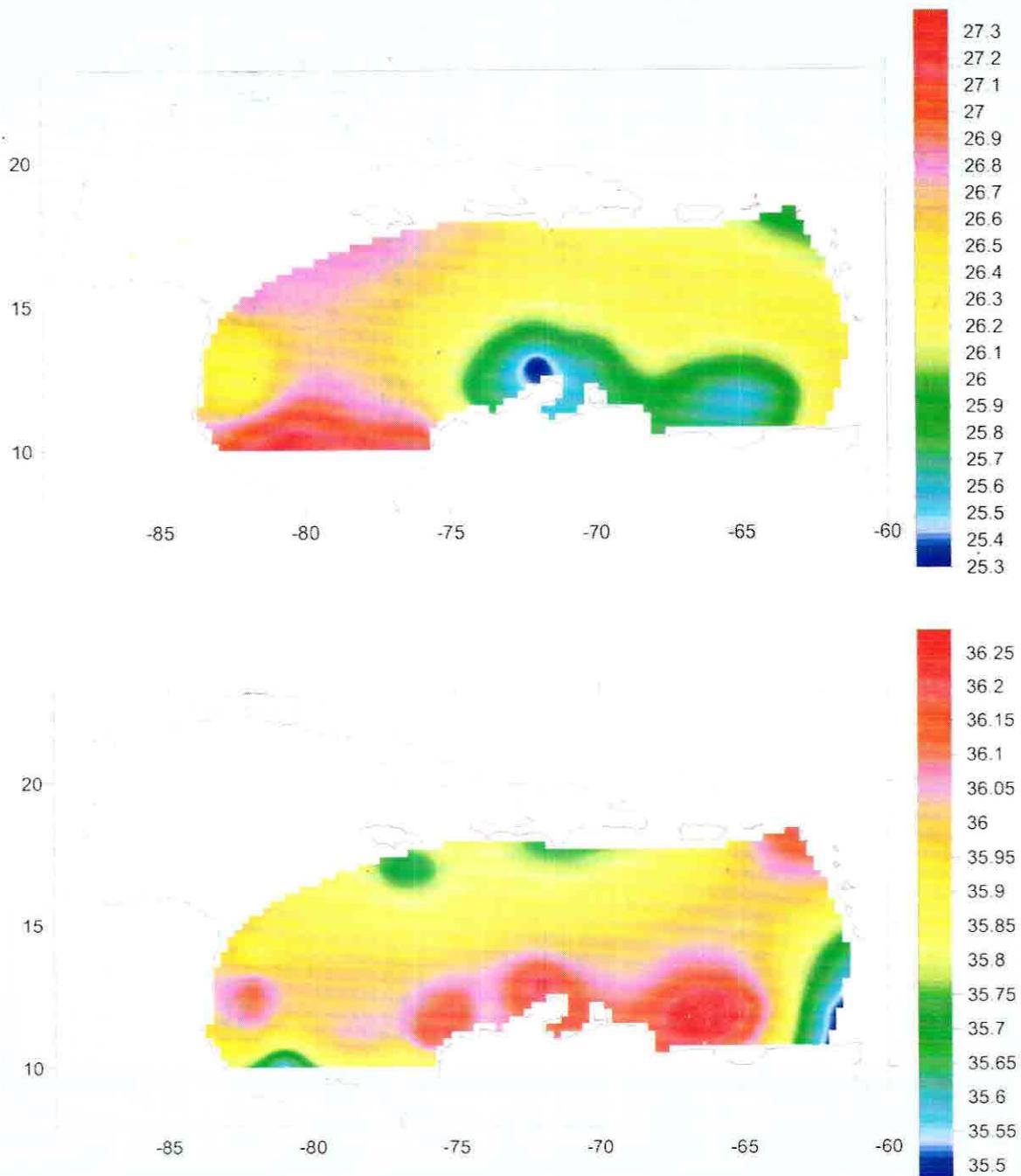
El régimen de funcionamiento del sistema en caso de accidente depende totalmente del estado actual del modelo; es decir, si el sistema permaneció en el estado normal durante suficiente tiempo (días o meses), entonces se puede producir una respuesta más cercana a la realidad. Mientras que el sistema no se mantenga operativo los resultados se alejan del estado real.

En caso de pérdida de operatividad del sistema por una causa externa (fallas de electricidad, fallas en la comunicación con Internet, etc.) se requiere, durante un tiempo considerablemente largo, la re-inicialización. Esta fase, también llamada "estado de falla", es necesaria para actualizar el sistema. La Figura 2 muestra un diagrama de manejo del sistema en esta fase. Dependiendo de la gravedad del problema y el tiempo que el sistema estuvo fuera de operación, se aplica un arranque "frío" o "caliente". Si la interrupción no fue superior a unos días, se busca el estado más cercano grabado, se aplican las condiciones pronosticadas del tiempo y se asimilan los campos faltantes en la información remota.

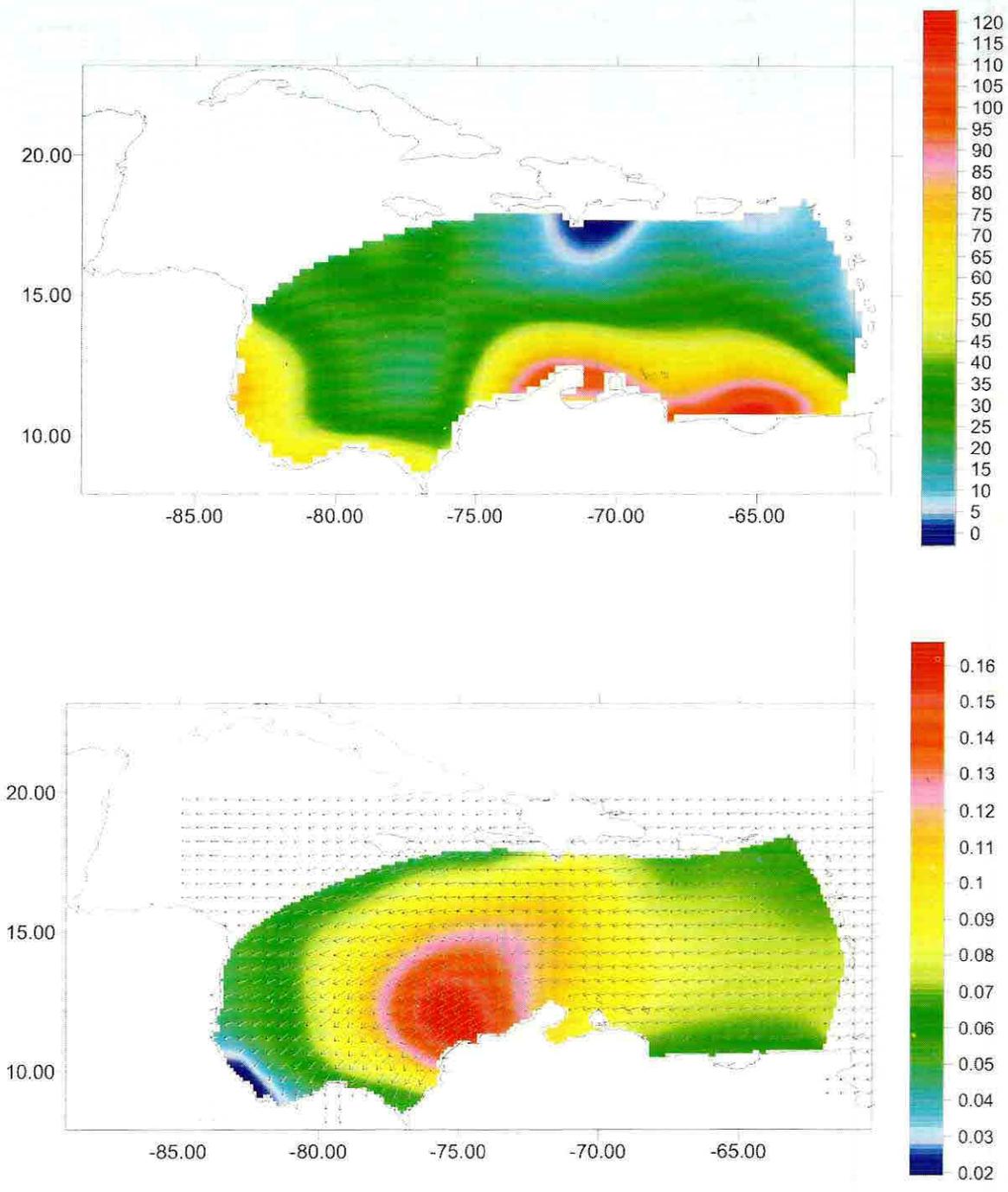


**Figura 2.** Diagrama de funcionamiento del sistema en el régimen de re-inicialización (falla). A partir del momento indicado con el rectángulo rojo, el sistema está actualizado y corre en el régimen normal.

En el caso de arranque “frío”, la Figura 2 indica que se utilizan los campos 3-dimensionales climatológicos sobre la temperatura (T) y salinidad (S) del agua y los flujos de calor e impulso en la superficie del mar, provenientes del NODC. Las Figuras 3 y 4 muestran un ejemplo de estos datos interpolados en la malla del modelo.

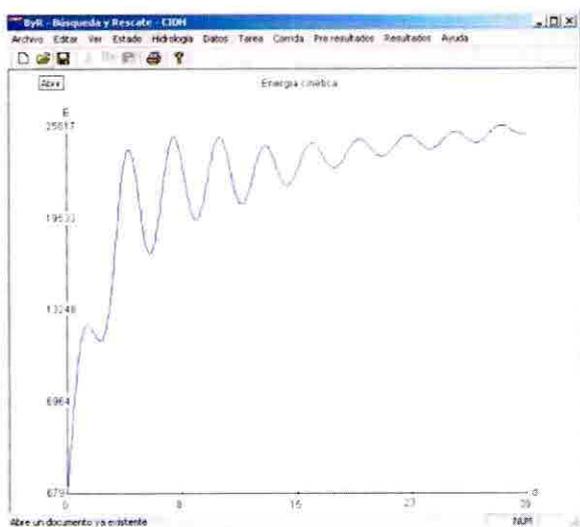


**Figura 3.** Distribuciones de la temperatura (arriba) y salinidad (abajo) en la superficie del mar, obtenidas del atlas WOA-98 para el mes de marzo climatológico.



**Figura 4.** Distribuciones del balance superficial de calor (en  $W/m^2$ , arriba) y tensión de viento (en  $N/m^2$ , abajo) para el mes de marzo climatológico.

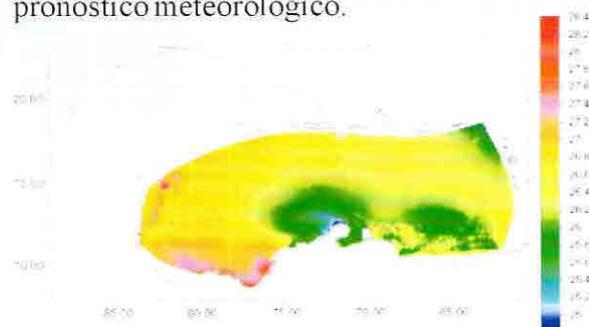
El proceso de re-inicialización entre el arranque “frío” y “caliente” se controla mediante el comportamiento de la energía cinética. La Figura 5 presenta su comportamiento para un mes de cálculo. Usualmente, para los efectos de estabilización asintótica de la energía en el período de arranque, se requiere un tiempo del orden de meses. La Figura 2 indica también que en el caso del arranque “caliente” se pueden utilizar los datos de satélite para asimilar la temperatura en la superficie del mar y/o el nivel del mar. El proceso de asimilación de estos datos lleva el modelo a un estado más cercano a lo observado. El empleo de los datos del pronóstico de la UKMO se realiza a partir de la última fecha en que dichos datos fueron grabados (este período equivale a los seis días anteriores al momento actual).



**Figura 5.** Comportamiento temporal de la energía cinética en la fase de re-inicialización para el arranque “frío”.

El paso de la fase de re-inicialización a la de régimen normal es convencional; se supone que el acercamiento a la realidad es un proceso continuo y asintótico, y depende de la calidad de la información externa involucrada.

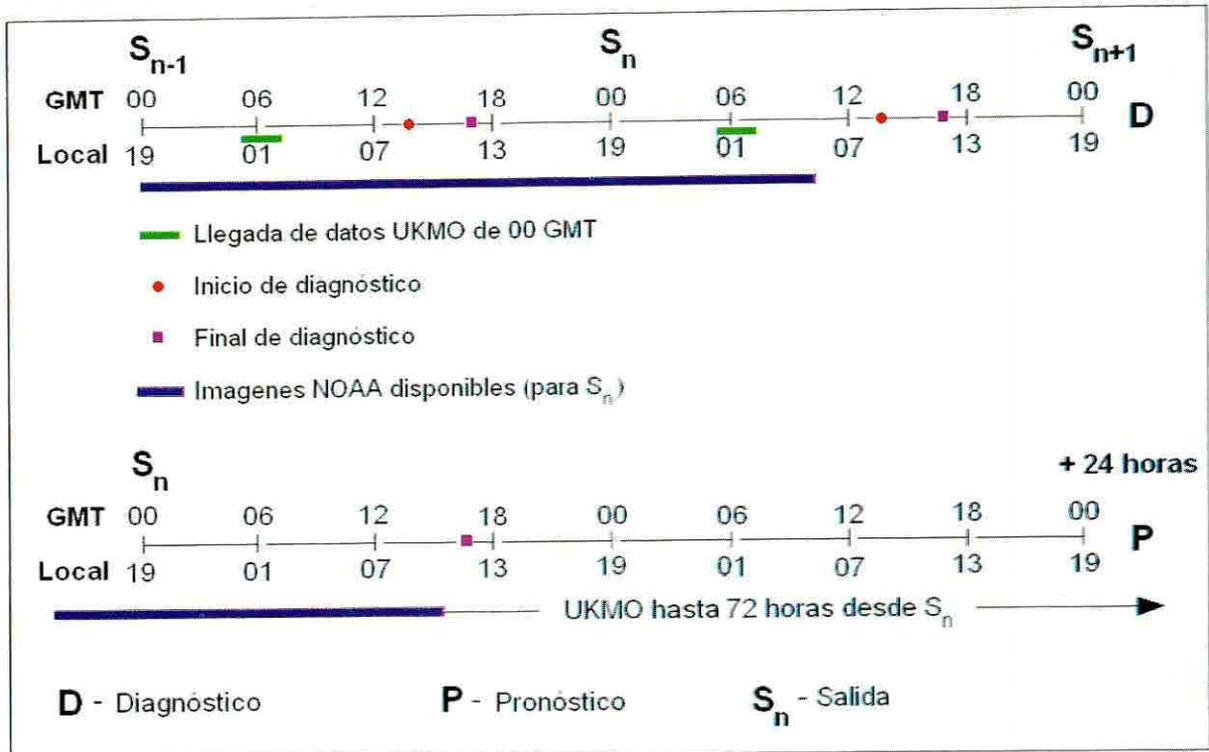
La Figura 6 muestra un ejemplo de la distribución de la temperatura de la superficie del mar en el inicio de la fase de funcionamiento normal. La comparación de esta figura con la Figura 3, ilustra al mismo tiempo la diferencia existente entre un campo climatológico y una distribución instantánea, el surgimiento de procesos de una escala más fina que la climatología y el empleo simultáneo de las observaciones y el pronóstico meteorológico.



**Figura 6.** Distribución de la temperatura en la superficie del mar después de la fase de re-inicialización bajo condiciones del mes de marzo 2003.

La Figura 7 muestra de manera esquemática el funcionamiento del sistema en su régimen normal operativo diario. El proceso se divide en dos partes: régimen de diagnóstico (D) y de pronóstico (P). En caso de no existir accidentes, la principal tarea de esta etapa es mantener actualizadas las salidas ( $S_n$ ) del modelo. El cálculo diagnóstico se efectúa desde las 00 horas GMT hasta las siguientes 00 horas. La Figura 7 muestra que en un día cualquiera, entre las salidas  $S_{n-1}$  y  $S_n$ , para generar la última salida están disponibles las imágenes de satélite de la NOAA para todo el período, dado que el proceso de cálculo empieza entre las horas 7:00 y 8:00 (hora local). Para este momento se dispone también de la información de la UKMO, la cual está disponible para las 00 horas GMT del día anterior y es recibida automáticamente en un servidor FTP en la madrugada correspondiente al día de diagnóstico/pronóstico.

El pronóstico, de acuerdo con la Figura 7, comienza luego de que se obtiene la salida  $S_n$ , lo que ocurre en horas de la tarde (tiempo local). De esta forma, empezando a las 00 horas GMT (19:00 de la hora local del día anterior), el modelo en la fase de pronóstico corre un tiempo de 16-18 horas “retro-pronosticando” las condiciones pasadas en tiempo real y asimilando la información satelital de la NOAA. Después de este período, efectúa un pronóstico hasta de 72 horas a partir de las 00 GMT. El tiempo neto pronosticado es entonces de 2 días y 6 horas, aproximadamente.



**Figura 7.** Diagrama de funcionamiento del sistema en el régimen normal operativo.

Un accidente, como regla, se reporta con un retardo en el tiempo del orden de unas horas o días; de modo que la trayectoria de un artefacto o de una mancha se predice con base en la información del tiempo pasado hasta el momento actual. La predicción para las próximas 24 a 72 horas acierta la posición con base en la información meteorológica predicha. Sin embargo, la exactitud del pronóstico disminuye en la medida que el tiempo se aleja del momento del accidente.

## >> Bloque Numérico de Transporte

**T**eniendo en cuenta que para la solución de la condición cinemática de la frontera libre se emplea información calculada por el modelo global de la UKMO con una resolución de  $0.5^\circ$  de latitud, que el modelo asimila información de TSM que tiene una resolución de 5 Km., y que la capacidad de cálculo se limita a esa resolución, el problema del transporte de hidrocarburos y de objetos flotantes se formula como un problema 2-dimensional. Esto quiere decir que el transporte de hidrocarburos en el nivel correspondiente a la superficie del mar se trata sin tener en cuenta su penetración en la columna de agua.

Si para el caso del transporte de hidrocarburos el bloque lagrangiano de transporte se presenta a través del movimiento de un conjunto de partículas-trazadores que caracterizan todo el volumen de la sustancia derramada (Lonin, 1999), entonces para el caso de un artefacto, éste debería presentarse en forma de una sola partícula-trazador. Sin embargo, se sabe que debido a las fluctuaciones que pueden ocurrir en escalas menores a las que puede resolver el modelo explícitamente, cualquier perturbación pequeña puede provocar desviaciones grandes con el paso del tiempo, lo que significa que debe existir un factor probabilístico en el proceso expresado, discretamente por el modelo. Por esta razón, el transporte de objetos en el mar se trata mediante un componente probabilístico, aplicando los mismos trazadores empleados para el caso de hidrocarburos.

De acuerdo con estas consideraciones, el volumen total de hidrocarburo derramado en la superficie del mar, se caracteriza mediante una cantidad  $N$  de partículas infinitesimales bajo la influencia regular del medio marino con componentes horizontales deterministas de velocidad  $\langle u(x, y, z, t) \rangle$ ,  $\langle v(x, y, z, t) \rangle$  y sus fluctuaciones turbulentas,  $u'(x, y, z, t)$ ,

$v'(x, y, z, t)$ . Aquí,  $u$  y  $v$  son las componentes de la velocidad de las corrientes en las direcciones  $x$  e  $y$ , respectivamente, y  $t$  es el tiempo. Se supone que las partículas se encuentran permanentemente en la superficie del mar; que las pérdidas por evaporación no son totales, supuestamente, para todos los componentes del hidrocarburo, sino sólo para su parte volátil; que la densidad del producto no supera la densidad del agua; que las pérdidas por dilución, foto-degradación y biodegradación no son significativas; y que los movimientos verticales de hidrocarburo en forma de gotas de "aceite en agua" no afectan (en la escala dada) la precisión del posicionamiento de la mancha.

En general, las coordenadas de los trazadores se definen en cada paso de tiempo como

$$\frac{dX_k}{dt} = \langle u \rangle + u'_k \quad \frac{dY_k}{dt} = \langle v \rangle + v'_k \quad (2)$$

Donde  $\langle u \rangle$  y  $\langle v \rangle$  se definen en el modelo POM mediante interpolación de las velocidades  $U$  y  $V$  en los nodos de la respectiva malla. Las fluctuaciones  $u'_k$  y  $v'_k$  se pueden calcular aplicando la técnica de "Random Walk", así que

$$u'_k = V' \xi \sin(2\pi\xi) \quad v'_k = V' \xi \cos(2\pi\xi) \quad (3)$$

donde  $\xi$  es "ruido blanco" estándar gaussiano (desviación unitaria y promedio nulo);  $V'$  es el valor r.m.s. de las fluctuaciones estocásticas turbulentas de la velocidad horizontal.

Para ambas tareas (hidrocarburo y artefactos) el último valor tiene una parte común, que depende de la escala de tiempo ( $t$ ) y está relacionado con la difusión horizontal  $K_h$  a través de la siguiente relación:

$$V' = \sqrt{c' K_h / \Delta t} \quad (4)$$

donde es una constante. Los experimentos numéricos efectuados en Lonin (1999) mostraron que el valor de esta constante es muy cercano a 2.

El valor de  $K_b$  se especifica en el modelo POM mediante la fórmula de Smagorinsky o como una constante, dependiendo de la resolución espacial de la malla.

*Caso de hidrocarburos.* En este caso, aparte de la influencia de los procesos de sub-escala, las propiedades físicas del hidrocarburo son de importancia debido a que el crudo en la superficie del mar inicialmente se comporta independientemente de las condiciones ambientales, según sus propios mecanismos de desplazamiento. El crudo pasa por tres fases iniciales (de inercia, de gravedad y de tensiones superficiales) antes de establecer un equilibrio. La duración de estas tres fases depende tanto del crudo como de su volumen y es descrita semi-empíricamente en cada fase de acuerdo a las leyes de Fay. La descripción generalizada de estas leyes para un área  $A$  de la mancha con un volumen inicial de derrame se da por la siguiente fórmula:

$$dA/dt = K_1 A^{1/3} [\mathfrak{I}/A]^{4/3}, \quad (5)$$

donde  $K_1$  es una constante aproximadamente igual a  $150 \text{ s}^{-1}$  (Mackay et al., 1980).

En términos generales,  $K_1$  es la única constante que puede depender del tipo de crudo. Además, es importante anotar que la fórmula (5) simula un área circular; es decir, los demás procesos no participan en el momento de simulación de las fases propias de desplazamiento del crudo, lo que representa cierta dificultad en el uso de la fórmula en los cálculos reales.

El concepto de simulación de las fases iniciales fue modificado, acoplándolas simultáneamente con los demás fenómenos dinámicos que afectan la mancha.

En términos lagrangianos, el área de la mancha se representa como  $A(t) = (\sigma_h)^2$  donde el último valor es la dispersión horizontal de la mancha. Rescribiendo la fórmula (5) en términos de la dispersión espacial tenemos:

$$d(\sigma_h)^2/dt = K_1 (\sigma_h)^{-2} \mathfrak{I}^{4/3}. \quad (6)$$

Aplicando la fórmula de Monin & Yaglom (1971) que relaciona la dispersión espacial  $(\sigma_h)^2$  y la dispersión de velocidades  $\langle V' \rangle^2$  (los paréntesis indican un promedio de ensamble temporal a través de la escala macro de Taylor ( $T_L$ )), se tiene:

$$(\sigma_h)^2 = 2 \langle V' \rangle^2 T_L t,$$

así que la integración de (5) resulta

$$V' = (K_1)^{1/4} \mathfrak{I}^{1/3} t^{-1/4} / (2T_L)^{1/2}. \quad (7)$$

La fórmula (7) fue probada comparando las áreas encontradas según (5) y aplicando (7) junto con las ecuaciones (2) y (3) sin tener en cuenta el proceso (4).

En la simulación del comportamiento de hidrocarburos, los mecanismos (4) y (7) fueron acoplados, así que:

$$V' = (K_1)^{1/4} \mathfrak{I}^{1/3} t^{-1/4} / (2T_L)^{1/2} + \sqrt{c' K_b / \Delta t} \quad (8)$$

El análisis de la fórmula (8) muestra que inicialmente, en los primeros momentos posteriores al derrame, el primer término en la parte derecha de la ecuación es el más destacado, mientras que con el paso del tiempo la influencia de este término disminuye y se establece una constancia del segundo término.

Caso de artefactos en la superficie del mar.

En este caso la fórmula (4) también es válida. Con base en esta fórmula se define la dispersión de los trazadores, mostrando el área de probabilidad de posición del objeto de búsqueda. Sin embargo, además de este procedimiento, se tuvieron en cuenta las recomendaciones del Manual de OMI de Búsqueda y Salvamento (1987), donde la posición de la "fuente" para los trazadores se define dentro de un área inicial llamada "área de probabilidad". Para buques y aeronaves con más de dos motores, esta área tiene un radio de 5 millas marinas. Para aeronaves de dos motores es de 10 millas marinas y para embarcaciones pequeñas y aeronaves de un solo motor es de 15 millas.

Luego se puede estimar la ruta del centro de masa de la nube de trazadores simulados y, a lo largo de esta ruta aplicar un aumento de los radios de búsqueda, debido a que con el tiempo la certidumbre en la determinación del objetivo disminuye. La ventaja de aplicación del modelo en este caso es la posibilidad de conocer la dirección y velocidad de la deriva, relacionada tanto con las corrientes superficiales como con la influencia del viento.

La velocidad de abatimiento de las balsas salvavidas está presentada detalladamente en el manual mencionado. Para el caso de una embarcación pequeña, el efecto se presenta en porcentaje de la velocidad del viento (ver Tabla 2). La diferencia con el caso de una mancha de hidrocarburo es mínima. La mancha se desplaza con una velocidad de 3 % con respecto a la velocidad de viento, pero esta estimación depende del estado de estratificación de la capa próxima de la atmósfera y puede variar entre 2 y 4 %.

La dirección del desplazamiento se define automáticamente, debido a que el efecto de abatimiento se da como:

$$\langle u(x, y, z, t) \rangle = \langle u_c(x, y, z, t) \rangle + nW_x, \quad (9)$$

$$\langle v(x, y, z, t) \rangle = \langle v_c(x, y, z, t) \rangle + nW_y,$$

donde  $\langle u_c(x, y, z, t) \rangle$ ,  $\langle v_c(x, y, z, t) \rangle$  son las componentes de las corrientes superficiales determinadas por el modelo;  $W_x$  y  $W_y$  son las componentes del vector de viento y  $n$  es el porcentaje de la Tabla 2.

**Tabla 2.** Abatimiento de embarcaciones que no sean balsas salvavidas\*

Tipo de embarcación	Valor n en (9) x 100 %
Tablas a vela.	2
Veleros de gran desplazamiento y calado.	3
Embarcaciones a vela de desplazamiento medio, pesqueros tales como arrastreros, de pesca al curricán, atuneros, etc.	4
Cruceros deportivos grandes con cámara.	5
Cruceros deportivos ligeros con cámara, lanchas fueraborda, etc.	6

\* **Fuente:** Manual de OMI de Búsqueda y Salvamento (1987).

## >> Interfase amigable

La operacionalización del modelo requiere de un uso ágil teniendo en cuenta que se creó para ser utilizado diariamente como herramienta básica para el pronóstico de las condiciones oceanográficas y para la planeación de operaciones de búsqueda y rescate. Por este motivo se desarrolló una interfase amigable del modelo numérico en ambiente Windows, facilitando al usuario el manejo de los programas, de los datos y el procesamiento de los resultados o salidas.

La interfase está desarrollada en Microsoft Visual C++, aplicando programación orientada a objetos, e interactúa con programas escritos en FORTRAN. Para la entrega de resultados el sistema automatiza algunos procesos de graficación empleando SURFER, permitiendo extender la capacidad y potencialidad de su empleo.

El componente fue diseñado de manera tal que permita al usuario la manipulación del modelo en sus aspectos básicos sin que se pierda flexibilidad. De esa manera el usuario tiene control y facilidad de manejo sobre el sistema (Figura 8). Como una muestra, a continuación se hace referencia a los componentes principales de manejo de datos:

▪ Estados del Modelo: Régimen normal, Accidente y Re-inicialización.

▪ Componente Hidrológico: conformado por funciones de creación de archivos de líneas de costa y selección de archivos de línea de costa.

▪ Tarea de Derrame y Rescate: opción para seleccionar tipos de malla, sus características y visualización (Figuras 9 y 10).

▪ Manejo de Datos UKMO y NOAA: el sistema captura la información de meteorología (UKMO) manipulando los archivos de la manera requerida por el modelo. De la misma manera, procesa la información de satélite (NOAA) sobre TSM para la asimilación (Figuras 11 y 12).

▪ Corrida: ejecución del modelo de acuerdo a las tareas requeridas (Derrames o Búsqueda y Rescate).

▪ Resultados preliminares: permite la visualización gráfica de los campos 2D y 3D de corrientes, temperatura, salinidad, velocidad vertical y nivel del mar (Figura 13).

▪ Resultados: visualización gráfica de los parámetros físicos, estado de la mancha y trayectoria de la misma. En caso un accidente y rescate se presenta la trayectoria del artefacto.

▪ Ayuda en Línea: contiene información sobre el manejo del SPOD a través de la interfase amigable, facilitando al usuario la documentación necesaria para el manejo completo, autónomo e independiente del sistema.

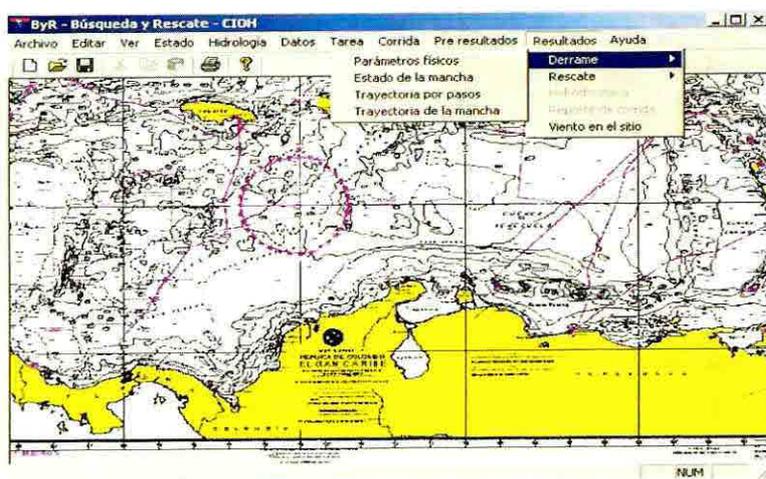


Figura 8. Menú del sistema de Búsqueda y Rescate.

**Derrame** [X]

Temperatura del aire, C°       Densidad, kg/m3:  
 Hidrocarburo       Agua

Intervalo de grabación, h       Número de trazadores

Paso del bloque de transporte, s       Difusión horizontal, m²/s

Tipo de fuente:  
 Instantánea      Duración, s   
 Continua

Cantidad hidrocarburo       Unidades:  
 Volumen, m3  
 Masa, t

Tipo de hidrocarburo:  
 Crudo  
 Combustible

Coordenadas:  
 X     Y     <->    Latitud       Longitud

Constante de Mackay: 5    Asfaltenes, %: 5    Destilación a 180°C, %: 10    Interacción con la costa: 0.5

Fórmula de Fingas:  
 Log  
 Sqrt

Constantes de evaporación:  
   

Tipo de malla:  
 Curvilínea  
 Rectangular

Figura 9. Parámetros de la tarea de derrame.

**Rescate** [X]

Intervalo de grabación, h       Número de trazadores

Paso de tiempo, s       Difusión horizontal, m²/s

Coordenadas:  
 X     Y     <->    Lat       Lon

Abatimiento de viento

Radio inicial de búsqueda  , en millas

Tipo de malla:  
 Curvilínea  
 Rectangular

Figura 10. Parámetros de la tarea de rescate.



Figura 11. Tratamiento de datos UKMO.

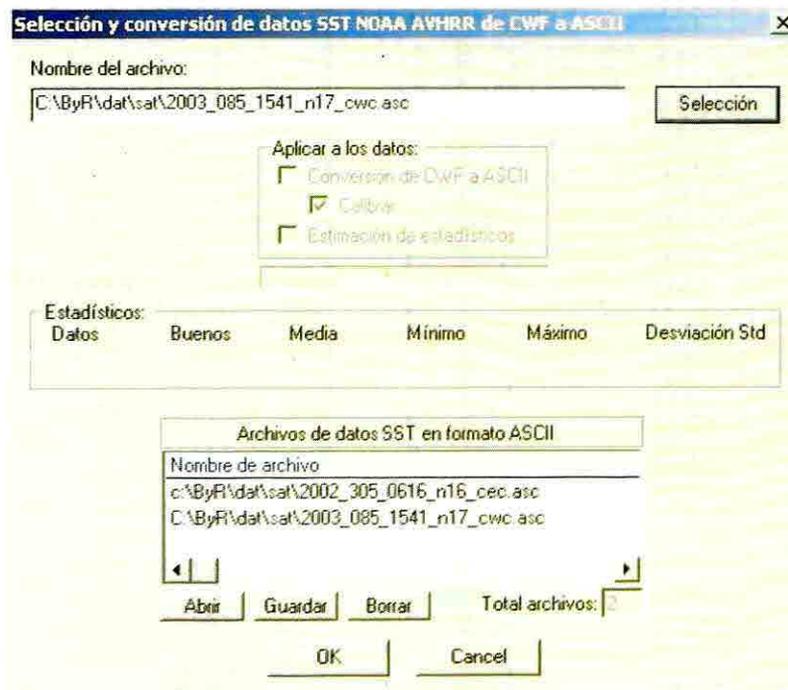
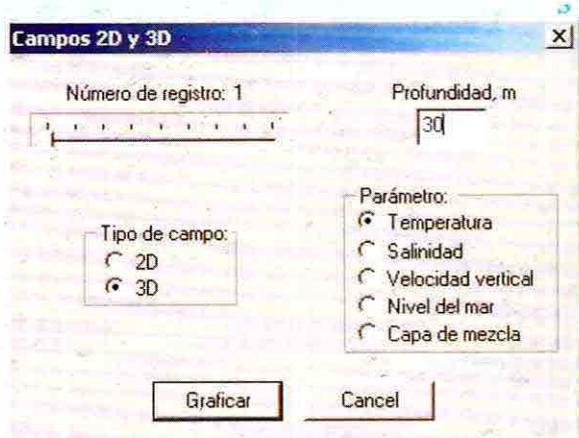


Figura 12. Procesamiento de datos TSM NOAA



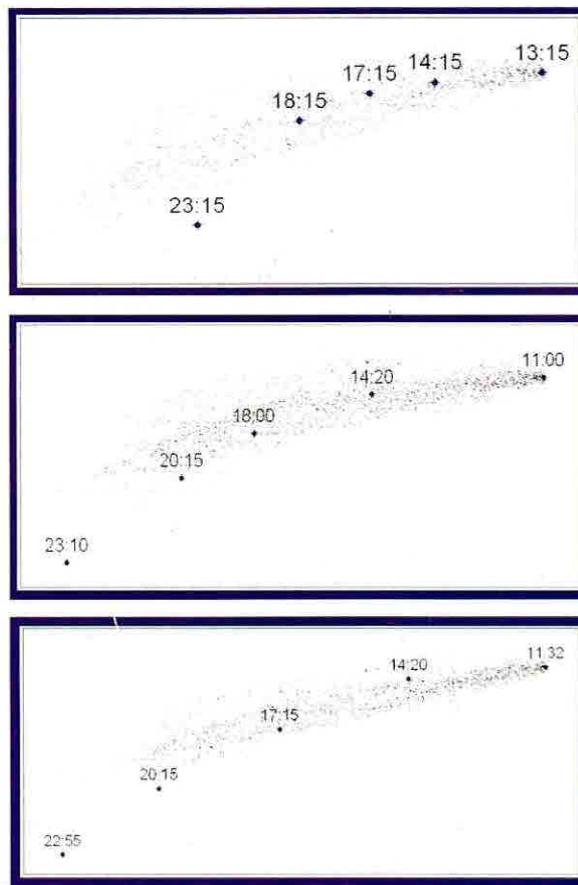
**Figura 13.** Selección de graficación de campos 2D y 3D.

## >> Discusión

Un sistema regional de pronóstico semejante fue realizado por Aikman *et al.* (1996) para el Atlántico Norte (*East Coast Ocean Forecast System, ECOFS*). El sistema también está basado en el uso del modelo POM, recibe la información de un modelo meteorológico (modelo ETA del NCEP, *National Center for Environmental Prediction*) y asimila los datos de la temperatura de la superficie y del nivel del mar, entre otros. El modelo se encuentra implementado en una malla curvilínea hasta un meridiano del Atlántico Norte y los nodos de la malla se densifican a lo largo de la costa de los Estados Unidos, incluso el área de La Corriente del Golfo. La resolución en la vertical consta de 15 niveles; en el espacio horizontal se presentan 181 x 101 nodos de cálculo con una resolución entre 10 y 20 Km. El propósito del sistema es reproducir los procesos oceanográficos en el tiempo real.

El sistema SPOD fue creado con varios propósitos, proyectando al futuro el servicio con la información operativa sobre el estado del mar. Sin embargo, inicialmente se propuso para apoyar en las operaciones de la búsqueda. Con este fin, el sistema fue probado en comparación con los datos de campo.

Durante el crucero oceanográfico a bordo del ARC "Malpelo" se efectuaron diferentes lanzamientos y seguimiento a balsas salvavidas en aguas de la Guajira, entre el 26 de marzo y el 7 de abril de 2003. La Figura 14 presenta algunos ejemplos de predicción de la trayectoria de la balsa. El proceso de simulación se inicia con un arranque en "caliente" empleando la climatología del mes de marzo. A partir del día 4 de marzo se realiza un cálculo continuo hasta el 31 del mismo mes con asimilación de los datos reales y el pronóstico de UKMO a 24 horas. Los ensayos con la balsa fueron realizados separadamente para cada día de lanzamiento, pero siempre partiendo del estado actual del modelo.

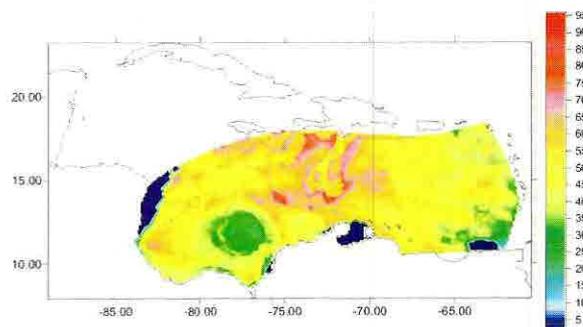


**Figura 14.** Desplazamiento de la balsa según las observaciones de ARC "Malpelo" durante el día 01 (arriba), 02 (centro) y 03 (abajo) de abril de 2003 (puntos azules) y la predicción del modelo (negros). Las horas están en GMT.

En la actualidad, las operaciones de búsqueda y rescate inician por una señal electromagnética activada desde las embarcaciones en emergencia. La señal alerta los centros de operaciones de los guardacostas de EEUU, con la posición geográfica del buque en cuestión. La información es entregada a la Armada Nacional de Colombia dando inicio a las operaciones respectivas. En muchos casos, en las aguas jurisdiccionales colombianas, se trata de embarcaciones que no tienen los equipos de emergencia adecuados y las operaciones de búsqueda y rescate se inician hasta con cinco días de retraso partiendo de cualquier posición en la ruta del buque. SPOD logra restituir las condiciones pasadas y pronosticar probabilísticamente la posición. Existen otros sistemas como el “*Maritime Search Planning*” (*Nacional SAR School*, Yorktown, Virginia) actualmente empleado por el Grupo de Guardacostas de Colombia, pero el software tiene una base empírica, muy simplificada, sin conexión con la historia real de los procesos, ni de época, ni puede resolver los fenómenos oceanográficos, ni su desarrollo hacia futuro.

SPOD fue diseñado no solamente para la planeación y desarrollo de operaciones de las unidades de la Armada Nacional de Colombia en las áreas de búsqueda y rescate y contingencias por derrame de hidrocarburos, sino también para la guerra antisubmarina. Las operaciones de guerra submarina y antisubmarina están basadas en el sigilo y en el conocimiento de las zonas acústicas de sombra y de la trayectoria del sonido en el mar. SPOD entrega la distribución del espesor de la capa de mezcla oceánica (Figura 15) y la estructura térmica de la columna de agua (Figura 16). La última sirve para la aplicación del Modelo de Predicción Acústica Submarina (PROPAS, Estrada, 1995) a bordo de las unidades de guerra de la Armada Nacional de Colombia.

La zona de la Guajira es, para la industria pesquera, uno de los pocos sitios en el mar Caribe en donde Colombia puede aprovechar estos recursos. El éxito de captura de peces está relacionado directamente con el conocimiento de la dinámica del mar. La zona de surgencia costera se ve enriquecida por los nutrientes y puede ser detectada por las temperaturas bajas del agua. La hidrodinámica (factores abióticos) de esta zona es relativamente alta y se caracteriza por un cambio significativo del orden de unos días cuando la extensión de la zona de surgencia varía drásticamente. El sistema desarrollado actualmente permite pronosticar dicha dinámica en el nivel abiótico (Figura 6). Si en un futuro se involucran al modelo la simulación de los nutrientes y el oxígeno (ciclos de nitrógeno y fósforo), el sistema será útil para las necesidades de la flota pesquera, minimizando los gastos mediante un monitoreo sistemático de la dinámica regional.



**Figura 15.** Ejemplo de la distribución del espesor de la capa de mezcla (en metros).

## >> Conclusiones

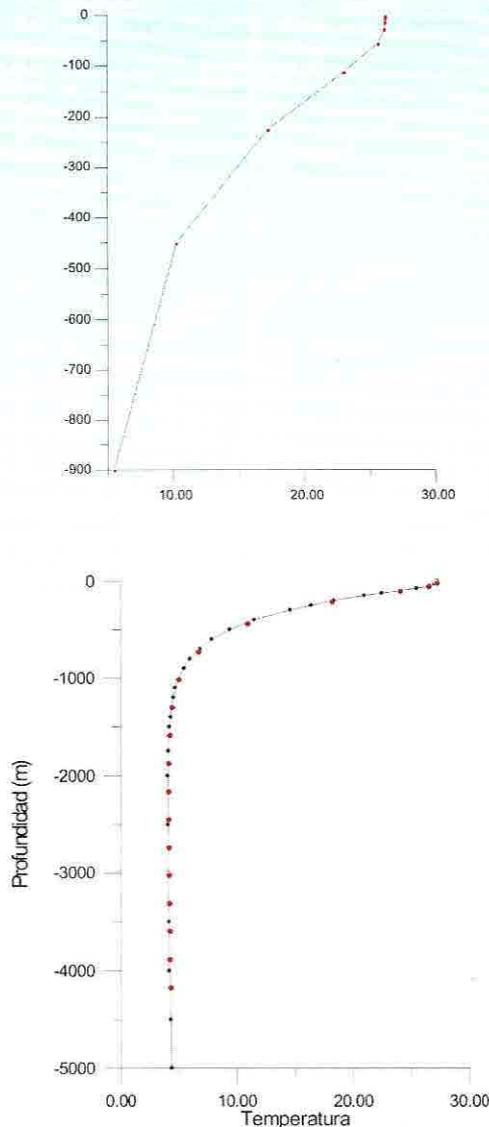
**S**POD se presenta como un sistema que integra un modelo de circulación oceánica con distintos bloques, orientados al transporte de hidrocarburos, objetos flotantes, asimilación de datos de sensores remotos y el uso de la información meteorológica pronosticada.

En la operación diaria del sistema, el usuario puede recibir la información sobre un diagnóstico y pronóstico a corto plazo (hasta 72 horas) de los campos hidrodinámicos en el mar Caribe (campos termohalinos, corrientes, etc.), los cuales permiten efectuar las operaciones navales y, junto con el pronóstico meteorológico, integrado en el mismo sistema, dar la proyección completa sobre el estado del mar en varias aplicaciones.

En el caso de un accidente, dependiendo de la tarea (búsqueda o derrame), uno de los bloques responsables por el transporte pronostica el movimiento de los artefactos o mancha, apoyando en el las operaciones de rescate o de planes de contingencia por derrame de hidrocarburos.

El componente meteorológico que ingresa al sistema proviene del modelo meteorológico global de la UKMO. Los datos de los sensores remotos de la NOAA permiten asimilar los campos de la temperatura de la superficie del mar y, en un futuro, otros parámetros oceánicos medidos desde satélites.

La implementación de este sistema ayudará en los estudios interdisciplinarios. En particular, el enlace con un bloque biótico permitirá utilizar el sistema en la oceanografía pesquera. No obstante, estudios climáticos en el mar Caribe se pueden realizar basándose en el modelo empleado.



**Figura 16.** Ejemplo de la distribución vertical de la temperatura de agua en los niveles del modelo (puntos rojos). Los puntos negros representan los niveles oceanográficos estándares.

El último aspecto considerado está abriendo las puertas para varios estudios multidisciplinarios, basados en el uso de SPOD. Uno de los ejemplos de este tipo es *Harvard Ocean Prediction System, HOPS* (Lozano *et al.*, 1996). Este sistema involucra el pronóstico oceánico en mesoescala, hidroacústica y biogeoquímica (submodelo de ecosistema del océano). Una interfaz gráfica hace un acceso fácil al sistema.

## >> Agradecimientos

El 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". El sistema desarrollado está basado en el modelo POM (Princeton Ocean Model; Blumberg & Mellor). Se utilizaron los siguientes datos de la NOAA: climatología de COADS (Atlas of Surface Marine Data 1994, US Dep. of Commerce); datos de NODC (National Oceanographic Data Center), WOD-98; datos de batimetría ETOPO-5 de NGDC 5-Minute Gridded Elevation Data Selection; y datos satelitales de CoastWatch NOAA-16 y NOAA-17 satellites. El flujo de información del pronóstico meteorológico de la Oficina Meteorológica del Reino Unido (UKMO) hace parte del uso operativo del sistema.

## >> Bibliografía

- Aikman III, F., Mellor, G.L., Ezer, T., Sheinin, D., Chen, P., Breaker, L., Bosley, K. & Rao, D.B. (1996). Toward an operational nowcast/forecast system for the U.S. East Coast. In: *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling*, edited by P. Malanotte-Rizzoli, Elsevier Sci., pp. 347-376.
- Da Silva, A.M. & Levitus, S. (1994). *Atlas of Surface Marine Data 1994*, NOAA, Wash., D.C.
- Estrada, H. (1995). Programa para la predicción acústica submarina PROPAS 1.0, CIOH.
- Kazakov, A.L., A.A. Lezhenin y L.S. Speranskiy, (1996). Resultados Preliminares del Estudio de la Capa Limite Mesometeorológica de la Atmósfera en la Costa Norte Colombiana Aplicando un Modelo Numérico, Boletín Científico CIOH, N. 17, pp. 17-26.
- Levitus, S. (2001). *World Ocean Atlas 2001*, NOAA Atlas NESDIS 54, Silver Spring, MD.
- Lonin, S.A., (1997). Guía para usuarios de un modelo acoplado océano y atmósfera para la plataforma Caribe colombiana. Versión 1.0., CIOH, Febrero de 1997.
- Lonin, S.A., (1999). Lagrangean Model for Oil Spill Diffusion at Sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 5, No. 5/6, pp. 331-336.
- Lonin, S.A., (2001). Informe actividades del año 2001. CIOH. Informe final DIMAR.
- Lonin S., Anduckia J., Parra C., Molares, R. (2003). Modelo de circulación oceánica con asimilación de datos para el Caribe aplicado en derrame de hidrocarburos, pesquería y búsqueda y rescate, Memorias del seminario nacional de Ciencias del Mar, Santa Marta, abril de 2003.
- Lozano, C.J., Robinson, A.R., Arango, H.G., Gangopadhyay, A., Sloan, Q., Haley, P.J., Anderson, L. & Leslie, W. (1996). An Interdisciplinary Ocean Prediction System: Assimilation Strategies and Structured Data Models. In: *Modern Approaches to Data Assimilation in Ocean Modeling*, edited by P. Malanotte-Rizzoli, Elsevier Sci., pp. 413-452.
- Mackay, D., Buist, I., Mascarenhas, R. & Petersen, S., (1980). *Oil Spill Processes and Models*. Environmental Protection Service, Canada, Report EE-8.
- Manual OMI de Búsqueda y Salvamento, (1987). Organización Marítima Internacional, Londres, 192 p.
- Matveev, L.T. (1984). *The Course of General Meteorology (Physics of Atmosphere)*. Leningrad, *Gidrometeoizdat*.
- Mellor, G.L. (1993). *User's Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation Numerical Ocean Model*, Princeton, NJ, 35 p.
- Monin, A.S. & Yaglom, A.M., (1971). *Statistical Fluid Mechanics*. Vol. 1, MIT Press, Cambridge, 696 p.