



APLICACIÓN DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA DURANTE LA EMERGENCIA DE DERRAME POR HIDROCARBUROS (ESTUDIO DE CASO DERRAME B/T SAETTA)

Ricardo MOLARES BABRA

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas - CIOH. Isla Manzanillo, Cartagena de Indias, AA. 982, D. T. y C., Colombia, E-mail: jsemon@cioh.org.co.

Resumen - Un modelo 2.5 D para derrame de hidrocarburos desarrollado en el CIOH (Lonin, 1999) cubre las aguas costeras y específicamente las áreas críticas tales como el Golfo de Morrosquillo, la Bahía de Cartagena y la Bahía de Santa Marta. Un modelo oceánico 3D (Lonin et al, 2004), optimizado mediante metodologías de asimilación de datos, fue aplicado al Mar Caribe con un bloque de derrames que permite, como en los casos anteriores, conocer la trayectoria de manchas de hidrocarburos, así como de sus cambios físico-químicos. Como soporte para las operaciones marítimas, se utiliza un modelo de oleaje que permite pronosticar el estado del mar.

Las herramientas antes mencionadas han sido empleadas durante recientes emergencias por derrame de hidrocarburos en la Bahía de Santa Marta (caso ALMA ATA: 5 de agosto de 2003) y frente a la Bahía de Cartagena (caso SAETTA: 20 de abril de 2005), logrando resultados que han sido validados con las inspecciones y fotografías aéreas tomadas en las áreas impactadas, evidenciando la bondad de los modelos utilizados.

El presente artículo presenta las características generales de los modelos numéricos, sus aplicaciones y los resultados obtenidos durante el caso de derrame de hidrocarburos desde el B/T SAETTA.

Abstract - A 2.5D oil spill numerical model developed by the CIOH is used in the domain of the colombian coastal water on the Caribbean as: Morrosquillo Gulf, Cartagena Bay and Santa Marta Bay. A 3D oceanic numerical model using data assimilation with an oil spill numerical block was implemented for oil spill forecast trajectory as well to know the physical and chemical changes in the Caribbean sea. As a support for marine operations, a wave model is used for sea state forecast.

The numerical tools before mentioned had been recently used during oil spills emergencies in Santa Marta Bay (B/T Alma Ata) and Cartagena Bay (B/T Saetta). The results were checked during field inspection.

This paper presents the results using numerical modeling during the B/T Saetta oil spill occurred in open waters close to Cartagena.

Palabras clave – Oceanografía Operacional, modelación numérica, derrame de hidrocarburos, Caribe.

Key words - Operational Oceanography, Numerical Modeling, Oil Spill, Caribbean.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras del Caribe colombiano se encuentran en gran amenaza ambiental debido a la posibilidad de que buques tanqueros produzcan derrames de crudo en el Mar Caribe. Esa amenaza es inminente teniendo en cuenta la proximidad de Colombia con Venezuela (quinto país en exportación de crudo a nivel mundial) y con el Canal de Panamá (Tráfico de buques obligado para el paso hacia y desde el Océano Pacífico).

Por otra parte, los puertos para la exportación de hidrocarburos en el Caribe colombiano se ubican en Cartagena y Coveñas principalmente, sumado al hecho de que existe un transporte fluvial de hidrocarburos desde Cartagena y Barranquilla con destino a las refinerías de Barrancabermeja.

Esa situación lleva a la necesidad de que Colombia se prepare para la atención de emergencias por derrame de hidrocarburos, siendo la predicción de la deriva de una mancha, uno de los elementos primordiales para que los buques y comités locales de emergencias, concentren los recursos y esfuerzos de recolección de la manera mas eficiente y eficaz, y de esa manera prevenir catástrofes ambientales.

Entre los años 1995 y 1998 el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (CIOH) en convenio con COLCIENCIAS, se desarrolló el proyecto de investigación: "Modelación numérica de la circulación costera y su aplicación al estudio de los procesos de transporte de sustancias y partículas contaminantes en el litoral Caribe colombiano", cuyo objetivo principal fue el de desarrollar herramientas numéricas que permitieran pronosticar la deriva de manchas de hidrocarburos derramados al mar (Lonin, 1997).

Alrededor del mismo proyecto se desarrolló el concepto del problema inverso en el caso de derrames, lo que permite determinar el volumen derramado así como la fuente del mismo horas después del evento (Lonin, 2001). En ambos casos las metodologías fueron desarrolladas para los sectores del Caribe colombiano con la mayor probabilidad de derrames; (a saber: Bahía de Cartagena, Golfo de Morrosquillo, Bahía de Santa Marta). Sin

embargo, la necesidad de entender y entregar información de fronteras a las mallas de cálculo de alta resolución en las aguas costeras llevó a la implementación de un modelo meteorológico a meso escala (Kasakov et al., 1996).

En sus inicios ese modelo meteorológico fue acoplado al modelo oceánico POM (Princeton Ocean Model), sin embargo los últimos desarrollos y mejoras realizadas por el Grupo de Investigación del CIOH empleando el modelo meteorológico de la UKMO (United Kingdom Meteorological Office) y asimilando TSM obtenida por un radiómetro AVHRR - Advanced Very High Resolution Radiometer (Anduckia., et al, 2003), se logró implementar un Sistema de Pronósticos Oceanográficos para todo el Mar Caribe (Lonin et al., 2003).

Los desarrollos anteriores llevaron al diseño de nuevos esquemas numéricos de cálculo acoplados al Sistema de Pronósticos para la predicción de la deriva manchas de hidrocarburos derramadas en el Mar Caribe y para la predicción de la deriva de buques en el Caribe (Lonin et al., 2004), lo que es actualmente aplicado por la Armada de Colombia en operaciones de búsqueda y rescate.

Una vez solucionado el problema de la deriva de manchas de hidrocarburos en aguas abiertas, se mejoró la estructura numérica y resolución de cálculo del modelo de derrames para la Bahía de Cartagena (Reporte final ASHIDRO, CIOH - 2004), para resolver detalladamente los procesos hidrodinámicos en las cercanías a la desembocadura del Canal del Dique y simular adecuadamente el transporte de la pluma turbia, siendo necesario adaptar el modelo en la parte física, consistente en: la utilización de una malla más densa (60-100 m. de resolución) para toda la bahía, la aplicación de un modelo de alto nivel de clausura de los momentos de turbulencia (Mellor & Yamada, 1974) y el uso del bloque de trazadores desarrollado (Lonin, 1999).

La validación y calibración de los modelos numéricos fue realizada con base en las guías para la documentación de la validación de modelos computacionales de la IAHR (Internacional Association for Hydraulic Researches) elaborada por Delft Hydraulics, CEDEX, DHI, HR Wallingford, entre otras.

Algunos resultados de validaciones fueron reportados por Anduckia et al., 2003, Lonin y López 2004, Anduckia y Lonin 2004, CIOH - ASHIDRO Reporte Final 2004. Además, los resultados de los cálculos han sido comparados con los resultados del proyecto del estudio de la geodinámica de la Bahía de Cartagena” (Lonin et al., 2004, Andrade et al., 2004).

El 20 de abril de 2005, la M/N SAETTA de bandera maltés derramó una cantidad de hidrocarburo del tipo IFO (Industrial Fuel Oil) que para el momento de la entrega del presente artículo aun no había sido establecida por las autoridades correspondientes. El derrame se dio por una ruptura del casco mientras la embarcación se encontraba maniobrando para salir de la Bahía de Cartagena utilizando el Canal Colonial (en el área de Bocachica). Esa situación se convirtió en la primera oportunidad real para la comprobación de los resultados del Sistema de Pronósticos Oceanográficos (SPOD) desarrollado por el CIOH.

METODOLOGÍA

Se presentan las características más relevantes de los modelos numéricos para derrames de hidrocarburos empleados durante la emergencia del B/T SAETTA, sin especificar la formulación matemática o parametrizaciones de los modelos, ya que esto se escapa de los propósitos del presente artículo. Esa información puede ser consultada en Reporte Final - CIOH - ASHIDRO 2004 y artículos citados.

Modelo CODEGO

El modelo fue creado para los dominios de tres dimensiones con el contorno suficientemente suave y con la superficie libre. En la ideología del modelo, todos los factores físicos de mayor importancia fueron considerados. Las ecuaciones básicas del modelo hidrodinámico son las de conservación del impulso donde, para la dirección vertical fue tomada la aproximación hidrostática, la ecuación de conservación de la masa en forma de la ecuación de incompresibilidad y la de estado, las ecuaciones de transporte de temperatura, salinidad, los bloques de transporte de sustancias (eulereano y lagrangiano) y el bloque de turbulencia.

Grilla de cálculo: Para la realización numérica del problema fue utilizado el método de las diferencias finitas. Si en la vertical se aceptó la coordenada adimensional (σ), ajustada al comportamiento del relieve del fondo, entonces para el caso de las coordenadas del plano X-Y se utilizó la grilla B según la clasificación de Arakawa. Para la Bahía de Cartagena fue diseñada una malla rectangular con una resolución de 100m.

Datos de entrada: La información de entrada del modelo se divide básicamente en lo relacionado con la hidrodinámica y con las características fisicoquímicas del crudo derramado. Se emplearon bases de datos batimétricas, oceanográficas, pronóstico de mareas y viento.

Resultados de la corrida de CODEGO: Durante los primeros momentos de la emergencia, las informaciones indicaban que el derrame se había producido en Bocachica. Empleando el modelo CODEGO, fue posible pronosticar el área de impacto de la mancha (véase figura 1) para las próximas 24 horas.

Estos resultados no pudieron ser comprobados, ya que la información inicial de la emergencia fue equivocada.

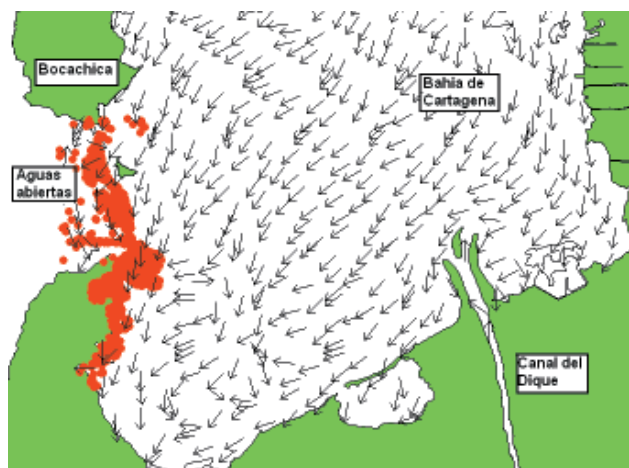


Figura 1. En rojo, pronóstico a 24 horas del área de impacto, si el derrame se hubiera dado en el Canal de Bocachica. Las flechas indican la corriente simulada durante el hipotético momento del derrame.

Sin embargo se demostró la capacidad del modelo como herramienta durante emergencias de desastre por derrame de hidrocarburos en la Bahía de Cartagena.

Sistema de predicción Oceánica de DIMAR (SPOD)

Una inspección en el área donde el B/T SAETTA sufrió la avería, determinó que en ese mismo instante no se ocasionó el derrame, y no fue sino hasta que la embarcación ancló en aguas abiertas cuando fue visible la mancha de hidrocarburo. Teniendo en cuenta que CODEGO no cubre aguas abiertas, fue empleado SPOD para determinar la deriva de la mancha.

SPOD es un sistema de pronóstico de las condiciones oceanográficas para gran parte del Mar Caribe, con una resolución mayor en 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, UK*), 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 período 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 (*National Oceanographic Data Center*) se utilizan para la fase de inicialización del modelo.

Grilla de cálculo: El área de cálculo que cubre el mar, se encuentra dispuesta en una malla curvilínea de 200 X 100 nodos, con una resolución horizontal desde 2 km en la costa Caribe de Suramérica (frontera sur) y hasta de 5 km a la altura de las Antillas Mayores (frontera norte). En la vertical, la malla está dividida en 18 niveles, siendo de mayor resolución en las capas superficiales.

Datos de entrada: En la tabla 1 se describen los datos de entrada para el pronóstico condiciones oceanográficas.

Resultados obtenidos de la modelación en aguas abiertas: Los cálculos numéricos efectuados de la dinámica marina en el Mar Caribe para el día del derrame (20/04/05), mostraron dos estructuras o frentes oceánicos (véase figura 2); el primero es la surgencia en las costas venezolanas extendiéndose hacia el noroeste unas 400 MN desde la península de la Guajira (véase figura 2, TSM 24/25 °C); el segundo es la contracorriente Panamá (véase figura 2, TSM 29/29.3 °C) que se extiende hasta Santa Marta.

Tabla 1. Datos de entrada a SPOD.

Información de Entrada	
En modo diagnóstico	El modelo es corrido diariamente, con lo que se mantiene actualizada la física del área de cálculo y la historia dinámica.
Batimetría	Proyecto ETOPO - 5 de NGDC 5 - Minute Gridded Elevation Data Selection.
Meteorología	Modelo metereológico UKMO.
TSM	Imágenes satelitales (AVHRR), correspondientes a las fechas de la emergencia. Fuente: CoastWatch NOAA - 16 y NOAA - 17 satélites.
Condiciones oceánicas en las fronteras	Datos climatológicos. Fuentes: COADS (Atlas of Surface Marin Data 1994, US Dep. of Commerce); NODC (National Oceanographic Data Center) y WOD - 98.

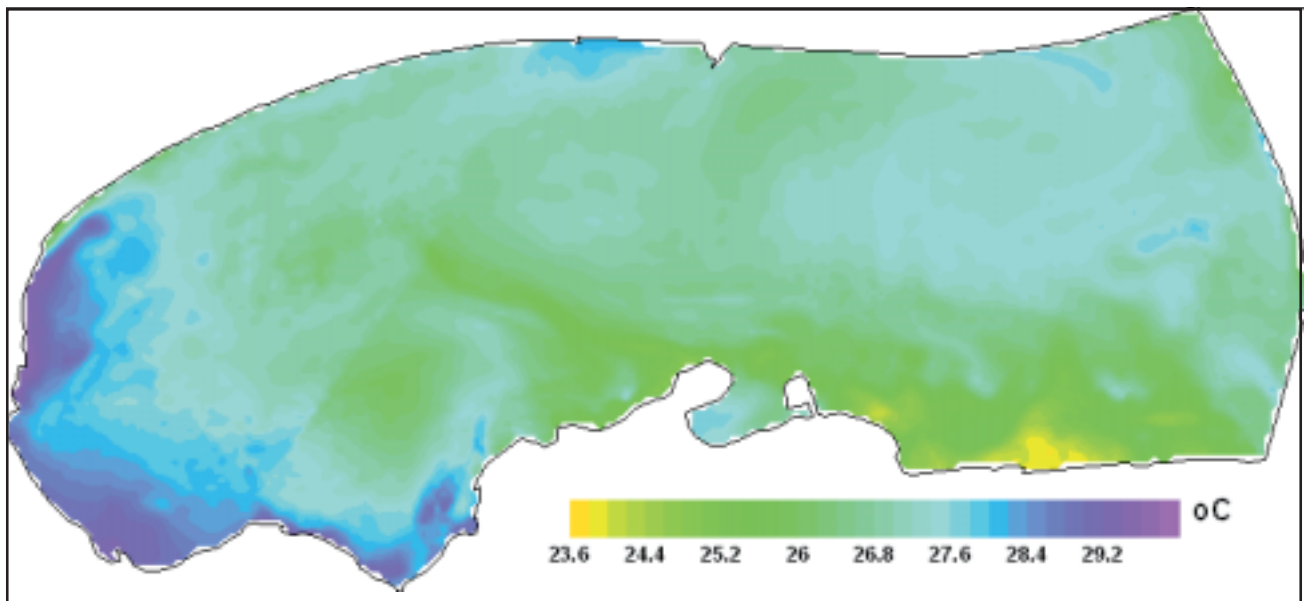


Figura 2. TSM del Mar Caribe calculada por SPOD para el 20/04/05, día del derrame.

Los resultados de la modelación de la dinámica superficial del mar (véase figura 3), mostraron la corriente Caribe en dirección noroeste con intensidades entre 1.5 y 1.7 m/s. A lo largo de la costa Caribe colombiana, se identifica la corriente litoral en dirección suroeste y con intensidades entre 0.5 y 0.2 m/s. La contracorriente Panamá, alejada pocas millas de la costa, ejerce su influencia hasta el área de

Santa Marta. Lo anterior como producto de la debilidad de los vientos alisios durante la época.

En la figuras 4 y 5 se describen para el momento del derrame, las corrientes superficiales desde Bocachica hasta las Islas del Rosario. La corriente litoral superficial (véase figura 4) se muestra con intensidades entre los 0.2 y 0.4 m/s

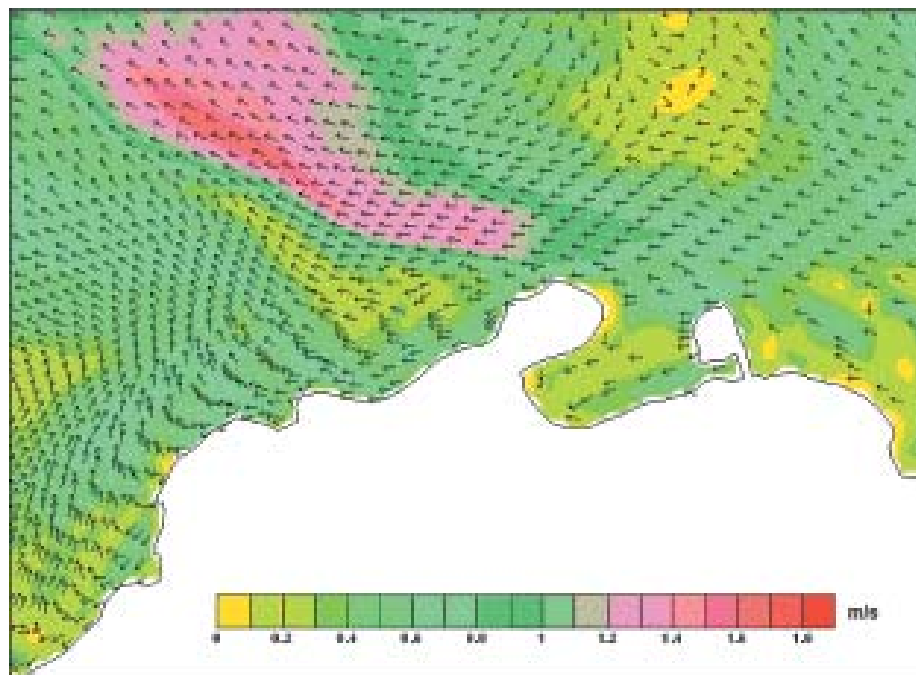


Figura 3. Corrientes generales calculadas con SPOD para el Caribe colombiano, de acuerdo con las condiciones océano-atmosféricas del 20/04/05.

en dirección suroeste. La influencia de la contracorriente de Panamá no es evidente en áreas cercanas a la zona del derrame, sin embargo a medida que un observador

se aleja de la costa, la corriente litoral describe un cambio en la dirección en el sentido de las manecillas del reloj (véase figura 4 y 5).

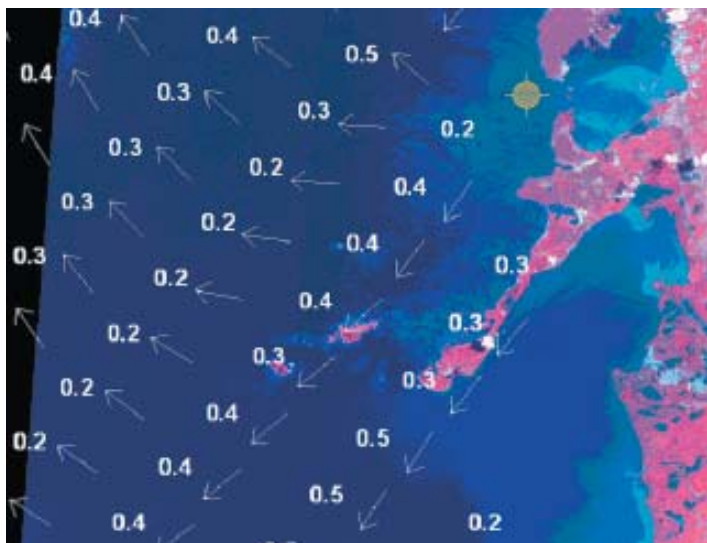


Figura 4. Corrientes superficiales calculadas por SPOD para el 20/04/05, día del derrame (velocidades en m/s). El círculo amarillo indica posición B/T SAETTA.

Esos resultados demostraron la posibilidad de que la mancha derramada derivara inicialmente hacia el suroeste en dirección a Punta Barú y las Islas del Rosario, poniendo en peligro ambiental a esos sectores.

cual se aplicó la metodología estándar estimando el movimiento de la mancha a partir de la suma de vectores del viento (usando el 3% de la velocidad del viento) y la corriente superficial simulada.

Debido a la cercanía del sitio del derrame con la línea de costa, los cálculos numéricos de la deriva de la mancha con el modelo numérico no arrojarían resultados satisfactorios, por lo

Como resultado de lo anterior, la figura 5 muestra el pronóstico efectuado, así como el movimiento de la mancha entre los días 20 y 21 de abril.

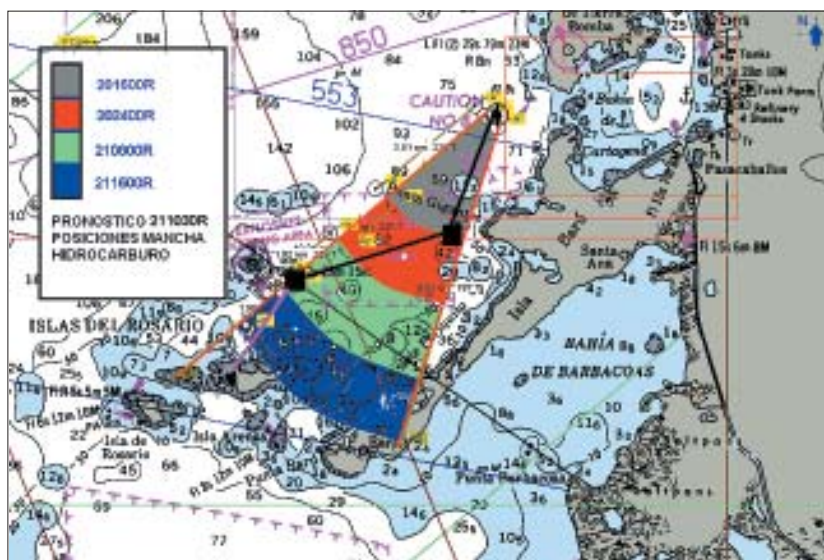


Figura 5. Pronóstico de la deriva de la mancha entre el 20 de abril a las 16:00 y el 21 de abril a las 16:00. La línea negra dentro del cono de probabilidad muestra la trayectoria real efectuada por la mancha dentro del mismo lapso de tiempo.

Dos días posteriores al derrame, una estimación de la cantidad de producto derramado basado en lo observado por los equipos de recolección, y comparado con los cálculos efectuados a bordo del B/T SAETTA para determinar la cantidad de fuel oil derramado, arrojó grandes incongruencias, por lo que se efectuaron vuelos de comprobación para determinar la existencia de otras manchas que no habían sido

observadas, pero sin resultados.

Fotografías submarinas (véase figura 6) tomadas en cercanías a las zonas impactadas permitieron observar la existencia de esferas de producto en las capas subsuperficiales, que al emulsionarse aumentaron su densidad, sumergiéndose. Así entonces, existía la posibilidad de que producto emulsionado y sumergido, continuara derivando en algún lugar.



Figura 6. Producto emulsionado a la deriva en los niveles subsuperficiales. (Fotografía tomada por el INVEMAR).

Los resultados de un cálculo de corrientes verticales en superficie efectuado el 24 de abril, sugirieron que además del hundimiento del producto emulsionado

debido a los cambios en su densidad, existían zonas de hundimiento de aguas frente a Cartagena (véase figura 7, color verde).

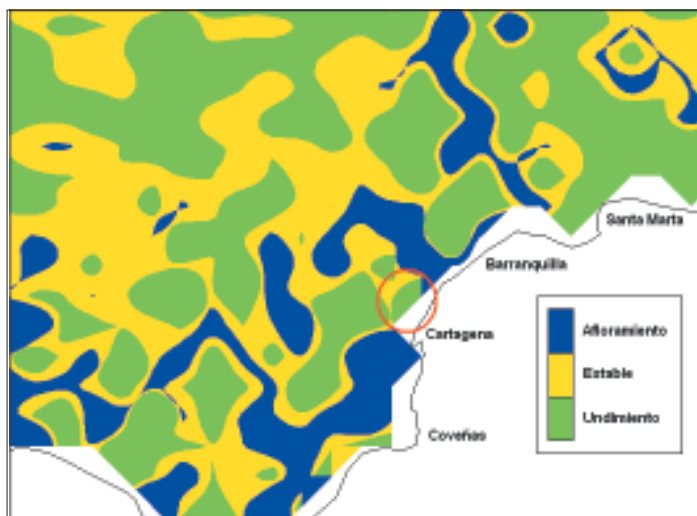


Figura 7. Cálculo de corrientes verticales efectuado el 24/04/05. Los colores indican zonas de afloramiento y de hundimiento. El círculo ubica un área de hundimiento en la zona impactada por el derrame.

Cualquiera que fuera el mecanismo de hundimiento del producto, la deriva de esas manchas subsuperficiales estaría influenciada

directamente por las corrientes de los primeros metros. La figura 8 muestra los resultados del cálculo de corrientes en esos niveles.

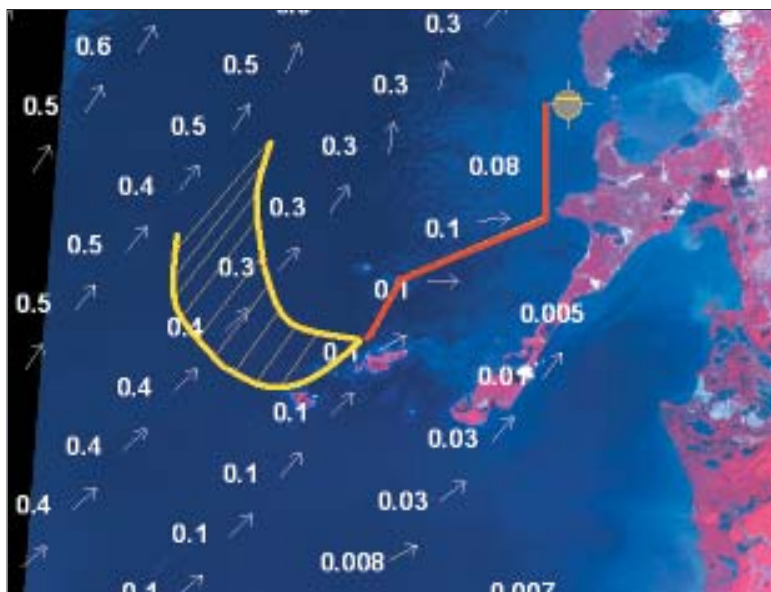


Figura 8. Corrientes subsuperficiales calculadas con SPOD, para el 26/04/05 (velocidades en m/s). El círculo amarillo indica posición B/T SAETTA. La línea roja muestra el trayecto de la mancha principal en superficie. El cono amarillo muestra el pronóstico de dirección del producto a la deriva en niveles subsuperficiales.

Las corrientes subsuperficiales calculadas (véase figura 8) indican un flujo contrario al de las corrientes superficiales (véase figura 4), lo que pudo ocasionar que el producto sumergido se dirigiera a aguas abiertas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente estudio se demostró la efectividad de aplicación de herramientas numéricas durante emergencias por derrame de hidrocarburos, teniendo en cuenta que los resultados entregados por SPOD permitieron pronosticar la deriva de una mancha de hidrocarburo derramada por el B/T SAETTA. Lo anterior permitió a las autoridades tomadoras de decisiones, contar con información oportuna y muy aproximada sobre la dinámica de la mancha para atender la emergencia ambiental.

Los resultados del cálculo de corrientes superficiales (véase figura 4) y el seguimiento real de la mancha (véase figura 5), demuestran que durante las primeras horas y días del derrame, el producto derivó al suroeste debido al efecto combinado del viento y las corrientes superficiales. Una vez

comenzó el proceso de emulsificación del producto, las partículas aumentaron su densidad, lo que combinado con el hundimiento de las aguas en la zona (véase figura 7), produjo que una parte del producto se sumergiera (véase figura 6), siendo directamente influenciado por las corrientes subsuperficiales que redireccionaron la mancha sumergida en dirección noroeste (hipótesis basada en el cálculo de SPOD, Figura 8). Esa hipótesis también se basa en el hecho de que la cantidad de producto recogido por las brigadas de limpieza fue menor al cálculo de volumen efectuado a bordo del buque tanque (afirmación efectuada por el comité local de emergencias y desastres, durante las reuniones de coordinación operativa), con lo que se concluye que hubo hidrocarburo que no impactó las islas y que debió redireccionarse a aguas abiertas, derivando a una profundidad entre los 2 y 10 metros.

Por otra parte, durante los reconocimientos aéreos para la detección de manchas a la deriva y verificación de la presencia de hidrocarburos en aguas abiertas y al sur de Punta Barú (Golfo de Morrosquillo), no se encontraron vestigios del derrame.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Andrade, C. A., Y. F. Thomas, S. Lonin, C. A. Parra, L. Menanteau, M. Cesaraccio, S. Kunesch, A. Andreau, S. Velasco y C. Piñeres (2004). Aspectos morfodinámicos de la Bahía de Cartagena de Indias, *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 90-104.
- Anduckia, J. C., S. Lonin y S. Ivanov (2003). Asimilación de datos (TSM) en el modelo pronóstico de las condiciones oceanográficas del Mar Caribe, *Boletín Científico CIOH*, (21), pp. 38-50.
- Anduckia, J. C., S. Lonin, R. J. Molares y C. A. Parra (2003). Validación de imágenes satelitales de temperatura superficial del mar mediante observaciones in situ., *Boletín Científico CIOH*, (21), pp. 28-37.
- Anduckia, J. C. y S. Lonin (2004). Efecto residual de la nubosidad en la asimilación de la temperatura superficial del mar. *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 36-44.
- Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas (2004). Grupo de Investigación en Oceanografía Operacional, Reporte final proyecto ASHIDRO, Cartagena.
- Kasakov, A. L., A. A. Lezhenin y L. S. Speransky (1996). Resultados preliminares del estudio de la capa límite meso meteorológica de la atmósfera en la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico, *Boletín Científico CIOH*, (17), pp. 17-26.
- Lonin, S. (1997). Hydrodynamic modelling and the problem of oil spills on the colombian Caribbean shoreline, *Spill Technology Newsletter*, 22, (1-4), pp. 1-6.
- Lonin, S. (1999). Lagrangian model for oil spill diffusion at sea. *Spill Science & Technology Bulletin*, 5, (N. 5/5-6), pp. 331-336.
- Lonin, S. (2001). Modelación numérica de derrame de crudo y un concepto del problema inverso, *Boletín Científico CIOH*, (19), pp. 15-22.
- Lonin, S., J. C. Anduckia, C. A. Parra y R. J. Molares (2003). Sistema de Pronóstico de las Condiciones Oceanográficas del Mar Caribe, *Boletín Científico CIOH*, (21), pp. 8-27.
- Lonin, S., J. C. Anduckia, C. A. Parra y R. J. Molares (2003). Modelo de circulación oceánico con asimilación de datos para el Caribe, aplicado en derrame de hidrocarburos, pesquería y búsqueda y rescate, *Contribuciones en ciencias del mar en Colombia*, Universidad Nacional de Colombia, pp. 103-119.
- Lonin, S. y L. A. López (2003). Pronósticos del viento a partir de los modelos MM5 y UKMO en el Caribe. *Boletín Científico CIOH*, (21), pp. 51-65.
- Lonin, S., C. A. Parra, C. A. Andrade, Y. F. Thomas (2004). Patrones de la pluma turbia del Canal del Dique en la Bahía de Cartagena, *Boletín Científico CIOH*, (22), pp. 77-89.
- Mellor, G. y T. Yamada (1974). A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J. Atmos. Sci.*, (31), pp. 1791-1806.