

# Modelación Numérica de Derrames de Crudo y un Concepto del Problema Inverso

SERGUEI A. LONIN<sup>1</sup>

## RESUMEN

**R** El presente trabajo, esta basado en resultados previos, obtenidos en el proyecto de la modelación numérica de derrames de hidrocarburos. Los modelos creados pronostican la posición y características de la mancha, pero en algunas situaciones es necesario conocer el lugar de ocurrencia del derrame y su cantidad, por ello un nuevo concepto sobre el problema inverso ha sido utilizado, el cual contempla dos partes: La búsqueda de la posición de derrame a través del método modificado de pruebas y errores y la determinación del volumen derramado, solucionando las ecuaciones conjugadas de transporte de la mancha.

## ABSTRACT

This paper is based on previous results obtained from the numerical modeling project of oil spills. The created models forecast the oil slick position and its characteristics, but sometimes it is necessary to know

where the spill occurred and the spill amount. A new concept of the inverse problem has been utilized in this paper. This concept consists of two parts: a) Spill position search through the modified method of trials and errors and b) Spill volume determination solving the conjugate equations of the slick transport.

## INTRODUCCIÓN

Durante el período comprendido entre 1995 y 1998, el CIOH desarrolló un sistema de pronóstico de derrames de hidrocarburos para las tres zonas de alto riesgo en el litoral Caribe colombiano: el Golfo de Morrosquillo, el área de Santa Marta y la Bahía de Cartagena; el cual ha sido utilizado en varias aplicaciones de estudios del medio marino (resultados publicados en los boletines científicos del CIOH números 16, 17 y 18 y Lonin, 1997).

El sistema incluye un modelo acoplado océano-atmósfera para la plataforma continental entre Rihacha y el río Sinú y los modelos

hidrodinámicos incluido el bloque de crudo para las tres zonas de probable impacto.

El modelo acoplado fue creado con base en el modelo oceánico POM (Blumberg & Mellor, 1987) y el modelo meso - meteorológico de la capa límite de la atmósfera MOHAN (Kazakov et al., 1996); mientras que el modelo hidrodinámico para las zonas de impacto (CODEGO CIOH) se basó en el MECCA (Hess, 1989).

El modelo está dirigido a obtener el pronóstico de los principales parámetros hidro-meteorológicos (nivel del mar, campos de temperatura y salinidad de agua, vientos, temperatura y humedad de aire, etc.), es decir, los datos se obtienen al concretar el pronóstico de los Centros Regionales de Pronósticos a corto plazo, aumentando su resolución espacial y temporal.

Como se estableció en los estudios de sensibilidad del modelo de

<sup>1</sup> Ing. Oceanólogo, Ph.D., Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. E-mail: slonin@sirius.enap.edu.co

derrame de crudo, para el caso de la Bahía de Cartagena el modelo fue muy sensible a los datos sobre el viento (dirección e intensidad), mucho menos sensible a la información sobre la marea y a su variabilidad espacial y prácticamente insensible a los datos hidrológicos y los demás parámetros meteorológicos (Otero y Pineda, 1998). Esta observación no es válida para las áreas oceánicas como el Golfo de Morrosquillo y el área profunda de Santa Marta, donde el patrón oceánico de la circulación es predominante.

Por lo tanto, conociendo el comportamiento del viento en la zona, calculando las corrientes y los parámetros de turbulencia en una malla de cálculo, fue posible pronosticar el futuro de una mancha de crudo derramado. Su desplazamiento es una mezcla de los procesos físico-ambientales y las propiedades físico - químicas del hidrocarburo. Una vez creado, el sistema acepta estos elementos como propiedades internas si son conocidas con uno u otro grado de exactitud. En cualquier caso, existen otros elementos de carácter externo: La posición del derrame, su intensidad y duración y finalmente, la cantidad total de hidrocarburo que ha sido derramado.

Cuando se observa una mancha de hidrocarburo en el mar es necesario conocer estos elementos y en este caso la tarea se convierte en un problema inverso: Determinar la posición y/o la cantidad de derrame según observaciones posteriores sobre la posición, la forma y en lo posible las características físico - químicas del hidrocarburo en el agua, unas horas después del derrame. El objetivo del estudio fue el de dar una imagen del tema y formar un concepto teórico del desarrollo de los problemas inversos en este sentido. En la práctica mundial dicho problema se resuelve en forma muy sencilla, pero no garantiza siempre el éxito de la simulación en escalas pequeñas. Esta circunstancia fue el incentivo para desarrollar el presente estudio.

## BASES CONCEPTUALES

La bibliografía sobre el problema inverso es escasa. Un ejemplo de la aplicación común, se encuentra en el trabajo de Spaulding et al. (1989). Usualmente, para determinar el sitio del derrame, se utilizan los modelos con el recorrido hacia atrás, es decir, los campos vectoriales del viento y las corrientes se colocan con el signo menos y la dispersión no se tiene en cuenta. En algunos casos, un factor probabilístico se introduce para reducir el error relacionado con la ausencia del proceso de difusión en los modelos de este tipo (Fingas, comunicación personal). El modelo de transporte, en general, es un modelo en coordenadas de Lagrange.

La metodología supone un centro de masa para la mancha de crudo y el conjunto de trazadores (partículas matemáticas) está concentrado en un área "uni-continuo". En otras palabras, cuando el contorno cerrado de un conjunto (de trazadores) es posible concentrarlos en un solo punto sin cruzar las áreas que no pertenecen al mismo conjunto, entonces, el conjunto es "uni-continuo" y él tiene un solo centro de masa. La Figura 1, refleja esta situación, y otra diferente, cuando el conjunto es "multi-continuo" y contiene dos centros de masa.

El caso presentado en la Figura 1a es simple, porque la posición inicial (punto 1) es fácil de obtener, recorriendo el modelo hacia atrás.

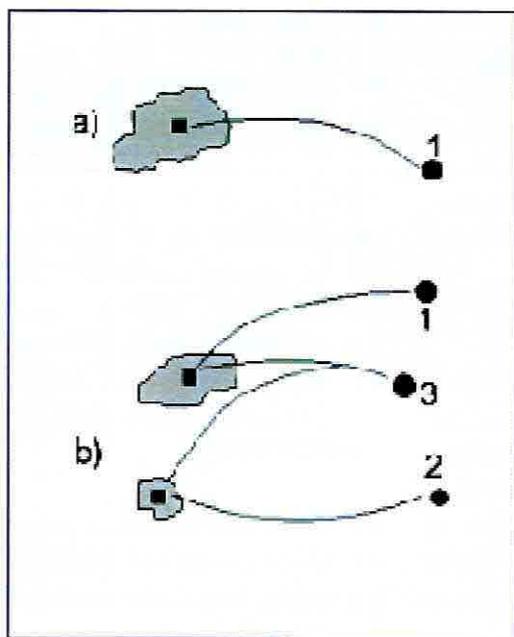


Fig. 1 Ejemplos de un conjunto de trazadores "uni-continuo" (a) y "multi-continuo" (b). Los cuadrados muestran los centros de masa. Puntos 1 y 2 son puntos iniciales del derrame, obtenidos por el recorrido hacia atrás en una solución del problema inverso; el punto 3 en el caso (b) - posición inicial verdadera del derrame.

En la Figura 1b se observa que después del recorrido resultan los puntos 1 y 2, como dos puntos iniciales del derrame. Sin embargo, el derrame podría ocurrir en un solo punto (3) y la ruta de la mancha simplemente se bifurcó después de un momento.

El anterior ejemplo es ilustrativo para mostrar que el método utilizado en la práctica mundial no es válido cuando: En primer lugar, se consideran escalas espaciales bastante pequeñas y en segundo lugar, no es posible formalmente unir las distintas manchas en la Figura 1b en un solo conjunto con un solo centro de masa. Esta situación se presenta en el caso de la Bahía de Cartagena. La Figura 2, refleja una materialización en la realidad del ejemplo teórico mostrado anteriormente.

Como se observa en la Figura 2,

la mancha después de 24 horas de un derrame hipotético, se dividió en dos partes independientes y en este caso, es imposible indicar un solo centro de masa para todo el crudo. Consecuentemente, es imposible definir el punto de derrame aplicando la metodología anterior.

La situación demostrada en la Figura 2 y una alta probabilidad de su ocurrencia se explica con ayuda de las Figuras 3 y 4.

Según la Figura 3, la intensidad del viento superó el valor de  $5 \text{ ms}^{-1}$  en las horas 6, 7 y 17 después del derrame. Teniendo en cuenta que este valor es el umbral del viento para la emulsificación (Spaulding et al., 1993) con formación de gotas de aceite en agua, una parte de crudo se fue de la superficie y penetró a la columna de agua. En las horas 6 y 7 la cantidad de crudo en

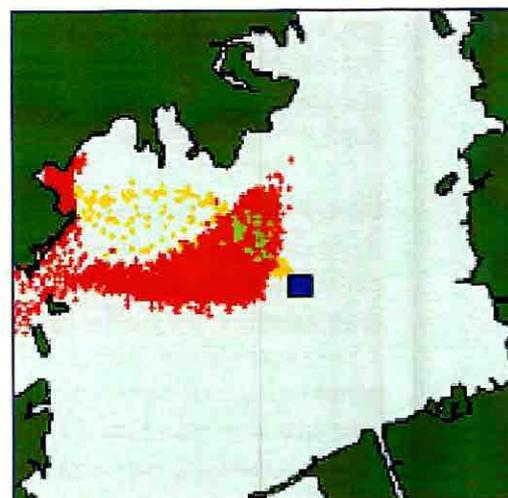


Fig. 2 Comportamiento de una mancha de petróleo en la bahía de Cartagena, después de un derrame hipotético en el punto marcado por el cuadrado azul. Las partículas rojas presentan la posición de la mancha luego de 24 horas; las amarillas - la huella histórica; las verdes - emulsión "aceite en agua". Un escenario simulado para la época seca.

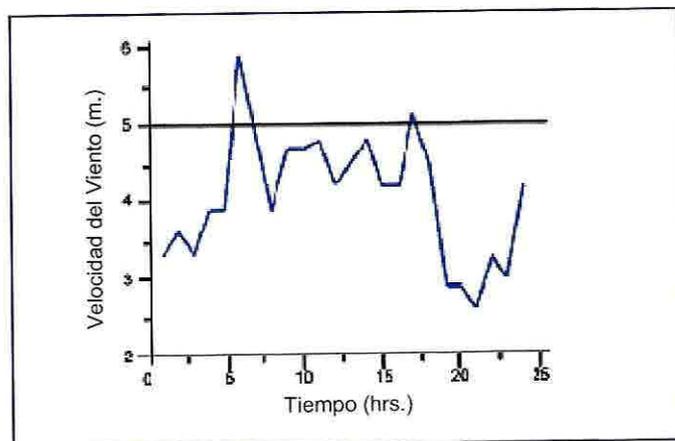


Fig. 3 Comportamiento del viento durante el periodo de cálculo. Se ha marcado el umbral del viento (el valor de  $5.0 \text{ m s}^{-1}$ ) para emulsificación del crudo.

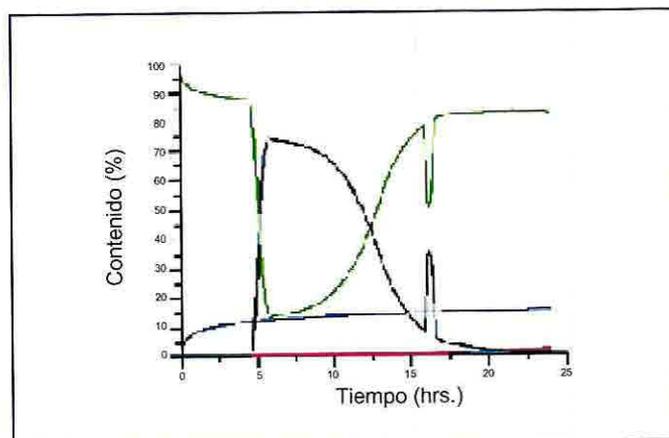


Fig. 4 Comportamiento temporal de la masa de crudo (en % de la masa inicial) en la superficie (línea verde), en la emulsión (negra), la parte evaporada (azul) y en la costa (roja). El mismo escenario de la época seca.

emulsión llegó hasta un 75 % de la masa inicial, y para la hora 17, el crudo nuevamente se emulsificó desde 8 hasta 35 %.

De esta forma, observando la Figura 2, es claro que el comportamiento del crudo derramado inicialmente en la superficie de agua fue debido a la influencia del viento y las corrientes superficiales, 6 horas mas tarde una gran parte (75%) del hidrocarburo se sumergió, mientras que el resto continuó su desplazamiento superficial evaporándose (huella amarilla en la Figura 2).

La parte emulsificada sufrió la influencia de otro sistema de corrientes en la columna de agua mientras hubo debilidad en el viento; después de un lapso de tiempo, apareció nuevamente en la superficie desplazándose en otra dirección.

Ahora bien, suponiendo que por observaciones posteriores, se conoce la posición de la mancha 24 horas después del derrame (la configuración de la mancha roja en la Figura 2) pero no la posición de origen. En este caso, no es posible hallar el centro de masa de la mancha y por supuesto, la metodología de pasos negativos en el tiempo, da un resultado equivocado. El método tampoco podría dar respuesta sobre la cantidad de crudo derramado. La solución a este problema se debe hallar en el desarrollo de otro método, que esté en capacidad de resolverlo.

## METODOLOGIA

La parte de la física-matemática, cuando se busca el estado inicial del sistema o sus propiedades internas a través de la señal en la salida, se refiere a los problemas inversos o no correctos (mal planteados). Para su solución existen varios métodos, dentro de los cuales se pueden señalar los trabajos del académico Guriy Marchuk (Marchuk & Penenko, 1979). La experiencia del autor está relacionada con la aplicación de esta teoría al estudio de factibilidad de la construcción de un terminal petrolero en el Mar Negro (Lonin & Tuchkovenko, 1995).

La formulación del problema en general, se plantea de la siguiente forma: Se supone que en el momento  $t = T$  después del derrame, se conoce la forma y ubicación de la mancha. Esta información puede ser obtenida a través de observaciones aéreas (fotografías) u otros tipos de observación. El momento  $T$  también podría ser determinado a través de muestreos físico - químicos de la mancha, conociendo el tipo de crudo y sus características de envejecimiento. La tarea será hallar la posición de derrame  $(X_0, Y_0)$  y su volumen  $V_0$ .

En términos generales, la ecuación de evaluación de la mancha tiene la siguiente forma:

$$LC = f = = Q\delta(x - x_p)\delta(y - y_p)\delta(z = 0)\delta(t = 0), \quad (1)$$

donde,  $L$  es operador diferencial en el espacio y el tiempo que afecta a la concentración  $C$ ;  $Q$  - capacidad de la fuente;  $\delta(x)$  - delta - función de Dirak;  $z$  - coordenada vertical.

Formalmente, la parte derecha de la ecuación (1) debe tener otros términos relacionados con los procesos de evaporación, emulsificación, etc. La ecuación presenta solamente la parte superficial de la mancha y las condiciones de contorno más la inicial  $C(t=0)=0$  deberían ser dadas. El área de integración  $\Omega$  se supone como un área regular con el contorno  $\delta\Omega$  suficientemente suave y el intervalo de integración definimos como  $t \in [0, T]$

Se construirá el problema conjugado a (1) para una función conjugada  $C^*$  en el intervalo del tiempo  $t \in [0, T]$ :

$$L^*C^* = p, \quad (2)$$

donde,  $L^*$  es el operador conjugado al  $L$ ;  $p$  es una función aun no definida. Es importante señalar que la ecuación (2) se resuelve en el sentido contrario del tiempo.

Introduciendo el concepto de la multiplicación escalar de dos funciones  $a$  y  $b$  en el espacio de Gilbert,

$$(a, b) = \int_0^T dt \int_{\Omega} abd\Omega,$$

se formula de (1) y (2), la idea

de la presentación dual del siguiente funcional:

$$J = (f, C^*) = (C, p). \quad (3)$$

Se define el sentido del funcional  $J$ , determinando en forma arbitraria el significado de la función  $p$  a través de la parte derecha de la expresión (3). Se define  $p$  como:

$$p = \begin{cases} 1, (x, y) \in \Omega_+ \\ 0, (x, y) \notin \Omega_+ \end{cases} \quad (4)$$

donde,  $\Omega_+$  es la parte del dominio, ocupada al momento  $t=T$  con el crudo (según datos de observaciones).

Entonces, según la parte derecha de la expresión (3), el funcional  $J$  presentará la masa total de hidrocarburo menos sus pérdidas relacionadas con los procesos de evaporación y emulsificación. Resolviendo la ecuación conjugada (2) y comparando el área de la mancha observada con los valores calculados de  $J$ , es posible estimar la cantidad de derrame. La dificultad se presenta en lo siguiente: Al buscar el volumen derramado, a través de la parte izquierda de la expresión (3), se debe conocer el punto de derrame  $(x_0, y_0)$ , información que se muestra en la función  $f$ , o en el espesor de la mancha en el momento de observación. Usualmente, el valor del espesor no es conocido por mediciones ni se conoce su variabilidad espacial, por lo cual, es difícil cerrar el problema completamente. Una de las alternativas para hallar la posición

$(x_0, y_0)$ , paralelamente a la búsqueda del volumen derramado, es la utilización de la teoría de las perturbaciones pequeñas, de igual manera como fue realizado en Lonin y Giraldo (1996), en la restitución de los campos de viento a través de las mediciones en algunas estaciones terrestres.

Sin embargo, dicha teoría sirve solamente cuando se tiene que precisar la posición en una vecindad pequeña de  $(x_0, y_0)$ . En el caso cuando las coordenadas  $(x_0, y_0)$  pueden variar dentro de  $\Omega$  completamente libres, parece que la siguiente alternativa es válida y fácil de realizar. "El método de pruebas y errores", es una posibilidad para encontrar las coordenadas  $(x_0, y_0)$ , variándolos  $K$  veces, cuando  $K$  es un número mayor y la cantidad enorme de tareas permiten examinar las posibilidades (en el sentido finito y discreto), comparando los resultados con la posición de la mancha observada  $\Omega_+$  en el momento  $t=T$ . El problema es la ineficiencia del método desde el punto de vista computacional y por esta razón se modifica.

En el problema directo (1), o, utilizando el sistema creado para el pronóstico de crudo en coordenadas de Lagrange, se coloca una cantidad mayor de "fuentes", distribuidas aleatoriamente en el espacio  $\Omega$ :

$$x_0 = \eta(x_k)M, \quad y_0 = \delta(y_k)N, \quad k = 1, \dots, K, \quad (5)$$

donde,  $\eta$  y  $\delta$  son "ruido blanco" de la intensidad unitaria;  $M$  y  $N$

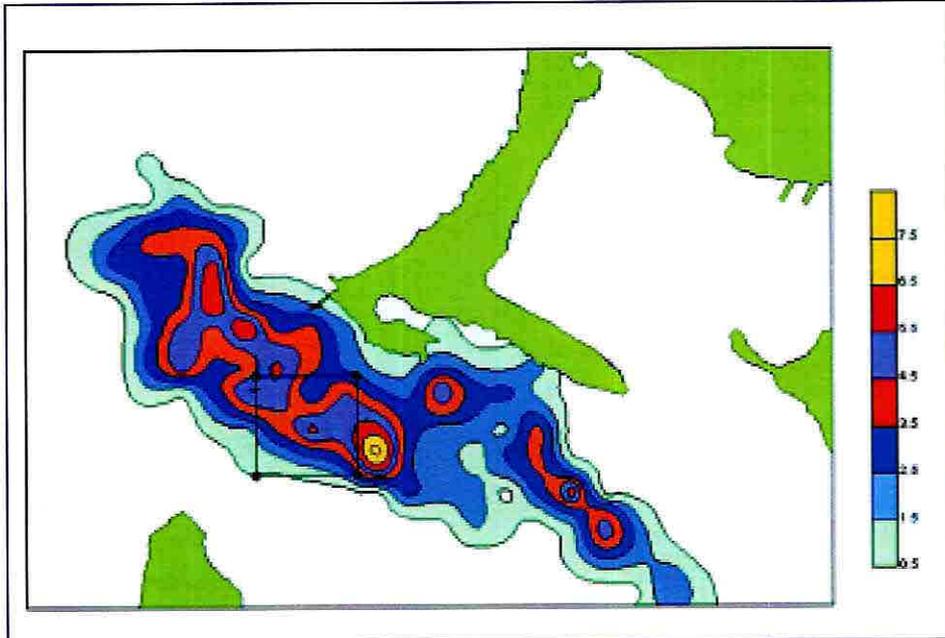


Fig. 5 Distribución cuasi - uniforme de las fuentes de derrame para el momento inicial. Cantidad de partículas  $K = 10^4$ .

- tamaños del dominio por  $x$  y  $y$ , respectivamente.

## RESULTADOS

La Figura 5 muestra la distribución inicial (5) de las "fuentes", distribuidas uniformemente en la Bahía de Cartagena. Entonces, el problema inverso se convierte en un problema directo pero, con una cantidad enorme (teóricamente



La Figura 6 muestra el resultado del cálculo en términos probabilísticos. El cuadrado indica la zona de observación donde se supone hipotéticamente la posición de la mancha de crudo, observada 24 horas después del derrame. Entonces, conociendo esta zona y corriendo el modelo, basado en la teoría descrita anteriormente, es posible construir el campo de probabilidad para el sitio del derrame. Según la Figura 6, el sitio más probable está dentro de los contornos de color amarillo (más alta probabilidad).

Fig. 6 Distribución de la probabilidad (en unidades relativas) de localización del punto de derrame, si la mancha aparece en el cuadrado (sitio de observación de la mancha) después de 24 horas.

Para validar la metodología, en la Figura 7, se muestran los resultados del pronóstico obtenido por el modelo de derrame del CIOH, señalado en la introducción. Las condiciones ambientales para el modelo directo e inverso fueron tomadas de igual forma. Se consideraron las condiciones de calma para mostrar el comportamiento de la mancha bajo la influencia (predominante en este caso) de la marea y el aporte del Canal del Dique. Adicionalmente, la ausencia del viento evitó la formación de emulsiones y esto simplificó el resultado y su análisis. El sitio de derrame se ha seleccionado según la Figura 6 en la zona de más alta probabilidad. La Figura 7 muestra el proceso de desplazamiento de la mancha superficial durante 24 horas desde el punto seleccionado en la Figura 6. Bajo la influencia de la marea, en las primeras 12 horas la mancha estaba saliendo de la Bahía, pero después de cambio de fase,

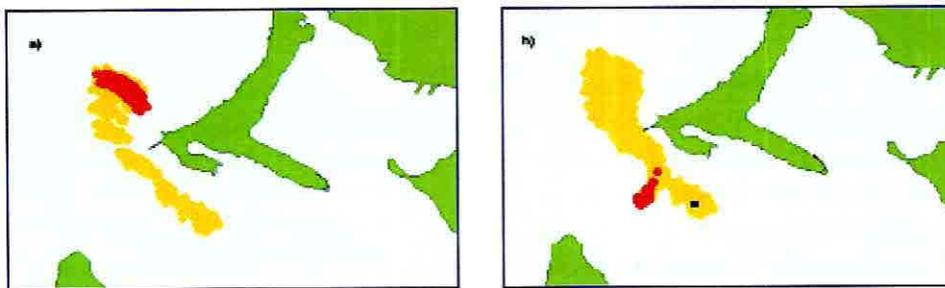


Fig. 7 Verificación del problema inverso a través de la solución del problema directo. Posición de la mancha (color rojo) en 14 (a) y 24 (b) horas después de derrame en el sitio marcado por el punto negro (ver Figura 6). Color amarillo presenta la huella histórica.

infinita) de fuentes. La única diferencia con el "método de pruebas y errores", está en el uso simultáneo de todas (K) las partículas que ahora representan fuentes individuales, distribuidas continuamente en el dominio del cálculo. Además, en este problema se establece el flujo específico de

interacción "crudo - costa"  $Q_b = 0$ , debido a que si  $Q_b$  no es igual a 100 % para el crudo dado, entonces existe un porcentaje de la masa que no interactúa con la costa y por cierta limitación de la cantidad de las partículas ( $K \neq \infty$ ), esta suposición parece válida.

comenzó a entrar. Finalmente, la mancha llegó a la zona indicada en la Figura 6 por el cuadrado. Esta es una evidencia del beneficio de la metodología presentada.

## CONCLUSIONES

El concepto del modelo inverso está compuesto por dos partes: 1) Determinación del volumen derramado y 2) Búsqueda del sitio de derrame. Para resolver el problema se debe conocer el régimen detallado de la hidrodinámica de la zona, la posición observada de la mancha en un momento de tiempo y "la edad" de la mancha. El régimen se calcula a través de los modelos hidrodinámicos, la posición se determina por las observaciones de campo y se supone, que los análisis físico - químicos permiten obtener la información sobre el tiempo de permanencia en el agua. El trabajo presenta los pasos necesarios para solucionar el problema, aplicando la teoría de los funcionales y desarrollando el problema conjugado. Además, se aplica una generalización del método de "pruebas y errores". Los resultados obtenidos en un solo ejemplo son satisfactorios para concluir que el método tiene las bases para desarrollarse hasta su aplicación práctica.

El ejemplo fue sencillo. En la realidad, según la ocurrencia de los eventos de derrame en la Bahía de Cartagena, no se observa una sola, sino varias manchas al mismo

tiempo y se supone que ellas provienen de una sola fuente. Desarrollando la metodología resulta interesante considerar estos eventos.

En el futuro, existe la necesidad de probar que el problema inverso es un problema uni- definido, es decir, él tiene la única solución bajo la información completa en su entrada. La cantidad de derrame es una característica que afecta al proceso de dispersión de la mancha, por supuesto, determina su posición y finalmente, su configuración. Por esta razón, para unir las dos partes del problema (hallar el volumen y el sitio), no es suficiente conocer el lugar observado de la mancha en un tiempo  $T$ , sino que es importante observar la estructura de la mancha, es decir, su configuración espacial.

Se plantea involucrar el método al software creado por el CIOH en 1998 para las tres zonas del impacto probable: La Bahía de Cartagena, el Golfo de Morrosquillo y el área de Santa-Marta.

## BIBLIOGRAFIA

- Blumberg, A.F. y G.L.A. Mellor, Description of a three-dimensional coastal ocean circulation model. Three-Dimensional Coastal Models, Amer. Geophys. Unión, Wash., D.C., 1987, p.1-16.
- Hess, K. W., Mecca Program Documentation, Reporte Técnico, NOAA, NESDIS 46, Wash., D.C., 1989, 200 p.
- Kazakov, A.L., A.A. Lezhenin y L.S. Speranskiy, Resultados preliminares del estudio de la capa límite mesometeorológica de la atmósfera en la costa norte colombiana aplicando un modelo numérico, Boletín Científico CIOH No 17, 1996, p. 17-26.
- Lonin, S.A., Hydrodynamic modelling and the problem of oil spills on the Colombian Caribbean shoreline, Spill Technology Newsletter, Vol. 22 (1-4), p. 1-6, 1997.
- Lonin, S. A. y L. Giraldo, Sobre la restitución de los campos de viento a partir de observaciones en un área determinada, Memorias IV Congreso Colombiano de Meteorología, Santafé de Bogotá, IDEAM, 1996, p. 37-42.
- Lonin, S.A. y Y. S. Tuchkovenko, Optimization of location of source of industrial contamination in the sea (using the oil terminal in the Odessa region as an example), Conf. Preprints "Environmental protection technologies for coastal areas", Bulgaria, 1995, p. 31-39.
- Marchuk, G.I. y V.V. Penenko, Application of optimization methods to the problem of mathematical simulation of atmosphere processes and environment, Proc. of the IFIP, B, 1979, p. 240-252.

- Otero, L. e I. Pineda, Estudio de sensibilidad del modelo "CODEGO" de derrame de crudo, Tesis de grado, Escuela Naval "Almirante Padilla", Cartagena, 1998, 96 p.
- Spaulding, M., K. Jayko y W. Knauss, Hindcast of medical waste trajectories in southern new england waters, Journal of N.E., Water Pollution Control Association 23(2), 1989, p. 206-221.
- Spaulding, M.L., A. Odulo y V.S. Kolluru, A hybrid model to predict the entrainment and subsurface transport of oil, Spaulding environmental associates, Inc. (SEA), 1993.

