

# Modelación de los derrames de petróleo mediante el empleo de PETROMAR

## *Oil spill modelling with PETROMAR*

**MSc. Amílcar E. Calzada Estrada** | [amilcar.calzada@insmet.cu](mailto:amilcar.calzada@insmet.cu) | Centro de Meteorología Marina. Instituto de Meteorología  
**Ing. Frank E. Pérez Acuña** | [frank.perez@insmet.cu](mailto:frank.perez@insmet.cu) | Centro de la Informática y las Comunicaciones. Instituto de Meteorología  
**Ing. Dailín Reyes Perdomo** | [dailin.reyes@insmet.cu](mailto:dailin.reyes@insmet.cu) | Centro de Meteorología Marina. Instituto de Meteorología  
**MSc. Reinaldo Casals Taylor** | [reinaldo.casals@insmet.cu](mailto:reinaldo.casals@insmet.cu) | Centro de Meteorología Marina. Instituto de Meteorología

Recibido: octubre 6 de 2015; aceptado: diciembre 16 de 2015.

---

### Resumen

Se presenta la aplicación Petromar en su versión 1.2, que fue concebida como un modelo determinista para el pronóstico de la trayectoria de manchas de petróleo en mar profundo y lejos de la costa, con posibilidades de incluir dominios con una batimetría compleja de la plataforma insular cubana. La programación fue realizada en 80 % por los autores, y mediante la subrutina BatTri fueron diseñadas doce zonas regionales cuya información inicial procede del proyecto GEBCO. Sobre la base de procedimientos establecidos en el ámbito internacional, el modelo emplea un enfoque lagrangiano para simular los procesos físicos que se desarrollan en la mancha, tales como: el esparcimiento, la advección, la difusión y la interacción con la línea de costa. Se utilizó el esquema de Elementos Finitos para la modelación numérica, caracterizado por brindar algunas ventajas operativas y una gran eficiencia en el cálculo. Entre sus bondades, la aplicación contempla el análisis de cualquier variable oceanográfica y(o) meteorológica, incluida la interacción entre estas; por ejemplo, la combinación de los análisis de la altura de la ola y la concentración del petróleo, facilitan la elección

de las técnicas de respuesta para mitigar el impacto del derrame. Los resultados de la modelación se representan en forma gráfica, y se guardan en archivos numéricos las trayectorias de cada partícula y el centro de masa de la mancha. La evaluación se realizó teniendo en cuenta los derivadores de la NOAA, y mostró 92.4 % de efectividad en los cálculos, lo cual se considera aceptable.

Palabras clave: Modelo lagrangiano, derrame de petróleo, accidentes tecnológicos, Petromar.

### Abstract

Petromar version 1.2 was conceived as a deterministic model to predict oil slick trajectories on deep ocean and offshore, with possibilities to include more complex basins of Cuban insular shelf. Programming was 80 per cent done by authors, and by means of the BatTri subroutine it was designed twelve regional zones whose initial information was obtained from GEBCO project. The model employs a Lagrangian approach to simulate physical processes that occur inside the oil slick, as spreading, advection, diffusion and shore interaction, taking into account the procedures established in the interna-

tional arena. It was used the finite element scheme for numerical modelling, which is distinguished by offering operational advantages and high efficiency in calculations. Among its benefits, the application allows the analysis of any oceanographic and meteorological variables, including the interaction between them; for example, combining the analysis of wave height with oil concentration may ease the choice of response technique to mitigate the impact of the spill. The modelling results are represented graphically in three forms and, simultaneously, the progression of each particle and the mass centre can be saved in numerical files. Results validation was made against NOAA drifters, and the error analysis showed an effectiveness of 92.4 %, which is considered as acceptable.

Keywords: Lagrangian model, oil spill modeling, oil drift model, oil concentration, Petromar.

## Introducción

Los altos precios del petróleo durante 2007 y 2008 promovieron la perforación en aguas profundas, a pesar de que las operaciones en estos sitios fue, desde sus inicios, prohibitivamente costosa. Además, las principales compañías prefieren explorar en zonas donde las prospecciones predicen reservas de gran caudal, para que la prospección sea exitosa, como lo es el caso del Golfo de México. Asimismo, se anuncia el lanzamiento de nuevas tecnologías para, con el modelado de las reservas, detectar los sitios reales con presencia del yacimiento (Petróleo Internacional, 2010).

En el presente existen fenómenos sociales, económicos y políticos en torno al hombre que han elevado la probabilidad de la ocurrencia de accidentes tecnológicos y, por consiguiente, el derrame de hidrocarburos en el medio marino. El más reciente hecho aconteció en abril de 2010, cuando explotó la plataforma de extracción Deepwater Horizon cerca de las

costas de Louisiana, en los Estados Unidos, convirtiéndose en el mayor siniestro de la región (Liu *et al.*, 2011).

Con estas condiciones, se impone que cada región se prepare de la mejor manera para enfrentar los accidentes y otros procesos adversos. En caso de cualquier catástrofe o siniestro real, con miras a predecir los daños que ocasionan tales sucesos, el modelo determinista de trayectorias es la principal herramienta objetiva que aporta los detalles más actualizados para los decisores (West y Solsberg, 1998). Los modelos, según la forma en que se plantean las ecuaciones para describir los procesos, se clasifican en *eulerianos* o *lagrangianos*.

Para tener idea de los principales procesos físico, químico y biológico presentes en una mancha de petróleo en el mar, existen algunos modelos que determinan el estatus de la mancha en las primeras horas (Betancourt, 2005; Calzada *et al.*, 2004). La advección (provocada por las corrientes y el viento) y la difusión esencialmente turbulenta, gobiernan la deriva (Daniel, 1998). El esparcimiento superficial es condicionado por las fuerzas de gravedad, viscosidad y tensión superficial (Reed *et al.*, 1999).

La evaporación puede reducir el volumen hasta 75 % de la mancha inicial, aunque la emulsificación le reduce eficiencia al dificultar las operaciones de contingencias. Este último proceso no ha sido bien comprendido; por ello, los modelos se limitan en incluirlo en sus simulaciones (Daniel, 1996).

La interacción de la mancha con la línea de la costa puede ser cubierta con varias complejidades. En dependencia de la naturaleza de la costa (bien sea rocosa, arenosa o cubierta de vegetación), de las condiciones meteorológicas y la dinámica del mar, la mancha puede regresar al océano, impregnarse en la costa o hundirse con los sedimentos (Daniel, 1998 y Reed, 1999).

Resulta importante la dispersión que pueden ocasionar las olas que logran fracturar la mancha en

gotas de diferentes tamaños, las que a su vez están sujetas a movimientos verticales acorde con su flotabilidad y favorece el surgimiento de la cola de la mancha, una vez que las gotas mayores ascienden hasta la superficie marina en su parte posterior (Hackett *et al.*, 2006).

De igual modo, pueden mencionarse procesos como la foto-oxidación, la biodegradación, la sedimentación y la interacción con hielos marinos, los cuales no serán descritos en detalle por ocurrir en momentos alejados al derrame, tener una baja representación o estar vinculados con regiones alejadas del trópico.

Este trabajo se apoya en aportes de proyectos practicados en la región y fuera de esta, que figuran como antecedentes muy favorables para su discusión; entre estos, se encuentran descripciones de las masas de agua en los mares interamericanos con enfoques dinámicos y favorecidos por la modelación numérica (Lavin, 1997 y Caso, 2005). Otros detalles fueron incorporados de los textos de Mitrani (2014), Daniel (1996), Reed *et al.* (1999), Calzada *et al.* (2002), Betancourt (2005) y Masciangioli (2010). Con estos trabajos fueron actualizados los procedimientos, y se propuso la aplicación de nuevos métodos. Al mismo tiempo, existen adelantos en la parte práctica, con la presentación ante el Consejo Científico del Instituto de Meteorología (INSMET) de la versión 1.0 de la aplicación Petromar (Calzada *et al.*, 2009), el desarrollo de la versión 1.1 luego del accidente en el Golfo de México (Calzada *et al.*, 2012) y, por último, el desarrollo de la versión 1.2, resultado del proyecto internacional Collaborate (Cecilie Wettre *et al.*, 2014 and Joensen *et al.*, 2014) donde se introdujo el movimiento de la mancha en 3D.

En el presente texto se expone un resumen de las características de la aplicación mencionada, en el cual se muestra su basamento teórico con los principales procedimientos empleados en cada proceso físico calculado. Se presenta, de una manera sencilla,

el empleo de los datos meteorológicos y oceanográficos con origen múltiple, y se explica qué hacer en situaciones cuando el acceso a la información se hace difícil y resulta necesario brindar un resultado para dar las primeras respuestas ante estas contingencias.

Finalmente, se presentan las salidas gráficas y numéricas que describen estos eventos, y se calcula la efectividad del modelo empleado a partir de una comparación con registros reales procedentes de derivadores de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

## **Materiales y métodos**

Para la creación de esta versión del modelo determinista, se realizó una profunda revisión bibliográfica sobre el tema, en aras de ganar en la comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en la mancha de petróleo derramada al mar, una vez que comienza su movimiento en la superficie.

A partir de esta revisión, quedan expuestos varios conceptos y definiciones que indicarán cómo se debe aplicar el modelo en cada ejecución. Además, se muestran los procedimientos seguidos para el procesamiento de los datos iniciales, la creación de los dominios de trabajo, la conformación de los escenarios de modelación y el análisis de resultados.

### **Tipos de derrames descritos**

Se describe la evolución de derrames *instantáneos* y *continuos*. El primero de ellos ocurre a partir de una explosión, donde se vierte de manera abrupta todo el volumen del contaminante. En el segundo, se simula un suceso que tiene larga duración y se define por su tasa de vertimiento. Este tipo de derrame es simulado de manera discreta, considerando varios derrames instantáneos separados cada una hora.

Considerando su profundidad pueden ser *superficiales* o *subsuperficiales* (incluyendo el lecho marino). El primero describe la deriva del petróleo y el segun-

do calcula el proceso de ascenso (en dependencia de las características del medio marino y del hidrocarburo) y luego su deriva por la superficie, aunque un porcentaje pueda trasladarse subsuperficialmente.

En los experimentos realizados solo se consideran las *fuentes fijas*.

### Procesos físicos y justificación teórica para su descripción

Una vez que se produce el derrame, se calcula el esparramiento de la mancha considerando las ecuaciones de las fases de Fay. Al cubrirse el tiempo de la tercera fase, la mancha se descompone en cientos de partículas, llenándose el área definida por los cálculos mencionados. La *advección* también tuvo lugar desde el instante inicial, primeramente moviendo todo el contaminante y luego a cada una de las partículas, ponderando la influencia de las corrientes marinas y el viento (a través de sus coeficientes de arrastres).

La *difusión* se describe a través del método denominado camino aleatorio, haciendo un símil con el movimiento browniano.

La *interacción con la línea de costa* se realiza en una aproximación simple, considerada esta como la frontera del dominio de trabajo. Este resultado se emplea para estimar el tiempo empleado por una partícula en recorrer la distancia desde el punto de derrame y sus coordenadas finales. El sistema retiene la partícula en el sitio, a no ser que exista una fuerte corriente que la separe de la frontera y la fuerce a continuar en movimiento.

A continuación se muestran las ecuaciones que rigen estos procesos. La deriva o el transporte de la mancha es representada por las ecuaciones (1) y (2).

$$\frac{dx_i}{dt} = u_a(x_i, t) + u_d(x_i, t) \quad (1)$$

$$\frac{dy_i}{dt} = v_a(y_i, t) + v_d(y_i, t) \quad (2)$$

donde  $u_a$  y  $v_a$  son las componentes de la velocidad, producto a la advección,  $u_d$  y  $v_d$  son las referentes a la difusión. La advección es el resultado de la influencia del viento y de las corrientes. De esta manera se tiene:

$$u_a(x_i, t) = c_{cor} u_{cor}(x_i, t) + c_{vto} u_{vto}(x_i, t) \quad (3)$$

$$v_a(y_i, t) = c_{cor} v_{cor}(y_i, t) + c_{vto} v_{vto}(y_i, t) \quad (4)$$

con  $u_{cor}$  y  $v_{cor}$  como componentes de la corriente,  $u_{vto}$  y  $v_{vto}$  como componentes del viento. Los coeficientes fueron seleccionados, teniendo en cuenta los valores obtenidos en ejercicios de laboratorios tropicales (Betancourt, 2005).

Si incorporamos a estas formulaciones, el procedimiento del camino aleatorio, la posición de las partículas en cualquier instante de tiempo sería:

$$x_i = x_{i0} + (c_{cor} u_{cor}(x_i, t) + c_{vto} u_{vto}(x_i, t)) \Delta t + \sqrt{12D_h \Delta t} [R_1]_0^1 \cos(2\pi [R_2]_0^1) \quad (5)$$

$$y_i = y_{i0} + (c_{cor} v_{cor}(y_i, t) + c_{vto} v_{vto}(y_i, t)) \Delta t + \sqrt{12D_h \Delta t} [R_1]_0^1 \text{sen}(2\pi [R_2]_0^1) \quad (6)$$

donde  $x_{i0}$  e  $y_{i0}$  las coordenadas de la partícula al inicio,  $D_h$  el coeficiente de difusión horizontal, eligiendo  $10^5 \text{ m}^2/\text{s}$  para los cálculos (Gutiérrez, 2012) y  $R_1$  y  $R_2$  son números aleatorios independientes.

Finalmente, para la solución del modelo numérico, se aplica el método de Runge-Kutta de segundo orden.

### Preprocesamiento de los datos

El sistema de la descarga de los datos oceanográficos, atmosféricos y de oleaje con los que será alimentado el modelo, funciona de forma automática cada seis horas por medio de programas prediseñados por los autores. Los modelos y proyectos tenidos en cuenta son los siguientes:

*Corrientes marinas:* Se obtienen de los modelos hidrodinámicos ROMS [en 3D, implementado en el

Centro de Física de la Atmósfera (CFA)], HYCOM (en 3D, descargado de Internet), NCOM (en 3D, descargado de Internet), SISCO [en 2D, creado e implementado en el Instituto de Oceanología (IDO)] y del servicio en línea Coastwatch en 3D (<http://cwcaribbean.aoml.noaa.gov>).

*Viento a 10 m:* Procedente de los modelos atmosféricos WRF (implementado en el CFA), MM5 (implementado en el CFA) y el GFS (descargado de Internet).

*Parámetros del oleaje:* Partiendo de los modelos espectrales WWIII (implementado en el CFA, Pérez y Mitrani, 2013), SWAN (implementado en el CFA, Pérez y Mitrani, 2013) y alternativamente el WWIII (<ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>).

Una vez recopilados los datos de trabajo, son introducidos a la configuración de cada escenario creado por el usuario.

En la actualidad, Petromar tiene un servidor de ficheros, indispensable para los escenarios que decida preparar el usuario. Entre ellos aparecen la información batimétrica y las variables mencionadas, clasificadas como de primera necesidad y las secundarias o informativas. Igualmente existe una climatología de las corrientes marinas procedente de un servidor de ficheros del servicio Coastwatch con 22 años de longitud, que presenta las matrices con los valores promedios para los doce meses del año y que contempla la región (longitud: de -98 a -60, latitud: de 8 a 32). A partir de los archivos del Centro de Clima, se toma la frecuencia de los rumbos del viento de las estaciones costeras cubanas, y del sitio de la NOAA (<http://www.ndbc.noaa.gov>), la información referida a las boyas de la región.

El modelo brinda la posibilidad de obtener las características generales de 1 411 tipos de hidrocarburos, cuya selección el usuario puede realizar por nombre o por ubicación sobre cualquier parte del mundo. Estos datos fueron actualizados a partir del modelo ADIOS (NOAA, 1993).

Para el proceso de evaluación se encuentra disponible también seis años consecutivos de derivadores

de la NOAA, descargados por un programa realizado por los autores a través del servicio Coastwatch. En uno de los próximos subepígrafes se explicará su empleo. Adicionalmente, existen datos de expediciones realizadas en el estrecho de Yucatán en el año 1999 y en Bahía de Todos Santos (BTS), en la costa pacífica de México durante 2014.

### **Diseño, refinamiento y creación de los dominios y rejillas de trabajo**

Se han concebido un total de doce zonas, representadas en la figura 1, que cubren los mares Interamericanos (Golfo de México, Mar Caribe y Atlántico Cercano) en los que la aplicación puede simular cómo las variables medioambientales influyen sobre la mancha, la trasladan y la transforman.

El proceso de creación de las rejillas guarda relación con el esquema numérico elegido para los cálculos que es el caso de los elementos finitos. Resulta muy conveniente si se considera cierta complejidad en la línea de costa y en la información batimétrica. Los elementos son triángulos y las posibilidades de respetar la geografía son máximas.

El Sistema de Información Geográfica Mapinfo le aporta a BatTri, subrutina de generación de la rejilla, un archivo con formato ASCII que porta la información batimétrica. Todo este trabajo resulta previo a las corridas del modelo, donde se realiza el diseño inicial y los refinamientos, dándole mayor importancia (elementos más pequeños) a los sitios donde la batimetría es menor y donde los cambios batimétricos son más significativos. El final de esta creación son tres archivos por cada dominio, portadores de la ubicación de los nodos y de los elementos, con una distribución tal que los cálculos se realicen en el menor tiempo posible. Existe un parámetro referido a este fenómeno que se denomina semiancho de banda de la rejilla y queda optimizado a su menor valor.

De esta manera, quedan constituidas todas las zonas de forma heterogénea, con elementos pequeños



Fig. 1 Zonas en las que se ha dividido la región para optimizar la simulación de derrames pequeños.

donde existen procesos físicos determinantes en el destino de la mancha y con elementos grandes donde los procesos son espacialmente estables (Edwards, 2002 y Calzada et. al., 2009). Es prudente aclarar que es posible realizar combinaciones o uniones de zonas (ejemplo zona01+zona02+zona03 = zona norte) y esta nueva estructura puede tratarse como un nuevo dominio, cuyas características son representadas de la misma forma que las anteriores.

## Creación de los escenarios

Los autores han tenido en cuenta que la aplicación del procedimiento sea lo más sencilla posible, de forma que con cinco “menús” queden concentrados todos los comandos que necesite el usuario. En torno a la creación de un escenario, solo es preciso llenar algunos espacios de la ventana que se refleja en la figura 2. Para asegurar la robustez de cada programa resultó conveniente tener en cuenta todos los errores posibles que podrían cometerse en el llenado de las ventanas. Para cada error, se ha considerado el cartel correspondiente y se da la posibilidad de rectificar indefinidamente.

La primera actividad de esta etapa, que es la parte final del preprocesamiento, lo constituye crear un nuevo escenario (que en dependencia de las dimensiones del dominio y complejidad, podría demorar hasta 25 min) o abrir uno ya procesado.

Cada escenario se identifica con un nombre que se almacena en una carpeta en la dirección seleccionada. Las zonas de análisis son las doce anteriormente mencionadas, unidas a diez combinaciones adicionales resultan veinte y dos dominios (prediseñados). La selección se realiza en la parte superior de la ventana, de manera sencilla.

El tipo de modelo que mayormente se ha empleado es el determinista (con análisis al futuro). El receptor es usado para, a partir de un determinado diagnóstico, conocer la procedencia o el sitio de salida del derrame (con análisis al pasado).

La aplicación está ideada para trabajar con la opción “servicios” cuando las condiciones han sido favorables y los datos de las distintas procedencias han sido ubicados en las carpetas correspondientes (Calzada et. al., 2009). La opción “variables” es una alternativa cuando no están disponibles los datos de los modelos o servicios. En este caso, se cubren los



escenarios de los datos de las boyas, barcos y las estaciones costeras de la región que son emitidas cada seis horas como parte de los acuerdos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM). Serán activadas varias columnas para introducir en las coordenadas los valores de las componentes de la corriente, el viento y tres de los parámetros del oleaje, para cada horario.

Finalmente, el usuario debe fijar la fecha del día inicial de la corrida, así como la duración en días, que ubica la fecha final antes o después del instante inicial (en dependencia del tipo del modelo elegido).

## Cálculo de las trayectorias

Para comenzar el cálculo de la trayectoria y de los diferentes procesos físicos presentes en la mancha se procede a la introducción de los datos específicos del derrame. Los valores solicitados son: las coordenadas de inicio, el volumen, el tipo de derrame, los horarios que lo limitan y la densidad del petróleo. El resto de los valores a introducir son referidos al medio marino que rodea la mancha, necesarios para conocer la flotabilidad del petróleo y otros procesos de interacción entre los medios. La figura 3 ilustra la ventana de esta fase.

La ubicación del derrame no es un asunto que siempre se conoce; sin embargo, puede estimarse por disímiles métodos directos e indirectos. Esta aplicación brinda las opciones de introducir esta información en coordenadas geográficas (en *grados decimales* con proyección WGS84) o en coordenadas planas (en *metros*).

En cada escenario se pueden realizar tantas solicitudes de derrames como el usuario lo requiera. Una vez terminada la ejecución de cada solicitud, se crean las salidas gráficas (con formato *bmp*) y numéricas (con formato *ascii*). Otro asunto que resulta útil es la simulación con la conjunción de todos los derrames,

Fig. 2 Opciones que presenta el sistema para crear un escenario.

Fig. 3 Datos inherentes al derrame y el entorno marino que lo envuelve.

superponiendo los datos, y como resultado, se obtiene la ubicación de todas las partículas derramadas en un formato sencillo, fácil de ser cargado en un sistema de Información Geográfica y mostrado por medio de símbolos.

## **Análisis espacial de variables escalares y vectoriales**

Cualquier variable meteorológica, oceanográfica o algún otro índice creado, puede ser analizada con facilidades para la visualización. Las escalares, como la temperatura superficial del mar, se realizan con una interpolación lineal sencilla y las vectoriales, como la velocidad de la circulación marina, se resuelven interpolando las componentes zonal y meridional por separado.

### **Proceso de validación**

Una forma de realizar validaciones (comparaciones en su defecto) es mediante el empleo de flotadores o derivadores (conocidos en idioma inglés como drifters) con un reporte de su ubicación en el espacio (entre otras variables). En PETROMAR, se ha destinado una carpeta para almacenar la información de los derivadores en la región. Los archivos portan los datos mensuales, cuyo formato es muy cómodo para la selección.

La primera parte de esta fase consiste en cargar el derivador seleccionado para un período de tiempo estimado, dentro del mes. Luego del proceso de selección del número del instrumento con la fecha inicial y final en cuestión, sale como resultado la creación de un nuevo archivo, con la trayectoria conformada por sus posiciones y la figura con el plotho correspondiente.

Uno de los comandos del análisis es precisamente la comparación de la posición del derivador con la del centro de masa (CM en lo adelante) de la mancha simulada por el programa, donde se hicieron coincidir

las coordenadas iniciales de ambas partes. El resultado de la comparación es un nuevo fichero que informa ambas posiciones, así como la diferencia entre ellas en metros.

Esta misma operación resulta posible realizarla llevando a cabo comparaciones con modelos probados.

## **Análisis de los resultados**

La versión 1.2 de la aplicación Petromar presenta, entre sus bondades, la información detallada de los resultados de manera gráfica y numérica. Indirectamente, como suele suceder en los modelos lagrangianos, se representa la concentración, mostrando fenómenos como la fracturación de la mancha en dos o varios pedazos, y la influencia de la corriente, el viento y el oleaje en la simulación representada.

### **Salidas gráficas de los resultados**

Con la creación de los archivos numéricos, el programa tiene la posibilidad de mostrar los resultados gráficamente en tres tipos de imágenes:

- a. La *salida resumen* presenta una muestra de todas las partículas durante todo el escenario (figura 4, ilustrando con partículas de color rojo (negro en la impresión) la ubicación final, con marrones aquellas que recalaron o tocaron la frontera, y en gris las localizadas en el resto de los instantes anteriores, con círculos el CM en todo momento y las estrellas muestran la trayectoria de una partícula centrada en la mancha en el instante inicial).
- b. La *salida con los campos* muestra la forma de la mancha combinada (Fig. 5) con los campos de la corriente marina en color azul (gris en la impresión) y del viento en color rojo (negro). Esta última tiene una muestra alternativa sin campos, para visualizar el fenómeno más rápido.



c. El análisis de la concentración del petróleo es el tercer tipo de imagen, cuyo procedimiento consiste en contar la cantidad de partículas existentes en los volúmenes de control, en torno a cada nodo (vértice de los triángulos) y luego se realiza un análisis objetivo para su representación.

Además, se pueden mostrar los campos vectoriales para cada corrida (incluyendo la dirección y fuerza del oleaje en color verde) y el análisis espacial de cualquier variable meteorológica u oceanográfica que desee conocerse, con la posibilidad de relacionar campos. El análisis de la batimetría es útil para que

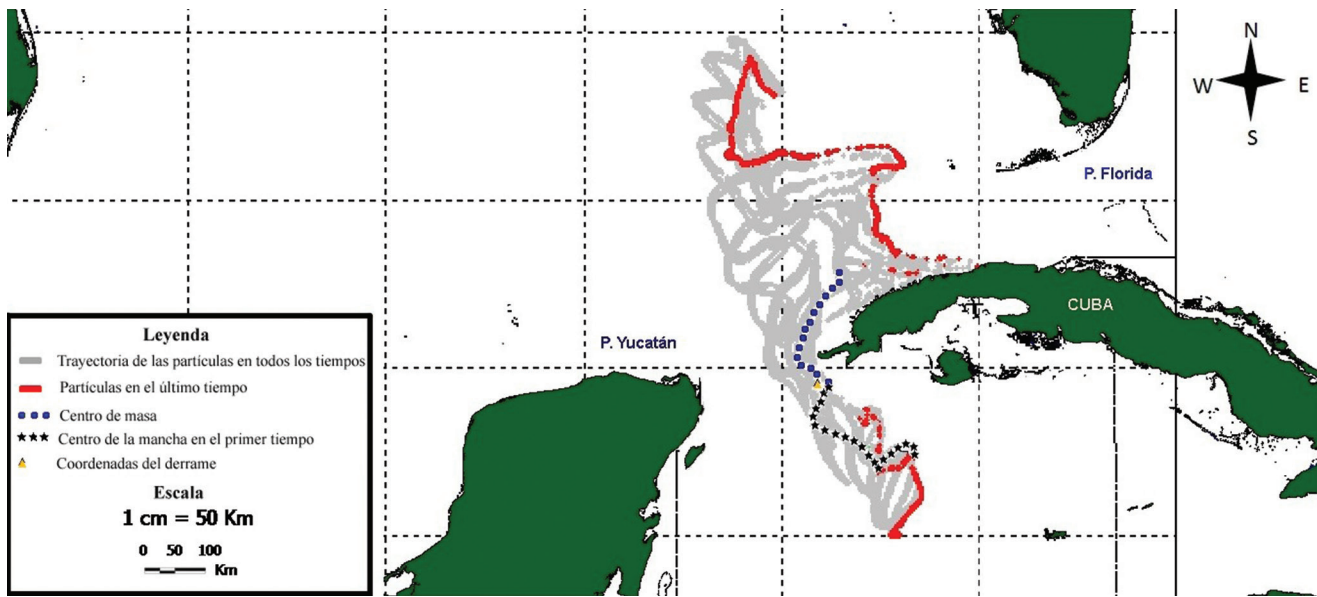


Fig. 4 Salida de la trayectoria íntegra de las partículas para un caso de las zonas occidentales.

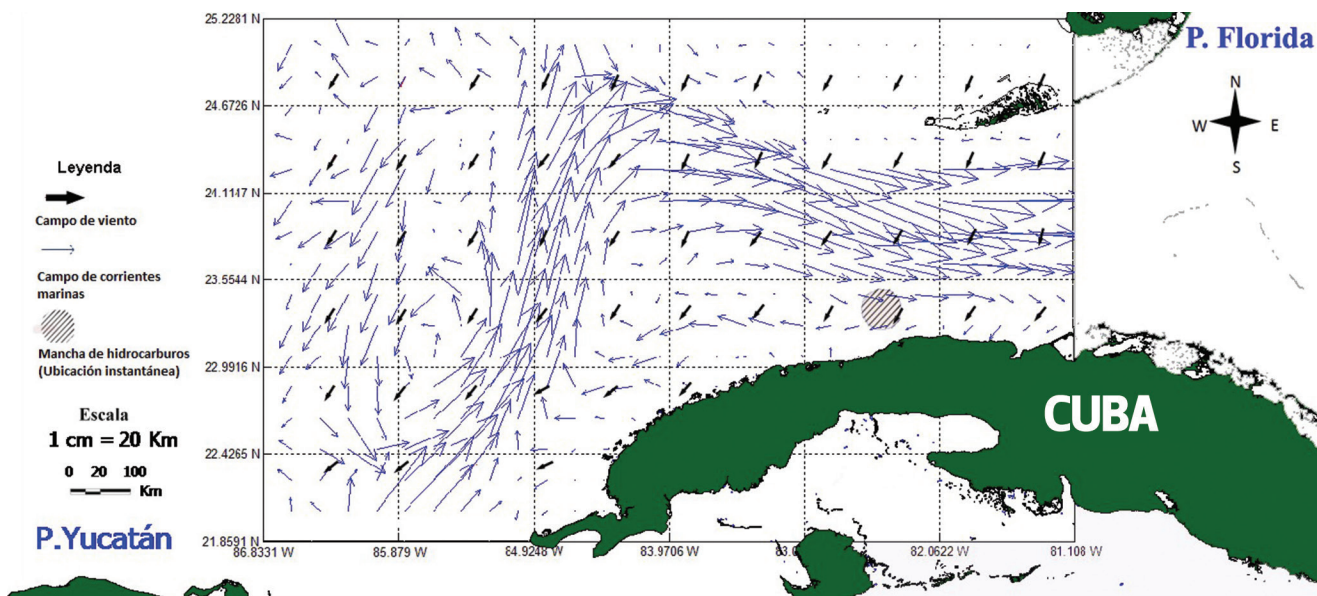


Fig. 5 Campos de corriente marina superficial, del viento a 10 m de altura y la ubicación de la mancha en un instante de tiempo.

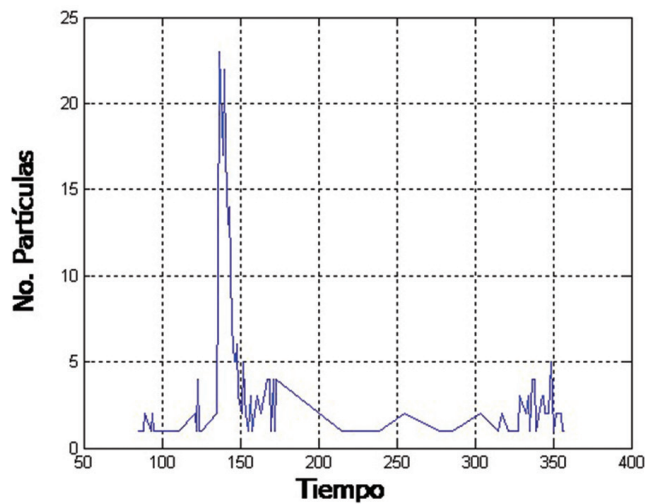


Fig. 6 Cantidad de partículas recaladas por unidad de tiempo.

se conozcan las características de cada zona y poder evaluar, en mayor medida, los resultados.

### Salidas numéricas e información de utilidad

Entre los tres archivos que se crean con cada ejecución, son ubicados en la carpeta “track” los siguientes:

- Archivo *nombre.txt*, donde se colocan varios datos como la cantidad de partículas en que se dividió la mancha inicial, los tiempos vinculados con el arribo o el recalo del contaminante en la zona costera (el inicial, el final, el promedio y el tiempo de mayor arribo). Posee las coordenadas (en metros) de la mancha y de las partículas en que fue descompuesta, con sus radios y el color (que guarda relación con los colores mencionados en la figura 4) en todos los instantes de tiempo.
- Archivo *nombre-centro.txt* con la trayectoria del CM en la simulación.
- Archivo *nombre-times.txt*, contiene los tiempos de recalo de todas las partículas.
- Archivo *nombre-xt.txt*, con sus coordenadas geográficas con una distribución muy fácil para ubicarlas en una SIG. Se trata de una matriz donde cada

fila pertenece a una partícula y las columnas crecen con el tiempo de dos en dos por las coordenadas (longitud, latitud).

Los análisis de la información a que se ha hecho referencia, pudieran tener disímiles características y al mismo tiempo presentan un respaldo en las salidas gráficas. Por ejemplo, existe un comando en el menú *salidas* que presenta una tabla de cantidad de partículas que arriban por unidad de tiempo, y que aporta detalles útiles (Fig. 8).

Adicionalmente, existe una orden que crea un fichero con las coordenadas de cada partícula y otra que solicita las posiciones de las partículas de todas las corridas que fueron llevadas a cabo, en un archivo que se nombra *union.txt*.

### Resultados preliminares de la evaluación

Teniendo en cuenta la muestra de datos con la que se realizaron las comparaciones, que no llega a ser suficientemente grande (5 años), este ejercicio lo denominamos “evaluación” y no como una “validación oficial”.

Visualmente, puede comprobarse cuán cerca o lejos estuvo el cálculo de las mediciones (Fig. 7).

La comparación numérica brinda la efectividad de los cálculos con precisión; con su empleo, se obtienen los valores (en *metros*) de la diferencia entre lo calculado y lo reportado a 12 h, 24 h y 36 h del inicio, y así hasta el tiempo de duración de la corrida (mostrado por Calzada *et al.*, 2009).

El error promedio en 12 h con este experimento fue de 12 772 m, mientras que en 24 h, resultó 24 709 m; si se tienen en consideración la complejidad de la dinámica del flujo marino en la región y las limitaciones de los reportes, este valor puede considerarse de muy bueno. En 92.4 % de los casos, la comparación arrojó resultados favorables.

La otra medida para tener idea de la exactitud de los métodos empleados es el tiempo en que la diferencia comienza a ser igual o mayor a 15 km, que para

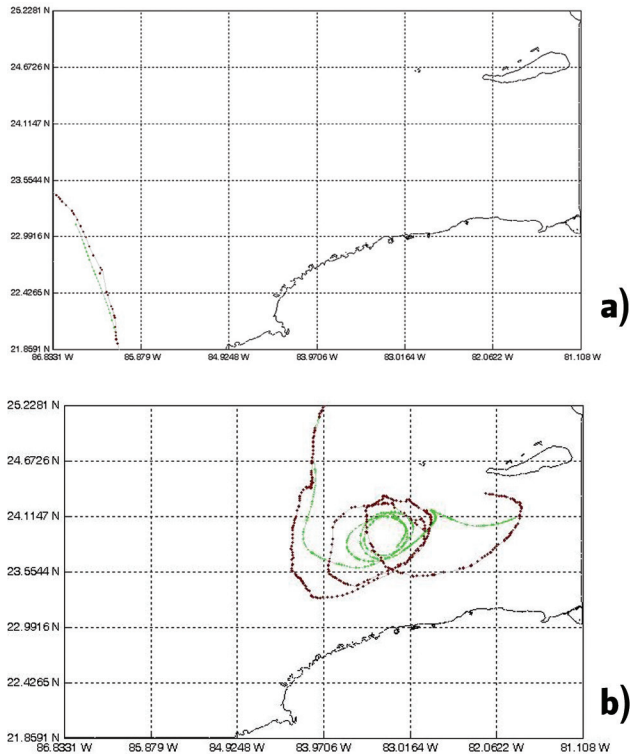


Fig. 7 Comparación de las trayectorias del derivador con el CM de la mancha simulada por Petromar: a) En el estrecho de Yucatán; b) En la zona noroccidental cubana.

estos casos promediaron 17 h. Considerando el estilo de la meteorología moderna y la oceanografía operacional de actualizar el pronóstico cada seis horas, podrían existir dos oportunidades de perfeccionamiento en el cálculo de la trayectoria antes de acumular este error.

## Conclusiones

1. Fue aplicada la versión 1.2 del modelo Petromar, que cuenta con un servidor de ficheros capaz de enfrentar corridas operativas en cualquier sitio de los mares interamericanos.
2. La inclusión de varios procesos físicos que determinan la morfología de la mancha, como el esparcimiento, la advección, la difusión y la interacción con la línea costera conducen a una demostración de eficiencia en sus tres salidas gráficas: (1) la trayectoria de las partículas en el período analizado,

(2) la secuencia de la mancha unida a los campos de los fluidos que la modifican y (3) el análisis de la concentración del petróleo en el mar en instantes definidos por el usuario.

3. Los resultados numéricos se encuentran detalles útiles para los decisores, puesto que reciben información acerca del tiempo del arribo inicial, tiempo promedio de arribo, tiempo de mayor arribo y tiempo final de recalco de la mancha de petróleo, motivándolo a tomar precauciones con conocimiento de causa.
4. Las diferencias promedios entre las coordenadas calculadas por Petromar y las reportadas por los derivadores son de 12.8 km para 12 h y 24.7 km para 24 h después del derrame. Estos errores se encuentran en un rango aceptable.
5. El error igual o menor a 15 km se cumple para 52 % de los casos en 17 h, para 72 % en 12 h y para 96 % en 9 h; cifras que destaca la posibilidad de corrección durante el proceso de corrida.

## Recomendaciones

1. Perfeccionar el análisis de la concentración considerando los procesos: evaporación, dispersión vertical y emulsificación.
2. Elaborar experimentos propios para completar la fase de validación.

## Agradecimientos

Los autores agradecen las experiencias obtenidas en este tema, en el marco de la colaboración con el Centro de Ingeniería y Manejo Ambiental de Bahías y Costas (CIMAB), el Instituto de Oceanología (IDO), Geocuba-Estudios Marinos, el Centro de Investigaciones Pesqueras (CIP), el Centro de Investigaciones del Petróleo (CEINPET), INTEVEP-PDVSA, la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), el Centro de Investigación Científica y de Educación

Superior de Ensenada (CICESE) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

## Referencias bibliográficas

- BETANCOURT, F. O. 2005. Modelado de la evolución de derrames de petróleo en zonas litorales. Tesis de Doctorado, Universidad Nacional Autónoma de México. 311 pp.
- CALZADA, A. E. 2002. Difusión de petróleo en aguas cercanas a objetivos económicos. Tesis de Maestría, Universidad de La Habana. 92 pp.
- CALZADA, A., FERNÁNDEZ, K., GUILARTE, Y., RODRÍGUEZ, R., CASALS, R., AMBUAJE, Y., RODRÍGUEZ, N., PÉREZ, P. J., LARRINAGA, C & RAMOS, A. 2009. Resultado del Proyecto Científico: Simulación Numérica de las Corrientes Marinas y Campos de Oleaje, su Influencia Sobre los Derrames y el Transporte Oceánico de Hidrocarburos.
- Calzada, A. E & Marín, J. M. 2004. Los accidentes por derrames de hidrocarburos en el mar. Historia de la modelación matemática de sus procesos físicos. *Revista Cubana de Meteorología*. 11. 54-62 pp. <http://www.met.inf.cu/contenidos/biblioteca/revistas/2004/n2/LOSACC-1.pdf>
- CALZADA, A. E., FERNÁNDEZ, K., GUILARTE, Y., RODRÍGUEZ, R., CASALS, R., ALONSO, Y., PÉREZ, P., AMBOAJE, Y., RODRÍGUEZ, N., LARRINAGA, C., RODRÍGUEZ, H., HERNÁNDEZ, N., SAMPER, S & ORTEGA, F. 2012. Aplicación del Modelo PETROMAR en el Derrame de petróleo de Louisiana en el Golfo de México. Casos Prácticos y Análisis ante Posibles Trayectorias de Huracanes por la Región. VII Simposio Marítimo SIMMTECHNAVAL 2012. <http://www.ipen.org.br/downloads/simposio-Cuba/8-Aplicacion-del-Modelo-PETROMAR-en-el-Derrame-de-petroleo.pdf>
- CASO, M., PISANTY, I & EZCURRA, E. 2005. Diagnóstico ambiental del Golfo de México. Secretaría de Medio ambiente y recursos naturales, Instituto Nacional de Ecología. ISBN: 968-817-705-9. 627 pp.
- DANIEL, P. 1996. Operational Forecasting of Oil Spill Drift at Meteo-France, *Spill Science and Technology Bulletin*. . 3. 53-64 pp.
- EDWARDS, K & WERNER, C. 2002. A Simple Guide (with examples) to Generating a Finite Element Mesh of Linear Triangular Elements Using *Battri* 27 pp.
- FAY, J. 1969. The Spread of Oil Slick on a Calm Sea. Plenum Publication. 53-63 pp.
- GUTIÉRREZ, A. 2012. Dispersión y caoticidad de partículas pasivas en las aguas oceánicas de la región occidental de Cuba. Tesis de Doctorado, Instituto de Meteorología. 211 pp.
- HACKETT, B., BREIVIK, Ø & WETTRE, C. 2006. Forecasting the drift of objects and substances in the ocean. Researchgate. <http://www.researchgate.net/publication/233918946>.
- JOENSEN, E., HOLE, L. R., WIENDERS, N., KOURAFALOU, V., PEREZ, A., CALZADA, A. & WETTRE, C. 2014. Drifter deployment near the Dry Tortugas-comparison with two different oil drift models. Gulf of Mexico: Research Initiative. [http://ocean.fsu.edu/~wienders/Site/Welcome\\_files/MET\\_Tortugas\\_poster.pdf](http://ocean.fsu.edu/~wienders/Site/Welcome_files/MET_Tortugas_poster.pdf)
- LAVIN, M. F. 1997. Contribuciones a la Oceanografía Física en México. Unión Geofísica Mexicana, Monografía . 3. ISBN 968-7829-00-1. 284 pp.
- LIU, Y., MACFADYEN, A., JI, Z.-G & WEISBERG, R. H. 2011. Introduction to Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill, in Monitoring and Modeling the Deepwater Horizon Oil Spill: A Record-Breaking Enterprise. American Geophysical Union, Washington, D. C.. doi: 10.1029/2011GM001147. Print ISBN: 9780875904856, Online ISBN: 9781118666753.
- MASCIANGIOLI, P. 2010. Comportamiento y simulación de derrames de petróleo, sus derivados y sustancias químicas. Manual de procedimientos en INTEVEP-PDVSA, 46 pp.

- MITRANI, I. 2014. Meteorología Marina. Agencia de Medio ambiente (Ed.). 978-959-300-060-4 (soporte digital) La Habana. Cuba. 270 pp.
- NOAA Hazardous Materials Response and Assessment Division, 1993. ADIOS (Automated Data Inquiry for Oil Spill). User's Manual. Seattle, Washington.
- Petróleo Internacional. 2010. Aguas ultraprofundas: ¿la última frontera promisoría?. Oilwatch Mesoamérica. documento en línea en el sitio: [http://www.oilwatchmesoamerica.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=3338&Itemid=78](http://www.oilwatchmesoamerica.org/index.php?option=com_content&task=view&id=3338&Itemid=78)
- REED, M., JOHANSEN, E., BRANDVIK, P., DALING, P., LEWIS, R., MACKAY, D & PRENTKI, R. 1999. Oil spill towards the close of the 20th century: Overview of the state of the art. *Spill Sciences and Technology Bulletin*. . 5. . 1. pp. 3-16.
- WEST, M & SOLSBERG, L. 1998. Modelado de trayectorias de derrames de hidrocarburos. Informe Ambiental ARPEL . 4. 46 pp.
- WETTRE, C., CALZADA, A & PÉREZ, A. 2013. A comparative analysis on the importance of using wave information from a numerical wave model in oil spill trajectory modeling. GODAE Ocean View: Coastal & Shelf Seas Task Team (COSS-TT). <https://www.godae-oceanview.org/outreach/meetings-workshops/task-team-meetings/coss-tt-workshop-2014/presentations/>