

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA



FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS



"MODELACIÓN DE TRAYECTORIAS DE LOS DERRAMES DE HIDROCARBUROS  
FRENTA A LAS COSTAS DE ROSARITO, B.C., MÉXICO."

T E S I S  
que para obtener el título de:  
O C E A N Ó L O G O  
presenta:  
Estefanía Medina Fuentes

Ensenada, B.C., Agosto del 2003

## RESUMEN

En el presente trabajo se implementó un modelo numérico capaz de simular las trayectorias de derrames de hidrocarburos en caso de un accidente enfrente de las playas de Rosarito, B.C. En esta zona, a 3km de la costa, se encuentran una serie de monoboyas de PEMEX donde se realizan frecuentemente descargas de combustóleo. Esta área es considerada como zona crítica, de acuerdo al Plan Nacional de Contingencias para combatir y controlar derrames de hidrocarburos y otras sustancias nocivas en el mar. El modelo, basado en la ecuación general de difusión, estima la trayectoria de los derrames. Se reprodujeron las condiciones oceanográficas y meteorológicas para los accidentes que ocurrieron los días 24 de abril de 1998 y 13 de mayo de 1999, coincidiendo las zonas impactadas predecidas por el modelo con las áreas reportadas por Secretaría de Marina para esos incidentes. Considerando las características de viento, marea y Corriente de California del área de estudio, el modelo hace una predicción de un derrame de hidrocarburos y de las zonas que posiblemente puedan ser afectadas por éste. El modelo, por medio de interfaces gráficas, provee una fácil y rápida visualización de la predicción de la trayectoria del derrame. Este es sencillo de reprogramar para otra condición de viento y/o fecha así sea necesario.

**"MODELACIÓN DE TRAYECTORIAS DE LOS DERRAMES DE  
HIDROCARBUROS FRENTE A LAS COSTAS DE ROSARITO, B.C., MÉXICO."**

**T E S I S**  
que para obtener el título de  
**O C E A N Ó L O G O**  
presenta:

**Estefanía Medina Fuentes**

Aprobada por:



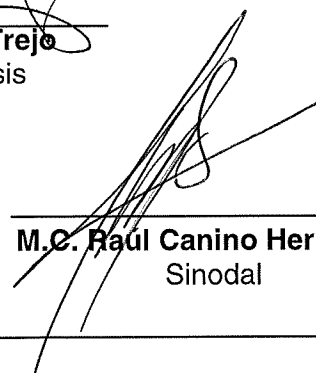
---

**Dr. Adán Mejía Trejo**  
Director de Tesis



---

**Dr. Rafael Hernández Walls**  
Sinodal



---

**M.C. Raúl Canino Herrera**  
Sinodal

*Afuera del mar y sobre él  
puede reinar la injusticia del tirano ...  
En sus profundidades, solo el orden natural,  
donde no caben dictadores ...  
Julio Verne.*

*A mis padres  
por ser los pilares de mi vida  
y por su amor siempre incondicional.*

*A mis hermanos,  
por ser el mas maravilloso  
regalo que la vida me ha dado.*

*los quiero ...*

## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma de Baja California, y en especial a la Facultad de Ciencias Marinas por brindarme la oportunidad de pertenecer a esta institución.

Al Instituto de Investigaciones Oceanológicas por darme las facilidades para llevar a cabo este trabajo.

A Secretaría de Marina y a PEMEX por haberme facilitado los datos y reportes que se requerían para la elaboración de esta tesis, y por su disponibilidad.

A mi director de tesis, Dr. Adán Mejía Trejo por asumir la dirección de la presente, por sus conocimientos compartidos, sus comentarios siempre acertados, su apoyo y por el grato placer de trabajar con usted.

A mis sinodales, Dr. Rafael Walls y M.C. Raúl Canino por sus comentarios, sugerencias y correcciones al trabajo, y tener siempre la disponibilidad de ayudarme a resolver mis dudas.

Al Sr. Manuel Mancillas por facilitarnos el programa para predicción de mareas para la zona de Rosarito y por su disposición de brindarnos la información que se requiriera.

A las personas que forman parte del Departamento de Oceanografía Física del IIO, por facilitarme las instalaciones, equipo e información para realizar este trabajo. En especial a Alejandro y al Chato por ayudarme en la programación y en la base de datos del modelo.

A mi mamá, por tu apoyo incondicional de principio a fin en todo lo que hago, por creer en mí y por ser mi principal motivación.

A mi papá por mantener mis ilusiones vivas a pesar de todo y estar siempre presente.

A Migue y Jero, por estar siempre conmigo, contar con ustedes, por nuestras vidas compartidas y haber aceptado mi ausencia durante este tiempo.

A Noé, por ser el primero en haberme planteado la realidad fuera de casa, y aun a tu pesar no haberme dejado sola.

A Gardenia, Mario, Alejandro y Adán por contar siempre con ustedes, y ver que nuestra amistad sigue creciendo a pesar de las distancias.

A Vero, Ale y Penny por su apoyo moral incondicional y por todas las experiencias vividas.

A Liz, por compartir los mejores y los peores momentos desde que llegue aquí, por plantarme siempre en la realidad, por tu amistad incondicional, pero sobre todo por ser quien eres.

A Lou, Eli, Moni, Adriana, Clau, Denisse y Gina, por haber aparecido en algún momento de mi vida, por todos los momentos vividos, por su cariño sincero, pero sobre todo por que cada una de ustedes han dejado algo especial en mi y me han hecho crecer como persona.

A Jorge y a Diego por su amistad, por estar siempre dispuestos a ayudarme en todo momento y por los muchos momentos agradables que hemos vivido.

Al Chino por ayudarme a programar y entender un poco más de esto, y por tu amistad.

A Joe y Alfredo por su amistad y por ayudarme cuando lo necesite.

A Samuel, Fidel, Emmanuel y Abisaí, mis compañeros y amigos de generación.

A mi familia, tios, tias, primos que siempre me han apoyado.

Y a todas las personas que injustamente no recuerdo en estos momentos y han formado parte de todo esto, gracias por haber estado o estar presentes.

*muchas gracias.*

## ÍNDICE

Resumen .....	i
Dedicatoria .....	iii
Agradecimientos .....	iv
Índice .....	vi
Lista de figuras .....	vii
I. Introducción .....	1
I.1. Antecedentes .....	5
II. Objetivo general .....	9
II.1. Objetivos particulares .....	9
III. Área de estudio .....	10
IV. Metodología .....	16
IV.1. Enumeración de variables .....	18
IV.2. Modelo Matemático .....	19
V. Resultados .....	22
VI. Discusiones .....	31
VII. Conclusiones .....	40
VIII. Referencias .....	42

**LISTA DE FIGURAS**

	Pag.
<b>Figura 1.</b> a) Buque tanque. b) derrame de petróleo	1
<b>Figura 2.</b> Instalaciones de PEMEX en Rosarito, B.C.	8
<b>Figura 3.</b> Área de estudio y localización de la monoboya (punto verde)	15
<b>Figura 4.</b> Interfases gráficas del Modelo de predicción de trayectorias	23
<b>Figura 5.</b> Área impactada estimada por el modelo, en la zona de Rosarito, B.C. por los derrames ocurridos el 25 de abril de 1998 (a) y el 13 de mayo de 1999 (b).	26
<b>Figura 6.</b> Componentes de marea (a) y de viento (b) para el día 24 de abril de 1998.	27
<b>Figura 7.</b> Componentes de marea (a) y de viento (b) para el día 13 de mayo de 1999.	30

## I. INTRODUCCIÓN

El constante crecimiento urbano e industrial a lo largo de las costas ha resultado en un mayor uso y explotación del medio ambiente marino. Uno de los usos más comunes es el de utilizarlo como receptor de varios tipos de desechos, por ejemplo, descargas residuales. Este medio también está expuesto a derrames accidentales de petróleo, que es lo que nos compete en este trabajo (Fig.1a). La capacidad asimilativa del medio acuático para diluir sustancias contaminantes es limitada, por lo que el uso continuo de los océanos (o mares) como medio receptor es motivo de preocupación por su impacto al ambiente marino y sus repercusiones a la salud y actividad humana (Fig. 1b). Por lo tanto, es importante el estudio de las condiciones oceanográficas (corrientes, mareas, oleaje, temperatura, etc.) y meteorológicas (vientos, presión atmosférica, humedad relativa, etc.) así como las características de dispersión de los diferentes contaminantes, para poder predecir la trayectoria de éstos en caso de un accidente.



a)



b)

**Figura 1.** a) Buque tanque, b) derrame de petróleo

En particular la región costera requiere de programas de investigación extensos en general, debido a que las condiciones que determinan el movimiento del océano cambian más drásticamente que en el mar profundo.

En el caso del transporte de petróleo sobre el agua se debe principalmente a dos procesos: extensión y advección. Los vientos, corrientes y turbulencia de gran escala (mezclado) son mecanismos de advección que transportan el petróleo a lo largo de grandes distancias.

En general, el movimiento del petróleo puede estimarse como la suma vectorial de la deriva por viento (que es aproximadamente el 3% de la velocidad del viento), la corriente de superficie, que es originada por marea, viento y la corriente regional, y la extensión y turbulencia de gran escala (difusión). (Manual de análisis de trayectorias, NOAA, 2001).

Observaciones realizadas sobre derrames reales y experimentos controlados coinciden que la deriva debida al viento varía del 1 al 6% de la velocidad del viento (la mayoría de los modelos utilizan un 3%). El valor bajo de 1% puede deberse a la inmersión de algunas de las gotas de petróleo debido al oleaje. La circulación de Langmuir puede contribuir también a la variabilidad en la deriva por viento. El petróleo en los regueros podría moverse hasta el 5.5%

de la velocidad del viento, lo que explicaría los valores del 6% observados en algunos derrames.

Si bien la teoría oceanográfica predice un ángulo entre la corriente de superficie y la velocidad del viento, las observaciones sobre trayectorias de manchas de petróleo sugieren que el ángulo real es inferior a  $10^\circ$  (Manual de análisis de trayectorias, NOAA, 2001), sin embargo los experimentos que realizaron Gaul y Steward (1960) enfrente de las costas de San Diego, CA, indicaron un ángulo de desviación a la derecha de  $15^\circ$ . Las predicciones de dirección del viento no son usualmente tan precisas, y muy pocos modelos incluyen un ángulo de rotación en sus cálculos.

La corriente de superficie es un mecanismo de transporte del petróleo. El régimen de corrientes presentes al producirse el derrame será un factor importante para determinar la longitud y la escala temporal del derrame.

- ❖ La circulación oceánica puede transportar el petróleo a lo largo de miles de kilómetros en meses y años.
- ❖ El flujo costero puede transportar el petróleo a lo largo de cientos de kilómetros en semanas
- ❖ La circulación en estuarios puede transportar el petróleo a lo largo de decenas de kilómetros en días

- ❖ Los ríos pueden transportar el petróleo a lo largo de decenas de kilómetros en horas o días.

El petróleo derramado en el agua está sujeto a regímenes de flujo turbulento. La turbulencia oceánica se genera a causa de vientos y corrientes, así como por la variación de temperaturas. El flujo en las capas superiores del agua se vuelve más turbulento a medida que aumentan el viento y las corrientes.

La difusión turbulenta, causada por movimientos aleatorios de masas de agua, rompe las manchas de petróleo en parcelas más pequeñas que se distribuyen por un área más extensa.

La difusión del petróleo tiene lugar principalmente en la dirección horizontal, siendo mucho mayor que la difusión vertical. La difusión horizontal en la superficie del agua varía de 0.01 a 100 m<sup>2</sup>/s. (Manual de análisis de trayectorias, NOAA, 2001). Para el caso del combustóleo, que es el combustible que principalmente manejan las instalaciones de PEMEX, presenta un coeficiente de difusión de  $1.1 \times 10^3$  m<sup>2</sup>/s (GNOME, 2002).

## I.1. ANTECEDENTES

Existen varios modelos numéricos que se aplican a la zona costera, por ejemplo, el General NOAA Oil Modeling Environment (*GNOME*, 2002)<sup>1</sup> que es un modelo bidimensional de difusión y el High Resolution Operational Model for the Baltic Sea (*HIROMB*)<sup>2</sup> que es un modelo tridimensional y baroclínico. Ambos están forzados por viento, marea y las características del contaminante. El *HIROMB* incluye procesos de mezcla del contaminante de manera vertical. Estos modelos son muy útiles por su relativa facilidad de operación y porque consideran los factores más importantes para describir la trayectoria del derrame.

Estos modelos simulan la trayectoria del derrame de hidrocarburos por medio de modelos numéricos, los cuales usan las condiciones de viento, corriente, marea, etc., de acuerdo con el lugar. De igual manera estos modelos predicen la cobertura del derrame y hacen una evaluación de las zonas afectadas de acuerdo con las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes tales como: evaporación, emulsificación, dispersión, flotabilidad, solubilidad y difusión.

Por su ubicación geográfica, Baja California, cuenta con una de las zonas de mar territorial y zona económica exclusiva más ricas en productividad

---

<sup>1</sup> <http://response.restoration.noaa.gov/software/gnome/tools.html> ( 2002 )

<sup>2</sup> Ambjorn, C. (2000), Modelling of trajectory and fate of spills, Environmental Coastal Regions., 33-39.

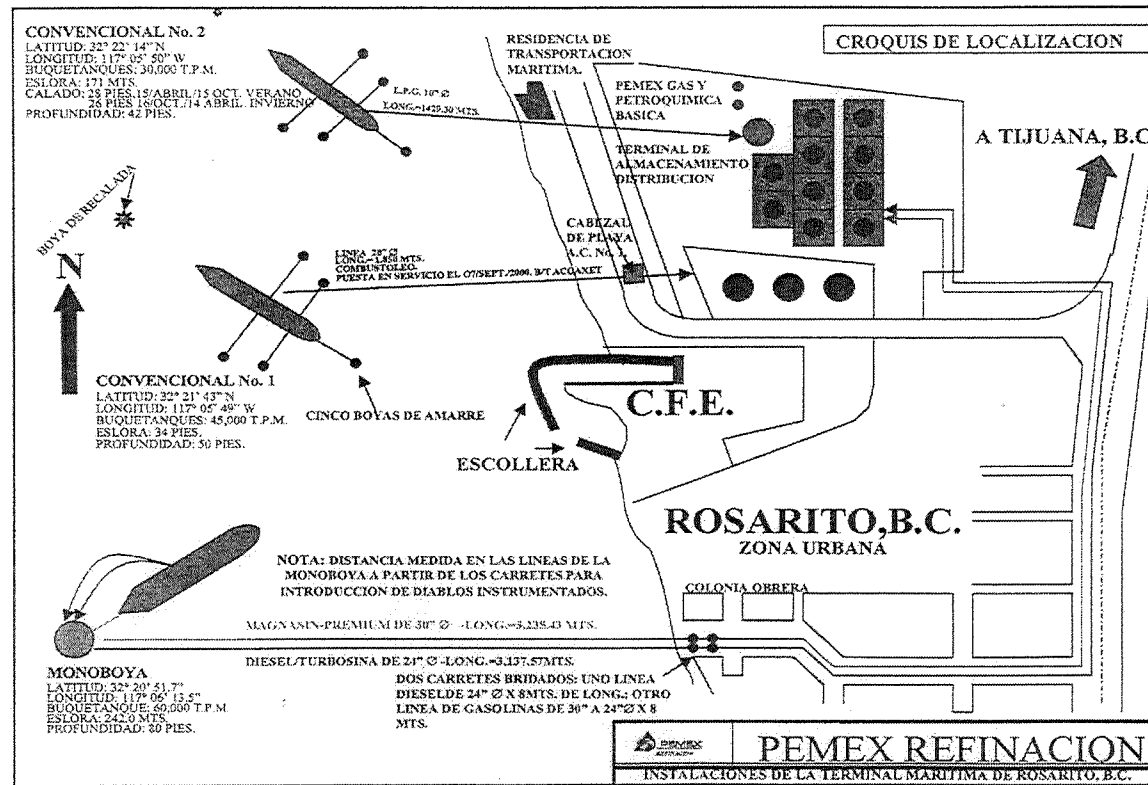
primaria, por ende un incremento importante de las especies marinas, y además se está teniendo un gran desarrollo en actividades humanas. Un claro ejemplo es el área de playas de Rosarito donde se encuentran instalaciones de la paraestatal Petróleos Mexicanos (Fig. 2), denominándose ésta como un área crítica de acuerdo a la definición plasmada en el Plan Nacional de Contingencias para combatir y controlar derrames de hidrocarburos y otras sustancias nocivas en el mar (Plan de Operaciones. "Contingencia Rosarito 2001". Secretaria de Marina).

Dentro de la zona se llevó a cabo un programa de investigación sobre circulación del área y como una consecuencia de ésta se obtiene la dispersión de productos químicos. Este trabajo fue realizado por la sección de Circulación y Dispersión Costera del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Dentro de éste programa se realizó una serie de experimentos que consistieron de observaciones Lagrangeanas de corrientes superficiales y mediciones de viento en la costa. Haciendo uso de los resultados de estas observaciones, se implementó un modelo numérico sencillo como una primera aproximación al problema de predicción de dispersión en la zona (Godínez-Sandoval, 1986).

Se tienen trabajos anteriores de modelos de predicción como lo son el modelo de Godínez-Sandoval (1986), que hace una simulación de la dispersión

de una mancha de contaminante en la zona de Rosarito, B.C., considerando la cobertura de la mancha y el tiempo que tarda en llegar a la costa. La diferencia de este trabajo con respecto a los desarrollados anteriormente radica en que se esta incluyendo la forma de la línea de costa, todas las variables oceanográficas y meteorológicas que juegan un papel importante en la dispersión del combustóleo.

Conocer la trayectoria del derrame proporciona una orientación vital a los encargados de tomar decisiones sobre la mejor manera de proteger los recursos y dirigir la limpieza. La importancia de contar con un modelo de predicción de trayectorias y destinos de los posibles derrames de hidrocarburos para esta área, nos permitirá encontrar las zonas más vulnerables de acuerdo a las condiciones meteorológicas existentes y realizar un plan de contingencia para minimizar los daños que puedan ocasionar estos derrames.



T'RSQ\*

Figura 2. Instalaciones de PEMEX en Rosarito, B.C.

## **II. OBJETIVO GENERAL**

Crear un modelo que simule la trayectoria del derrame de hidrocarburos, utilizados por PEMEX, enfrente de las costas Rosarito, B.C., de acuerdo con las condiciones oceanográficas, meteorológicas y la forma de la línea de costa.

### **II.1. Objetivos particulares:**

- Estimar la trayectoria del derrame mediante el procesamiento de información que contenga las condiciones ambientales en el momento del accidente, (e.g. marea, viento y corrientes regionales) en el área de interés.
- Predecir las trayectorias que puedan resultar de condiciones ambientales extremas e inesperadas.
- Usar algoritmos ambientales para hacer predicciones simples acerca de los cambios que experimentara el petróleo mientras se encuentre expuesto al medio ambiente.
- Tener un modelo de actualización rápida, re-programable y capaz de incorporar nueva información.

### III. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Rosarito se encuentra localizado al noroeste de la península de Baja California entre los  $32^{\circ} 20'$  y  $32^{\circ} 23'$  N y los  $117^{\circ} 03'$  y  $117^{\circ} 05'$  O. Actualmente existe un gran crecimiento de la población, contando con cerca de 100 000 habitantes, de acuerdo al censo de 1995, y con una gran actividad turística. A partir de 1991 comenzó el gran crecimiento económico en el rubro turístico con la construcción de edificios, hoteles, condominios y restaurantes, todos localizados cerca de la franja costera (Marichal, 2001).

La línea de costa es prácticamente recta, abierta al mar, y tiene una orientación de aproximadamente  $153^{\circ}$  con respecto al norte. La configuración batimétrica de la zona es cercana a la costa presenta una pendiente suave (Appendini-Albreschtsen, 1995) con una profundidad promedio de aproximadamente 25 metros. En general, la batimetría es irregular debido, principalmente, a las características que imprime la presencia de las Islas Coronado, ubicadas aproximadamente a 11 Km de la costa (Fig. 3).

La corriente predominante en la zona es la Corriente de California (CC), esta se caracteriza por ser un flujo hacia el sur, paralelo a la costa, de una masa de agua subártica con el mínimo de salinidad subsuperficial. La CC es de más de 1000 Km de ancho y alcanza velocidades superficiales menores a 0.25

m/s (Larios-Castillo, 1997), en cuanto que debajo de los 150 m, no excede de los 0.4 m/s. El flujo principal se encuentra completamente desarrollado de 25°N a 30°N desde la primavera hasta principios de verano, y de 30° N a 35° N en el verano y otoño (Hickey, 1979; en Larios-Castillo 1997).

Larios-Castillo (1997), obtiene valores superficiales máximos de velocidad, en Punta Descanso, de -0.15 a -0.25 m/s que asocia al flujo de la CC en octubre de 1995.

Lynn y Simpson (1987) reportan que la dinámica de las costas de Baja California se ven influenciada por la variabilidad estacional de la CC. El núcleo del flujo superficial de esta corriente es principalmente hacia el ecuador a lo largo de la costa, los máximos de velocidad que puede llegar alcanzar ocurren en marzo y abril. Los valores máximos reportados cercanos al área de Rosarito en los meses de enero, marzo, mayo, julio, septiembre y noviembre son de -0.08, -0.20, -0.20, -0.12, -0.04 y 0 m/s, respectivamente.

Las variaciones estacionales del flujo también están influenciadas por la Corriente Subsuperficial (CSs) que se caracteriza por ser un flujo subsuperficial, hacia el polo, alrededor de los 250 m y se detecta a menos de 100 Km de la costa, frente a Baja California. Este flujo está presente todo el año excepto de marzo a mayo (Lynn, 1987). Las corrientes relativas usando el

balance geostrófico sugieren que la CSs alcanza velocidades de 0.1 m/s entre los 200 y 300 m de profundidad, mientras que las mediciones directas indican velocidades de hasta de 0.4 m/s en el núcleo de la CSs y hasta de 0.2 m/s a los 400 m (Badan-Dangon et al., 1989). Estos valores coinciden con los encontrados por Tsuchiya (1979) para velocidades geostróficas promedio en la zona, que registra velocidades máximas aproximadas de 0.10 m/s y la velocidad estimada por Wooster (1970) y Reid (1963) es en promedio menor a 0.25 m/s.

Winant y Bratkovich (1981) reportan resultados de velocidades geostróficas de corrientes y concluyen que en promedio, las corrientes a lo largo de la costa para la superficie, son hacia el sur durante todas las estaciones del año, con una magnitud menor a los 0.10 m/s, sin embargo en sus resultados, ellos presentan una variabilidad estacional de las corrientes superficiales a lo largo de la costa que presentan promedios de  $-0.03$ ,  $-0.01$ ,  $-0.02$ ,  $-0.01$  m/s para las estaciones de primavera, verano, otoño e invierno respectivamente.

Godínez-Sandoval (1986) reporta una velocidad promedio de corrientes a lo largo de la costa generadas por viento y marea de 0.25 m/s con máximos de 0.35 m/s hacia el sur durante marzo, y en julio encontró intensidades promedio de 0.15 m/s y máximos de 0.35 m/s hacia el norte.

Las temperaturas superficiales promedio de la CC son aproximadamente 13°C en el invierno y 20°C en el verano. En el verano los perfiles verticales de temperatura consisten de tres capas: una capa superficial tibia, que no excede los 5m de espesor con una temperatura de 10°C, una capa de fondo, una capa donde interviene la termoclina, que tiene un grosor de 20m, en el cual el gradiente de temperatura es constante ( $\sim 0.25^\circ\text{C m}^{-1}$ ). Mientras que en el invierno la diferencia entre las temperaturas media superficial y la de fondo en los 60 m de profundidad es únicamente de 2.3°C. El campo de temperatura en la plataforma es aproximadamente uniforme con un valor típico medio de 13°C (Winant, 1980). El promedio de la velocidad del viento para la zona es de aproximadamente 8 km/h (Gaul, 1960).

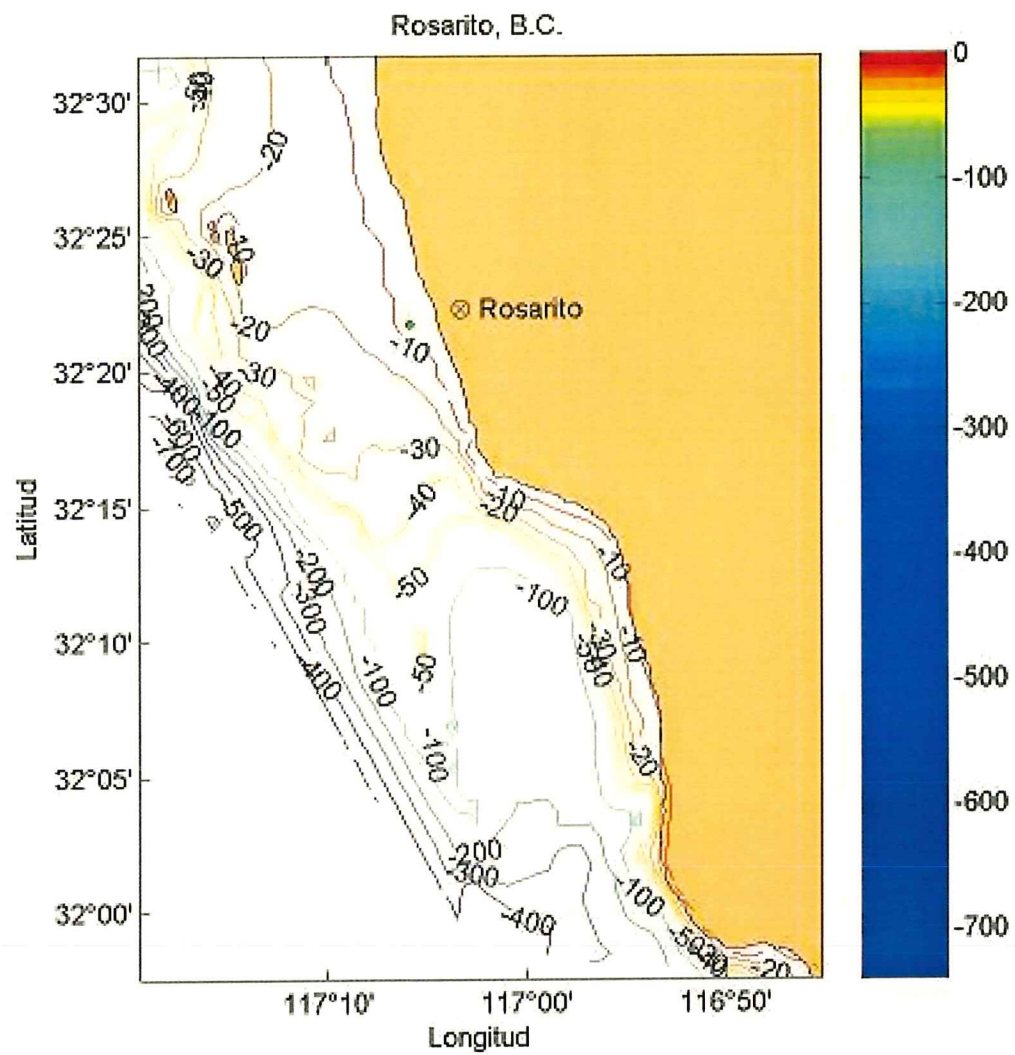
Gaul y Steward (1960), hacen un estudio frente a San Diego e indican que la variación de período corto (3 – 3.5 hr.) en los movimientos del agua con profundidades del fondo mayores a los 10 o 15 m, es principalmente debido al viento, mientras que a menores profundidades fueron inducidas principalmente por la marea.

Lentz (1984) determinó las características de los movimientos subinerciales (período > 36 h) y encontró que cerca de la costa ( $\approx 3$  Km) este movimiento es debido al esfuerzo del viento, mientras que lejos de ella, se

debe a los gradientes de presión. En ambos casos las fuerzas generadoras del movimiento están balanceadas por el esfuerzo en el fondo.

Godínez-Sandoval (1986), calculó un coeficiente de difusión promedio perpendicular a la costa de  $6.2 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  para marzo y  $2.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  en julio y un coeficiente de difusión promedio paralelo a la costa de  $27.4 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  y  $12.7 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ , respectivamente.

Bravo-Chávez(1989), reporta valores promedio de difusión para marzo de  $K_x$  de  $2.0 \times 10^5 \text{ cm}^2/\text{s}$  y para  $K_y$  de  $1.1 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ , indicando claramente una mayor difusión en dirección longitudinal de la corriente y para julio los valores promedio de los coeficientes longitudinal y transversal ( $K_x$ ,  $K_y$ ), fueron de  $2.5 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$  y  $1.6 \times 10^4 \text{ cm}^2/\text{s}$ , respectivamente. Esto señala que la difusión es más intensa en la dirección del flujo.



**Figura 3.** Área de estudio y localización de la monoboya (punto verde).

#### IV. METODOLOGÍA

El modelo de trayectoria del derrame de hidrocarburos simula el movimiento de estos debido a corrientes forzadas por vientos, asociadas a mareas, corrientes regionales y dispersión. De acuerdo con lo anterior el modelo predice la trayectoria del derrame.

El modelo describe el escenario del accidente mediante un banco de información que éste mismo contiene. El programa crea y despliega un video en el que se indica la posición donde ocurre el derrame y describe la trayectoria que ha de seguir bajo las condiciones impuestas. La animación de las trayectorias esta representada por una animación de puntos que se registran para cada hora, así como también, por medio de otro gráfico, se indican las zonas vulnerables a estos derrames.

Para indicar las zonas vulnerables en la costa se hizo un ajuste de polinomios en esta. La línea de costa se dividió en cuatro partes, se tomaron los segmentos más rectos que se identificaban en esta, para que el ajuste fuera lo más simplificado, y se ajustaron polinomios de quinto grado a cada uno de estos segmentos para restringir el espacio que debía seguir la trayectoria de las partículas y no sobrepasaran la línea de costa y las zonas vulnerables no quedaran sobre tierra firme. Se tomo un polinomio de quinto grado ya que resulto ser el adecuado para reproducir la línea de costa.

Los archivos que conforman la base de datos contiene variables de vientos, mareas, corrientes y topografía del área de estudio que proporcionan al programa los elementos ambientales necesarios para definir la circulación de la zona.

El petróleo y/o sus derivados son representados como una gran cantidad de partículas y el transporte de éstas esta en función del campo de corrientes debido a marea, forzada por viento, corriente geostrofica y dispersión. Toda la programación del modelo, análisis y visualización de los datos se realizó usando el programa de cómputo MATLAB.

Los datos analizados se obtuvieron de bancos de datos históricos, como fue en el caso de predicción de corrientes en Rosarito, B.C. (Mancillas-Mancera, 2001), características del hidrocarburo y datos de viento, proporcionados por la Secretaria de Marina, PEMEX e Instituto de Oceanografía Scripps respectivamente.

#### IV.1. ENUMERACIÓN DE VARIABLES

Las principales variables que se incluyen en este modelo son:

Concentración y posición del contaminante	$c(x, y, t)$
Corrientes	$\underline{U}(t)$
Vientos	$\underline{w}(t)$
Corrientes por viento	$\underline{U}_w(t)$
Corrientes por marea	$\underline{U}_\eta(t)$
Coefficiente de difusión horizontal	$K_h$

## IV.2. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático se basa en la ecuación de conservación del contaminante, en la cual están involucrados procesos advectivos, difusivos y la presencia de fuentes y sumideros, está se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(uc) + \frac{\partial}{\partial y}(vc) = Q^+ + Q^- + \frac{\partial}{\partial x}\left(K_h \frac{\partial c}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(K_h \frac{\partial c}{\partial y}\right), \quad (1)$$

(Sherwin, 1992). Donde  $c$  es la concentración del contaminante,  $u$  y  $v$  son las componentes horizontales del movimiento del fluido,  $K_h$  es el coeficiente de difusión horizontal,  $Q^+$  es el incremento de la concentración del contaminante por unidad de tiempo y  $Q^-$  es el decremento de la concentración del contaminante por unidad de tiempo.

El transporte advectivo en la Ec. 1, esta dado por las componentes horizontales del movimiento del fluido en dos dimensiones ( $x$ ,  $y$ ), que es el cambio de la concentración en el tiempo, con respecto a las fuerzas que influncian el movimiento, en este caso las componentes de marea, viento y corrientes que son representadas en la ecuación de difusión (Ec. 1), por  $u$  y  $v$ . Mientras que la difusión turbulenta esta dada por el cambio de la concentración ( $c$ ) con respecto a los coeficientes de difusión horizontal ( $K_x$ ,  $K_y$ ), y la acumulación local va depender de las fuentes y sumideros que hagan variar la concentración del contaminante con respecto al tiempo ( $Q^+$ ,  $Q^-$ ).

El comportamiento de la concentración del derrame, expuestos a condiciones ambientales, a través del tiempo presenta una distribución gaussiana a partir de una concentración inicial.

La solución de la ecuación de difusión en dos dimensiones para un derrame constante estacionario es la siguiente:

$$C(x, y, t) = C_0 \cdot e^{\frac{-x^2 + y^2}{(2\sigma(t))^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma(t)}}, \quad (2)$$

donde  $C_0$  es la concentración inicial, la exponencial está representando la distribución gaussiana en ambas direcciones ( $x, y$ ), donde  $\sigma$  esta relacionado con el proceso de difusión mediante la siguiente ecuación:

$$\sigma^2 = 2 * K * t, \quad (3)$$

donde  $K$  es el coeficiente de difusión del contaminante y el  $t$  el lapso de tiempo en el que ocurre el derrame.

Para el caso de un derrame continuo pero teniendo un efecto de corrientes sobre este, la solución de la ecuación de difusión las considera de la siguiente manera:

$$C(x, y, t) = C_0 \cdot e^{\frac{-(x-ut)^2 + (y-vt)^2}{(2\sigma(t))^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi \cdot \sigma(t)}}, \quad (4)$$

donde  $u$  y  $v$  son las componentes de dichas corrientes bajo las que esta impuestas el proceso de difusión.

Las corrientes forzadas por marea (Fig. 4f) se obtuvieron de un programa de Pronóstico de Corriente de Marea frente a Rosarito, B.C., realizado por la Secretaría de Marina (Mancillas-Mancera, 2001).

## V. RESULTADOS

La base del modelo matemático cuenta con un banco de datos de la línea de costa de Rosarito, B.C., de predicción corrientes de marea de veinte años, (1997 a 2016), y considera a la CC como una variable constante con un valor de 0.1 m/s con dirección hacia el sur. A través de las interfases gráficas (Fig. 4) el modelo va capturando la información que requiere, datos como: fecha del derrame, hora de inicio, el tiempo de duración que se desea predecir el derrame (Fig. 4a), las condiciones de viento, tales como, variabilidad del viento (Fig. 4b), dirección y magnitud de este (Figs. 4c, d y e). Para evaluar las condiciones de viento en el modelo se hicieron correcciones tanto para la magnitud como para la dirección. Según Gaul y Steward (1960), en la zona de la San Diego, CA. , el esfuerzo total que el viento produce sobre la superficie del mar es una corriente del 3% de su magnitud, y sufre una desviación de aproximadamente 15° hacia la derecha. Para la distribución de la mancha, primero se ubicó el punto del derrame, que para este caso es la toma del oleoducto a las afueras de las instalaciones de PEMEX (32° 21' 43" N, 117° 05' 49" W), el movimiento de las partículas, que representan al contaminante, es debido a una difusión, representado por un movimiento aleatorio con distribución gaussiana, mas el movimiento causada por la corriente de marea, generada por viento y la corriente geostrofica observada para esa época. El coeficiente de difusión usado, para las características del combustóleo, fue de  $K = 1.1 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$  (GNOME, 2002). Todos los factores antes mencionados son



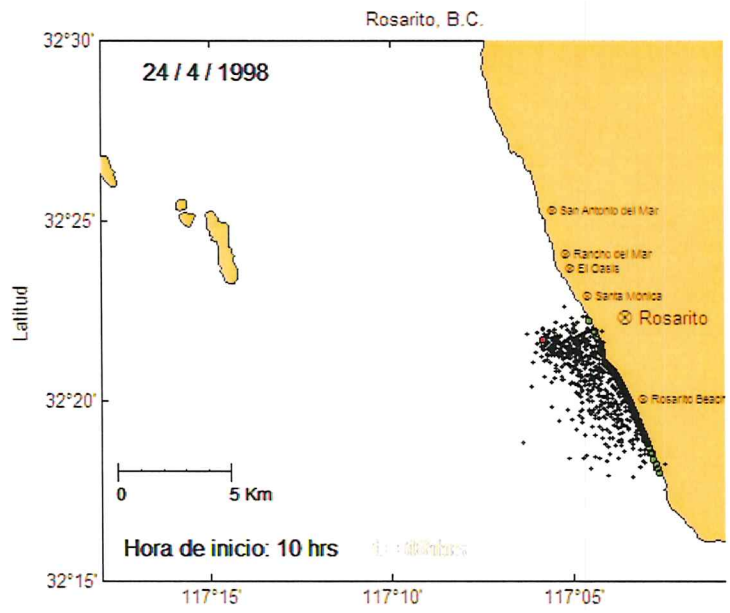
usados en el modelo numérico para predecir la trayectoria de las partículas para un cierto día, hora y condiciones de viento especificados. El programa produce una gráfica de la variación del nivel del mar y corrientes asociado a la marea, y comienza a calcular la trayectoria de las partículas por procesos advectivos y difusivos. El programa crea un video de la secuencia del accidente, él cual proyecta el área de estudio, la ubicación del derrame y el movimiento de las partículas que predicen la dirección del derrame, este movimiento puede estimarse para cada 15 minutos o cada hora, según el usuario lo requiera, el video también facilita la ubicación de las zonas vulnerables que se pueden ver afectadas por el accidente, estas zonas son remarcadas por medios de gráficos puntuales (círculos verdes) (Fig. 4g).

Se han tenido reportes de derrames en algunas ocasiones, siendo los de mayor impacto los ocurridos el 24 de abril de 1998 y el 13 de mayo de 1999. Se realizaron las simulaciones considerando el derrame desde la monoboya para estos días y se compararon con lo reportado en las actas de la Secretaría de Marina (Acta Núm. 001/98, Carta Nacional de la contaminación marina, mayo 1999). En este ejercicio se compararon las zonas impactadas por dichos accidentes y por las estimaciones realizadas por el modelo para esos mismos días y bajo las mismas condiciones oceanográficas y meteorológicas.

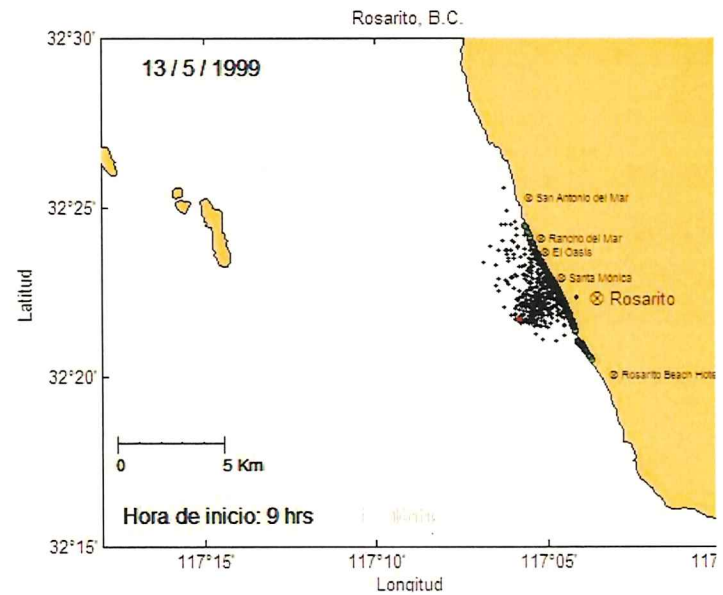
En los reportes del accidente del día 24 de abril, describen que el inicio del derrame ocurrió aproximadamente a las 10 hrs y que impacto aproximadamente 500 m de línea de costa al sur del canal de descarga y en la parte norte de la escollera sur en la porción de la playa se observaron porciones de arena impregnada de hidrocarburos. En las estimaciones realizadas por el modelo toca los puntos impactados, la mancha principalmente se dirige hacia el sur, el modelo fue forzado por las condiciones de marea del lugar así como los vientos descritos para ese día por la estación meteorológica del muelle de Scripps, La Jolla CA, (CDIP<sup>3</sup>), (Fig. 5a). Se observa en la gráfica de las componentes de marea que las corrientes al inicio del derrame van hacia el SE con intensidades mayores de 0.1 m/s y estas condiciones se mantienen aproximadamente durante las primeras 20 horas, para después ir disminuyendo su intensidad a 0.07 y 0.04 m/s aproximadamente y a partir de las 21 hrs cambiar de dirección hacia el N y NNW (Fig. 6a). En el caso de los vientos se observa en la gráfica de las componentes de viento que a partir de la hora a la que ocurre el accidente y las siguientes 6 hrs predominan vientos que vienen del NNW o del N con intensidades que van de los 4 a los 2 m/s aproximadamente, a partir de las 16 a las 24 hrs, hay un cambio en la dirección del viento que vienen principalmente hacia el W con intensidades cerca de los 4 m/s (Fig. 6b).

---

<sup>3</sup> Coastal Data Information Program. <http://cdip.ucsd.edu/>

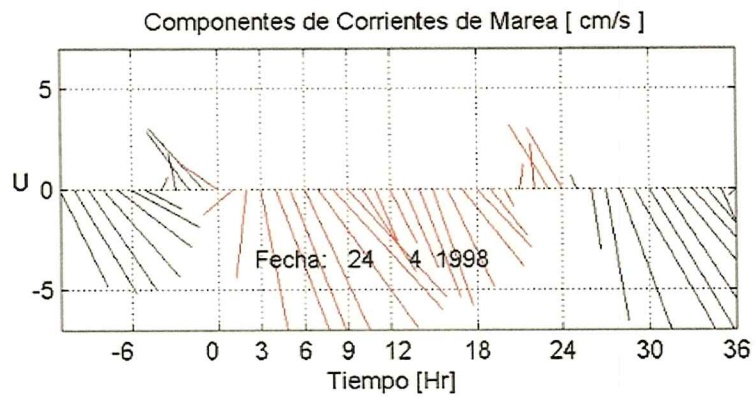


(a)

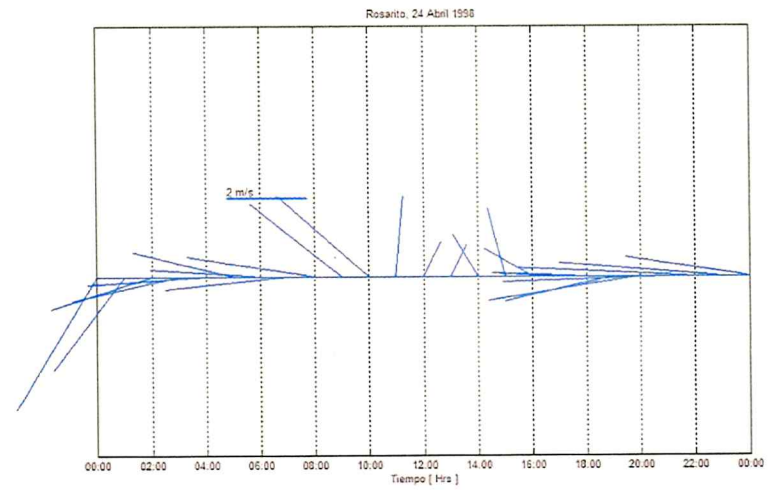


(b)

**Figura 5.** Área impactada estimada por el modelo, en la zona de Rosarito, B.C. por los derrames ocurridos el 25 de abril de 1998 (a) y el 13 de mayo de 1999 (b).



(a)



(b)

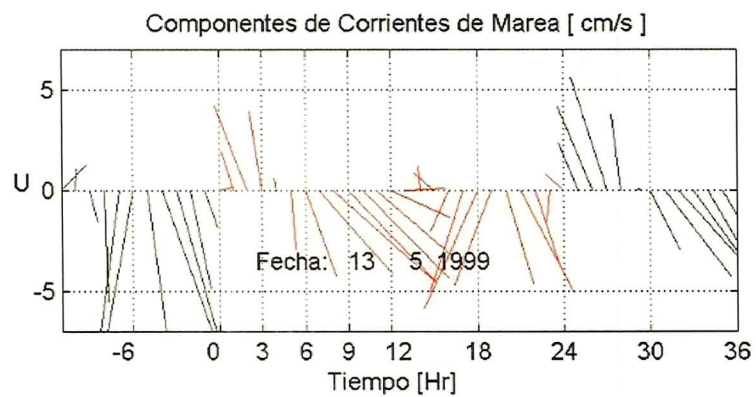
**Figura 6.** Componentes de marea (a) y de viento (b) para el día 24 de abril de 1998.

El accidente del día 13 de mayo, fue uno de los derrames que causo mayor impacto en la zona costera, provocando una contaminación en aproximadamente 4.5 Km de playa al norte de Rosarito, las zonas afectadas fueron desde la playa de Santa Mónica hasta la playa de El Oasis. La hora de inicio de dicho accidente fue alrededor de las 9 hrs. En la estimación del modelo bajo las condiciones impuestas para ese día coinciden las áreas impactadas de acuerdo a las zonas que se reportaron afectadas (Fig. 5b). Ambos resultados, tanto de lo reportado como de lo estimado por el modelo se observa que el derrame fue influenciado por la marea así como por las condiciones de viento para ese día.

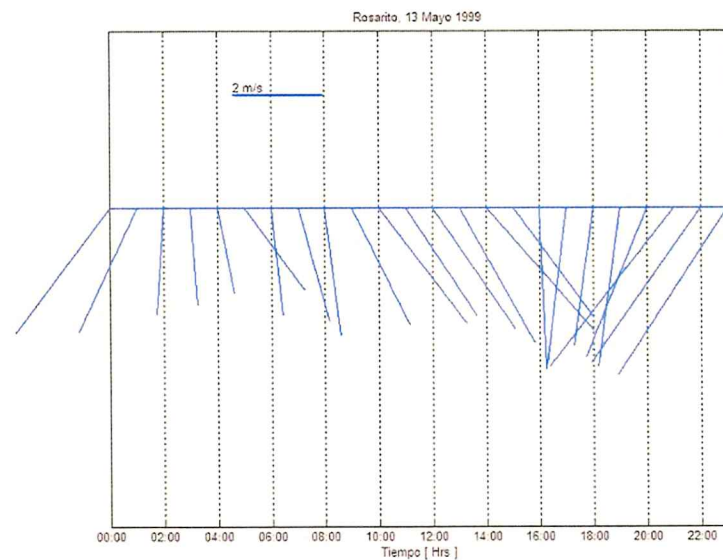
Las componentes de marea para ese día a partir de la hora de inicio del accidente, se observa que para las primeras 4 hrs tienen una dirección hacia el NNE con intensidades que van de los 0.02 a los 0.05 m/s, de las 5 a las 12 hrs siguientes predominan direcciones al SE, con magnitudes de 0.04 a 0.07 m/s, para posteriormente cambiar hacia el SW con intensidades similares hasta las 19 hrs, y en las últimas horas de predicción se observa de nuevo un cambio de dirección hacia el SE conservando los valores de magnitud de 0.04 a 0.07 m/s (Fig. 7a).

En el caso de las componentes de viento a partir de las 9 hrs, se tienen vientos que vienen del SE, a partir de las 16 hrs a las 19 hrs los vientos vienen

principalmente del S, y en las últimas 4 hrs la dirección de estos cambia al SW, predominando en todos los casos magnitudes de 3 a 4 m/s (Fig. 7b).



(a)



(b)

**Figura 7.** Componentes de marea (a) y de viento (b) para el día 13 de mayo de 1999.

## VI. DISCUSIONES

Acerca del modelo, al usar interfases gráficas se obtiene una mayor accesibilidad para el uso de este, sin depender de una persona o conocimientos especializados para poder manejarlo, así como facilidad que este tiene para re-programarlo al cambiar las condiciones meteorológicas si la situación lo requiere y hacer más confiable la predicción. El usuario puede cambiar los escenarios, es decir, cambiar la fecha y hora del derrame y probar diferentes condiciones de viento, tanto en dirección como en su rapidez. Otra de las ventajas del modelo es que nos permite la visualización de las condiciones de marea y hacer una evaluación de que tan favorecedoras o perjudiciales pueden ser estas para los efectos que pueda ocasionar el derrame, ya que el modelo despliega gráficas que muestra, el nivel del mar, con respecto al nivel bajamar medio inferior, así como las componentes de marea, para el día del accidente, remarcando en rojo las condiciones que prevalecen durante el accidente, y graficando en negro las condiciones de marea 12 horas antes y después del accidente (Fig. 4f), guardando estas gráficas en un archivo independiente que crea una imagen con extensión JPG en el mismo directorio que se encuentra la programación del modelo de la interfase gráfica, para poder consultarla sin necesidad de reiniciar el modelo para visualizarla de nuevo. En cuanto a las corrientes regionales del lugar, se considera a la CC, siendo la principal corriente reportada en la zona, la CC es una corriente con variaciones estacionales en cuanto a velocidad superficial,

por lo que se toma el valor máximo reportado para la zona por Larios-Castillo (1997) de 0.15 m/s, coincidiendo este con Wooster (1970) y Reid (1963) y abarcando el valor promedio reportado por Winant y Bratkovich (1981) de 0.1 m/s, coincidiendo todos que mantiene un flujo paralelo a la costa con dirección hacia el sur. El modelo al guardar los datos de viento, este hace las correcciones por efecto de la rotación de la Tierra, sin embargo no hace la corrección en cuanto a dirección con respecto al norte geográfico, por lo tanto el usuario deberá de corregir ese error al sumarle a los datos, si es que se tienen en norte magnético, el valor de  $11.6^\circ$ . El modelo, toma los valores de marea y viento a partir de la hora de inicio del accidente sin acarrear el esfuerzo de estas variables unas horas antes de que éste suceda, por lo que puede presentar un margen de incertidumbre a la hora de evaluar la corriente y predecir la trayectoria del derrame, esto solo al inicio de esta predicción, sin embargo es un error en el que tienden a caer otros modelos de predicción, como es el caso del GNOME, que evalúa las condiciones del accidente sin tomar en cuenta las anteriores circunstancias a éste. El coeficiente de difusión se obtuvo del programa GNOME, éste corresponde al combustóleo (Fuel Oil No. 6), que es el principal hidrocarburo que maneja PEMEX en el área de estudio.

Para el caso del accidente del 24 de mayo vemos como se combinan las componentes tanto de viento como de marea. Se observa en las gráficas de

componentes de marea y de viento que la corriente resultante de estas dos condiciones es hacia el sur principalmente, en las primeras seis horas en que se desarrolla el derrame, debido a que tenemos corrientes de marea que van hacia el SE y vientos que vienen del N, generando, estos últimos, una corriente hacia el S, las intensidades de marea para estas horas van desde los 0.02 a los 0.08 m/s aproximadamente, y las intensidades de viento son similares alcanzando máximos de 0.12 hasta mínimos de 0.03 m/s aproximadamente, esto ya considerando que solo el 3% de la magnitud del viento corresponde al esfuerzo total de éste sobre la superficie del mar, por lo que los valores de 0.12 y 0.03 m/s corresponden a vientos de 4 y 1 m/s respectivamente. De las 7 a las 13 hrs, después de iniciado el derrame, las condiciones de marea siguen constantes con respecto a las primeras horas que ocurre el accidente, las componentes principalmente tienen una dirección hacia el SE, con magnitudes que van desde los 0.1 a los 0.03 m/s, mientras que en los vientos se ve un cambio de dirección, son vientos principalmente que vienen del W generando una corriente hacia E, con intensidades de 0.06 a 0.12 m/s que corresponden a vientos de 2 a 4 m/s, favoreciendo las condiciones para que el derrame vaya hacia la costa (Fig. 6).

En el caso de las primeras seis horas del accidente, observamos como las mareas van de menor a mayor intensidad mientras que en los vientos sucede lo contrario, estos empiezan con vientos moderados y para el termino

de estas primeras horas se tienen vientos de intensidades bajas, por lo que aquí se puede ver que hay un balance entre estas dos variables sin dominar una sobre otra, manteniendo una estabilidad en la suma de las componentes, generando una corriente principalmente hacia el SSE. En cambio para el resto de las horas del accidente vemos que las condiciones cambian, las mareas tienen intensidades mucho más grandes al inicio, debilitándose al final de la predicción. Para este intervalo de tiempo, se observa un ligero cambio en la dirección de las componentes de marea orientándose más al SE, favoreciendo que la corriente comience a ir hacia la costa, en cuanto a los vientos sucede nuevamente lo contrario que para las mareas, las intensidades van de menor a mayor. Bajo estas condiciones el derrame comienza a ser influenciado por la marea, tendiendo a seguir la dirección de esta, pero conforme pasa el tiempo el derrame se va viendo influenciado por el viento, en donde empieza predominar la corriente generada por el viento hacia el E, impactando así varios kilómetros de playa hacia el sur de la descarga.

De igual manera se ve para el accidente del 13 de mayo, la combinación de las variables tanto de viento como de marea hacen que la trayectoria del derrame vaya hacia la costa. En las primeras tres horas en que sucede el derrame, las corrientes de marea van hacia del NNW hacia el N con intensidades de 0.05 m/s a 0.01 m/s, mientras que las de viento de las 9 a las 12 hrs vienen del SE, originando corrientes hacia el NW con intensidades de

0.09 m/s, que corresponden a vientos de aproximadamente 3 m/s, por lo que al inicio del accidente el derrame se dirige principalmente hacia el N, las tres horas siguientes después de comenzado el derrame las condiciones de marea empiezan a cambiar generando corrientes hacia el SE con magnitudes desde los 0.05 a los 0.07 m/s y los vientos se mantienen constantes, por lo que la trayectoria del derrame comienza a cambiar dirigiéndose hacia la costa, pero a partir de la séptima hora las mareas mantienen la corriente hacia el SE con intensidades de 0.08 a 0.05 m/s a las trece horas de predicción, mientras que los vientos comienzan a cambiar de dirección generando corrientes hacia el N y el NE con intensidades que van de los 0.09 a 0.12 m/s, correspondientes a vientos que vienen del S y SW con magnitudes de 3 a 4 m/s respectivamente, implicando así que las condiciones favorecieran que el derrame impactara sobre la costa (Fig. 7).

En el caso contrario al accidente ocurrido el 24 de abril, donde ambas variables iban forzando a la par la trayectoria del derrame, el del 13 de mayo se ve más influenciado por los vientos que por las mareas, debido a que los vientos se mantuvieron constantes en cuanto a intensidades, siendo casi siempre mayores que las magnitudes de marea, que a pesar de que la marea presentó un cambio abrupto de dirección hacia el SE, la corriente se mantuvo casi siempre la N o al NNE debido a que la fuerza ejercida por el viento sobrepasaba a la ejercida por la marea, sin embargo no puede discriminarse la

fuerza ejercida por esta, ya que si bien no cambio la dirección de la corriente principal si tuvo un efecto al ir dirigiéndola hacia la costa.

Estableciendo los resultados de manera general, podemos observar que el modelo dio los resultados esperados al predecir las zonas que podían ser vulnerables al derrame. En el caso del día 24 de abril de 1998, la corriente principal, ejercida por marea y viento, hizo que la trayectoria del derrame fuera hacia el sur de Rosarito, tocando los puntos cercanos a la zona de descarga de la Planta Termoeléctrica de la CFE, y en el caso del accidente del 13 de mayo de 1999, la corriente generada por las condiciones meteorológicas y oceanográficas estimadas para ese día (viento y marea, respectivamente), provocó que el derrame siguiera una trayectoria hacia el NE impactando principalmente la zona norte de Rosarito, desde la playa Santa Mónica hasta la playa El Oasis. En ambos casos coincidieron las zonas impactadas estimadas por el modelo, así como las zonas impactadas reportadas por Secretaría de Marina (Fig. 5).

Los resultados expedidos por el modelo comparados con los datos reales nos dan una buena estimación de que el modelo satisface las necesidades del usuario conforme a las variables establecidas en éste, sin embargo no podemos dejar de lado que las predicciones realizadas no son del todo exacta, una prueba es que el área impactada estimada por el modelo es

mucho más grande que la reportada para el caso de los dos accidentes, esto se debe en primer lugar que el modelo no considera la cantidad de hidrocarburo derramado si no que siempre considera el derrame como continuo lo que hace que la mancha conforme pasa el tiempo vaya incrementándose y la vaya distribuyendo en una mayor área, por lo que hace la cobertura más amplia, otro factor que puede hacer discernir un poco la cobertura del derrame, es que los reportes de Secretaría de Marina se informa del tiempo de inicio del accidente pero en ninguno de estos reportan a las cuantas horas fue controlado el derrame, por lo que hizo la estimación para las primeras 13 horas a partir de que ocurre el accidente, por lo que la cobertura también se ve afectada por el tiempo, puede que se haya controlado en menor tiempo que lo estimado y el derrame haya abarcado una menor área.

Modelos como el GNOME y el HIROMB son modelos de predicción de derrames de hidrocarburos que se han implementado para las costas de EUA y para los Países Bálticos respectivamente. Las principales características de estos es que son modelos accesibles para el usuario, que el tiempo de evaluación de las condiciones en las que se lleva a cabo el derrame es de manera muy rápida lo que permite a las autoridades correspondientes tomar decisiones respecto al plan de contingencia que se tenga realizar.

Así el modelo desarrollado en este trabajo, ha tratado de seguir este formato, y se puede tomar como antecedente para trabajos futuros que puedan realizarse a partir de este, ya que por lo que reporta puede ser utilizado como base para otras costas mexicanas, obviamente cambiando condiciones topográficas, meteorológicas y oceanográficas de la zona en la que se desee implementar el modelo, ya que la base principal del modelo esta basado en la ecuación de difusión que a su vez se ve forzada por condiciones de viento, marea y características del contaminante (coeficiente de difusión).

Una gran ventaja de este modelo, es su accesibilidad, fácil de programar, para tener las diferentes condiciones meteorológicas (viento) y oceanográficas (marea y corriente regional) con que tiene este último para hacer una predicción inmediata haciendo uso de requerimientos de cómputo modestos. El modelo considera las condiciones prevalecientes en el momento que ocurre el derrame y, gracias a las interfases gráficas, lo hacen muy accesible y manejable para que el usuario pueda utilizarlo sin considerar la facilidad que pueda tener este para manejar un programa de cómputo específico.

Hasta el momento y conforme a lo investigado, actualmente no existe un modelo con estas características en México para ninguna costa mexicana que realice o se vea expuesta al manejo de hidrocarburos y sea vulnerable a un

derrame, por lo que se puede considerar como un modelo innovador que sirva de punto de partida para desarrollar o hacer una extensión del modelo a otras costas del país, ya que representa de inicio una buena estimación de un posible accidente y así poder facilitar las decisiones que se deban de tomar para realizar un plan de contingencia de acuerdo a las características de cada zona que se pueda ver afectada, y proteger a su vez los recursos naturales del país.

Este modelo puede ser implementado en las Secretarías que les corresponde tomar las decisiones en caso de que haya un estado de emergencia por un derrame de petróleo, como pueden ser Secretaría de Marina, PEMEX, PROFEPA, SEMARNAT y Gobierno del Estado.

## VII. CONCLUSIONES

El modelo, basado en la ecuación general de difusión (Ec. 1) y usando el patrón de corrientes generados por marea, viento y corriente geostrófica, da una estimación de la trayectoria del derrame y de las zonas vulnerables que puedan ser afectadas.

Para los accidentes del 24 de abril de 1998 y 13 de mayo de 1999, el modelo fue capaz de predecir las trayectorias de los derrames para dichos accidentes, así como las áreas impactadas por estos, las cuales coincidieron con las reportadas con Secretaría de Marina, dejando ver la utilidad y certeza que tiene el modelo.

La marea, el viento y la variabilidad de la corriente regional (CC) son condiciones imprescindibles con las que se debe contar a la hora de evaluar la trayectoria del derrame, debido a que son las fuerzas principales que tienen el mayor efecto sobre la dirección que pueda tomar el derrame. Así como se comprobó en los resultados, que tanto la marea y el viento son condiciones muy variables y pueden ser igual de importantes, ya que en algunos casos puede predominar una sobre la otra, pero una estimación no podría ser del todo cierta si faltase alguno de estos dos factores físicos y la incertidumbre de la evaluación se incrementaría, reduciéndole certidumbre de la predicción.

El modelo numérico realizado en este trabajo, para la predicción de derrames de hidrocarburos, es un programa a escala regional, de fácil manejo, que a través de las interfases gráficas, y debido a que anteriormente no se había trabajado un programa que englobara características meteorológicas y oceanográficas, y bajo estas condiciones, pueda estimar las trayectorias de accidentes por derrame en la zona.

El modelo no se limita a evaluar las condiciones del derrame para una sola ocasión, puede estimarse la trayectoria para cualquier momento dentro de un margen de tiempo.

El modelo satisface las necesidades del usuario de obtener información confiable, sobre la dirección y destino que pueda tener un derrame bajo las condiciones impuestas por el medio, de manera rápida.

El modelo es reprogramable, accesible, así como presenta una fácil visualización e interpretación de los resultados a través de un video, que puede reproducirse las veces que se requiera.

## VIII. REFERENCIAS

- Appendini-Albrechtsen, C.M. 1995. Aplicación de un modelo numérico para la estimación de volúmenes de azolve en la central termoeléctrica de Rosarito, B.C. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Badan-Dangon, A., J.M. Robles, J. García. 1989. Poleward flows off Mexico's Pacific coast. en Poleward flows along eastern ocean boundaries. Coastal and Estuarine Studies. No. 34, editado por S.J. Neshyba, Ch. N. K. Mooers, R. L. Smith y R. T. Barber, 176-202.
- Bravo-Chávez, A. B., 1989. Coeficientes de difusión frente a la costa del municipio de Tijuana, B.C.. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California.
- Bowden, K. F.. 1983. Physical oceanography of coastal waters, Halsted Press. New York, EEUU.
- Gaul, R.D., and S. B Jr. Harris, 1960. Nearshore Ocean Currents off San Diego, California. J. Geophys. Res., 65(5)., 1543-1556.
- Godínez-Sandoval V.M.,1986. Dispersión frente a la costa de Rosarito, B.C.. Tesis de Licenciatura. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada.
- Hickey, B. M., 1979. The California Current System hypotheses and facts. Prog. Oceanogr. 8, 191-279.
- Larios-Castillo, S.I., 1997. Características de la circulación en la región costera entre Tijuana y San Quintín, Baja California, México, durante octubre de 1995 y junio de 1996. Tesis Maestría, Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada. 80 pp.
- Lynn, R.J. and J. J. Simpson, 1987. The California Current System: The seasonal variability of its physical characteristics. J. Geophys. Res., 92(C12): 12947-12966.

- Mancillas-Mancera, M., 2001. Pronóstico de Corriente de Marea frente a Rosarito, B.C., Secretaria de Marina. Dirección General de Investigación y Desarrollo. Dirección General Adjunta de Oceanografía y Biología.
- Marichal-González, A. E., 2001. Análisis estadístico del oleaje medido frente a las costas de Rosarito, B.C., de 1994 a 1998. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada. 70 pp.
- NOAA., 2001. Manual de análisis de trayectorias. Seattle, USA. 41 pp.
- NOAA., 2002. GNOME. General NOAA Oil Modeling Environment. User's Manual. Revisado en Enero del 2002. por Office of Response and Restoration, National Ocean Service., Sitio Web: <http://response.restoration.noaa.gov/software/gnome/tools.html>.
- Reid J. L. Jr., 1963. Measurements of the California Countercurrent at a depth of 250 m. J. Mar. Res., 68, 4819-4822.
- Secretaría de Marina Armada de México. Acta Núm. 001/98. Orden de Comis. 1351. Abril 1998.
- Secretaría de Marina Armada de México. Carta Nacional de la Contaminación Marina. Informe Mensual. "Monitoreo de la calidad de agua en las playas de Tijuana y Rosarito, B.C.". Mayo 1999. Ensenada, B.C.
- Secretaria de Marina Armada de México. Plan de operaciones. "Contingencia Rosarito 2001". Simulacro de derrames de hidrocarburos. 2001. Ensenada, B.C
- Sherwin, T.J., 1992. Methods for determining pollutant dispersion in tidal waters. Vol. I. UCES REPORT: U89-5(1:3).
- Tsuchiya, M., 1979. Inshore circulation in the Southern California Bight, 1974-1977. Deep-Sea Research, 27A: 99-118.

U.S. Army Corps of Engineers. CDIP. The Coastal Data Information Program.  
por Scripps Institution of Oceanography. Sitio Web:  
<http://cdip.ucsd.edu>.

Wilshelssom, T. and J. Schüle., 1998. Information on the HIROMB Project.,  
Revisado el 13 de mayo de 1998 por Swedish Meteorological and  
hydrographical institute (SMHI). Sitio Web: [http://www.tu-  
bs.de/institute/WiR/HIROMB](http://www.tu-bs.de/institute/WiR/HIROMB).

Winant, C.D. and A. W. Bratkovich., 1980. Temperature and Currents on the  
Southern California Shelf: A Description of the Variability. J. Phys.  
Ocean. 11, 71-86.

Wooster W. S. y J. H. Jones. 1970. California undercurrent off northern Baja  
California. J. Mar. Res., 28(2), 235-250.