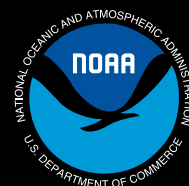




Manual de Análisis de Trayectorias

Administración Nacional de Océanos y Atmósfera • Servicio Nacional Oceánico
Oficina de Respuesta y Restauración • División de Respuesta a Materiales Peligrosos



Manual de Análisis de Trayectorias

Administración Nacional de Océanos y Atmósfera

Servicio Nacional Oceánico

Oficina de Respuesta y Restauración

División de Respuesta a Materiales Peligrosos

7600 Sand Point Way NE

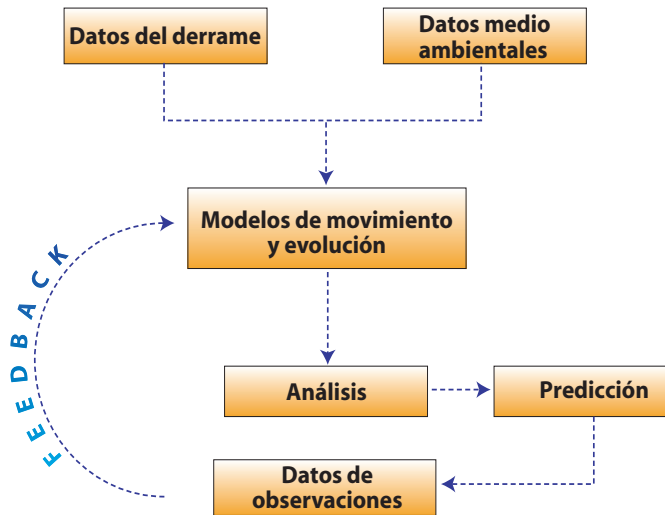
Seattle, Washington USA 98115

La División de Respuesta a Materiales Peligrosos de la NOAA proporciona apoyo científico a la Guarda Costera de los EE.UU. para casos de derrames en entornos marinos. Para mayor información, visite nuestro sitio web <http://response.restoration.noaa.gov>. Esta guía ha sido elaborada con la asistencia de la Agencia para el Desarrollo Internacional de los EE.UU

“¿Adónde irá el petróleo?”

Esta es una pregunta crítica que se plantea el personal de emergencia durante un derrame de petróleo. 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. Sin embargo, es muy difícil predecir exactamente el movimiento y el comportamiento de un derrame de petróleo. Esto se debe en parte a la interacción de los numerosos procesos físicos sobre los que la información es a menudo incompleta en las primeras fases de la respuesta. El diseñador del modelo debe actualizar por tanto las previsiones con nuevos datos y determinar las consecuencias y la probabilidad de otras posibles trayectorias en un proceso denominado “análisis de trayectoria”. El resultado final de un análisis de trayectoria es a menudo un mapa donde se muestra la previsión y los límites probables de incertidumbre del movimiento de la mancha.

Esta guía proporciona un resumen de los procesos físicos que afectan al movimiento y comportamiento del petróleo en el entorno marino. Los análisis de trayectoria se llevan a cabo habitualmente mediante modelos por computador para realizar el seguimiento de procesos complejos con interacciones mutuas. Es posible estimar el tiempo y la escala de distancia de un acontecimiento, incluso sin un modelo, utilizando la información que encontrará aquí. La guía puede ayudar al personal de respuesta y al planificador a comprender los procesos físicos y las posibles incertidumbres, incorporando el análisis de trayectoria en la respuesta.



Análisis de trayectoria

Prever el movimiento de un derrame de petróleo se ve dificultado a menudo por la insuficiencia de datos, especialmente durante las primeras horas después del vertido. Los datos del derrame (localización, volumen emitido, tipo de producto), a menudo son imprecisos y los datos ambientales (observaciones y previsiones de vientos y corrientes) escasos o inexistentes. No obstante, el diseñador del modelo debe estudiar los datos e intentar comprender los procesos fisicoquímicos que afectarán al movimiento y evolución de ese derrame en particular.

Con una comprensión de los procesos físicos, el creador del modelo puede proporcionar al Mando Unificado un análisis como previsión. Si la previsión inicial es inexacta, lo que puede suceder debido a información errónea sobre el derrame (p. ej. localización y cantidad de petróleo vertido) y/o datos ambientales erróneos (p. ej. previsión meteorológica) y limitaciones del modelo, el equipo de modelado revisa la nueva información y refina la previsión. En general, a medida que progresa el derrame, la previsión sobre el movimiento y la evolución del derrame se hace más precisa puesto que la calidad y la cantidad de los datos observados también mejoran (al tiempo que los datos sobre el derrame inicial se vuelven relativamente menos importantes).

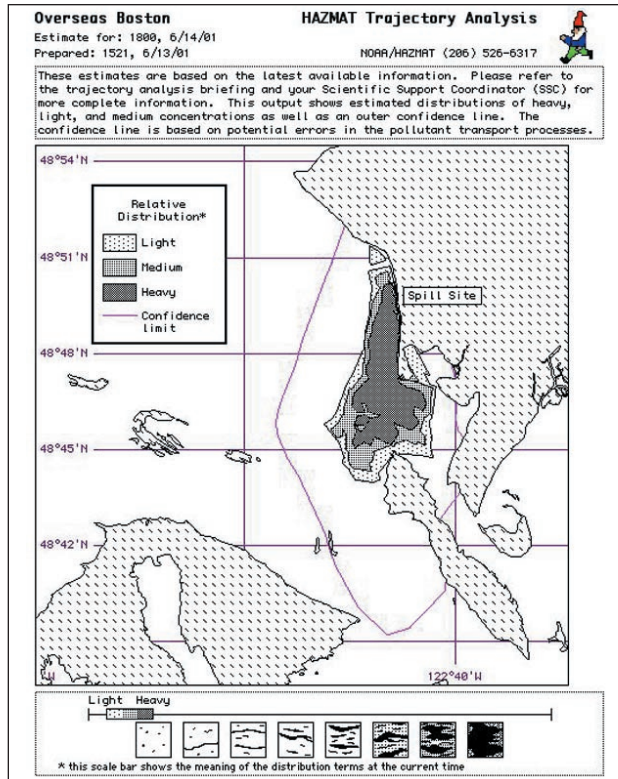
Incertidumbre

Los análisis de trayectoria deben incluir no sólo la “mejor estimación” del movimiento y evolución del petróleo sino también la incertidumbre en el derrame y en los datos ambientales utilizados para elaborar la previsión.

La incertidumbre en una previsión de trayectoria depende de la dimensión y de la escala temporal del derrame. En la tabla que sigue se muestra la incertidumbre para los datos de entrada requeridos por la mayoría de modelos de derrame de petróleo. Debe tenerse en cuenta que la incertidumbre en los resultados del modelo no es necesariamente proporcional a la incertidumbre de los datos de entrada.

Incertidumbre en los datos de entrada requeridos para la mayoría de los modelos de derrames de petróleo

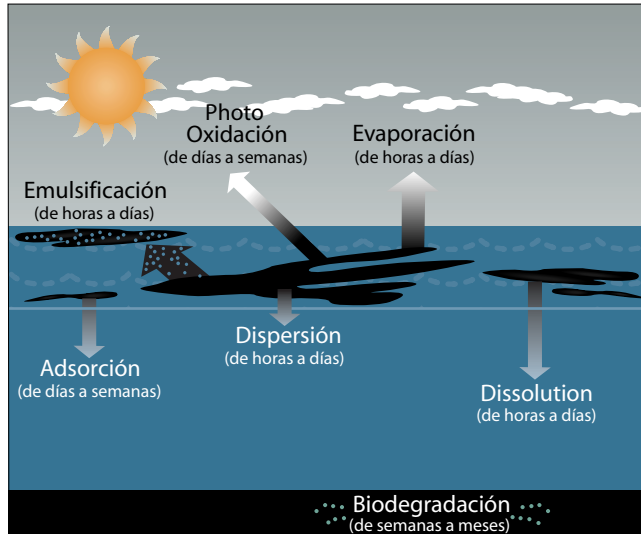
Categoría	Parámetro	Incertidumbre
Detalles del vertido	Localización del derrame	Baja - Media
	Hora del derrame	Baja - Media
	Tipo de petróleo (densidad, viscosidad)	Media - Alta
	Volumen potencial del derrame	Baja
	Volumen real del derrame	Alta
	Ritmo de vertido	Alta
Envejecimiento del petróleo	Productos ligeros refinados	Baja
	Fuel-oils intermedios (IFO 180, IFO 380, Bunker C, Fuel Oil #6)	Alta
	Crudos muy estudiados (Prudhoe Bay, Arabian, Ekofisk, Hibernia)	Baja
	Crudos	Media - Alta
Vientos	Observaciones	Baja
	Previsión de 24 a 48 horas	Baja - Media
	Previsión de 48 h a 5 días	Media - Alta
	Deriva por viento (habitualmente de 1 a 6%)	Baja
Corrientes de superficie	Ríos	Baja
	Áreas mareales con estaciones de corriente (a no ser que las corrientes sean débiles y variables)	Baja
	Laguna de aguas bajas	Baja - Media
	Plataforma (sobreelevaciones por vientos)	Media
	Pendiente continental p. ej., Corriente del Golfo, Corriente de California)	Baja
	Llanura Abisal	Alta
Turbulencia	Extensión	Media
	Difusión horizontal	Baja - Media



Muestra de mapa de análisis de trayectoria.

Análisis de trayectoria

La trayectoria se visualiza idealmente en un formato fácil de entender, que debería indicar tanto la predicción como la incertidumbre asociada. En este caso la “mejor estimación” prevista del movimiento del petróleo se superpone sobre un mapa de la orilla. La predicción se presenta como contornos de contaminación ligera, media e importante. La escala en la parte inferior del mapa representa el tanto por ciento de la superficie de petróleo cubierta por dichos contornos. El equipo que realizó el modelo tuvo en cuenta los errores plausibles en los datos del derrame y los datos medio ambientales; el contorno exterior coloreado indica un límite de confianza de la predicción del 90%. Esto proporciona una indicación de incertidumbre en el pronóstico.



Proceso de envejecimiento y escalas temporales

Las características físicas y químicas del petróleo empiezan a modificarse casi en el mismo instante en que se produce su derrame en el medio marino, debido a fenómenos de evaporación, dispersión, emulsificación, disolución, oxidación, sedimentación y biodegradación. Todos estos procesos interactúan unos con los otros y se les denomina colectivamente *envejecimiento del petróleo*. La siguiente tabla describe algunos de estos procesos de envejecimiento y sus escalas temporales, importantes para las respuestas de emergencia.

Procesos de intemperización y escalas de tiempo importantes para las respuestas de emergencia

Proceso de envejecimiento	¿Qué es?	¿Por qué es importante?	Escalas temporales
Evaporación	Conversión de una fase líquida a gaseosa. Las fracciones ligeras del petróleo son las primeras en perderse.	Principal causa de la desaparición del petróleo, especialmente para los crudos ligeros. En un intervalo de dos días a 15°C se evaporan el 100% de las gasolinas, el 80% de los combustibles diesel, el 40% de los crudos ligeros, el 20% de los crudos pesados y sólo del 5 a 10% de Bunker C	< 5 días
Emulsificación, o formación de mousse	Diminutas gotas de agua que se mezclan con el petróleo. El contenido en agua a menudo llega al 50-80%. Tiene lugar sobre agua y necesita un cierto oleaje.	Incrementa la cantidad de contaminante a recuperar en un factor de 2 a 4. Hace más lentos los otros procesos de mezcla.	Su inicio se puede retrasar durante días, pero una vez comienza, el proceso de emulsificación se desarrolla rápidamente.
Dispersión natural	Disgregación de una mancha de petróleo en pequeñas gotas que se mezclan con el agua debido a la energía del mar.	Elimina el petróleo de la superficie del agua.	< 5 días
Disolución	Mezcla de los componentes solubles en agua del petróleo con el agua del mar.	La mayoría de los componentes solubles en agua del petróleo son tóxicos.	< 5 días
Biodegradación	Degradación del petróleo por microorganismos generando compuestos más sencillos y finalmente agua y dióxido de carbono.	La velocidad depende del tipo de petróleo, temperatura, nutrientes, oxígeno y cantidad de petróleo.	Semanas a meses
Formación de bolas de alquitrán	Disgregación de las manchas de crudos pesados y petróleos refinados en extensiones pequeñas que persisten a lo largo de grandes distancias	Las bolas de alquitrán son difíciles de detectar, parece que la mancha está desapareciendo aunque sigue siendo una amenaza	Días a semanas

Porcentaje evaporado a lo largo del tiempo para un vertido instantáneo de 100 barriles, con vientos de 10 nudos y temperatura del agua de 20°C.

	% Evaporado	Horas
Gasolina	94	1
Lagomedio	38	18
Aceite combustible diesel	37	18
Prudhoe Bay	28	70

Evaporación

La evaporación es uno de los mecanismos más importantes en la eliminación del petróleo. La cantidad evaporada depende principalmente de las propiedades del petróleo, la velocidad de los vientos y de la temperatura del agua.

Generalmente, los productos refinados ligeros, como gasolina o combustible de aviación, se evaporan más rápidamente que productos más pesados como crudos pesados. Desde la mesa, puede observar que la mayor parte de la gasolina se evapora en el curso de unas pocas horas. Lagomedio pesado y Prudhoe Bay son más persistentes en el entorno y poseen ritmos de evaporación más lentos, 38% y 28% respectivamente. Es de esperar que tras 120 horas gran parte del producto permanezca sobre la superficie del agua.



Dispersión

Las olas rompientes pueden dispersar pequeñas gotas de petróleo en la columna de agua. Si las gotas son lo suficientemente pequeñas (diámetros de menos de 50-70 micras), la turbulencia natural del agua impedirá que vuelvan a emerger, de la misma manera que las turbulencias del aire mantienen en suspensión las partículas de polvo. Las partículas más pequeñas que permanecen en la columna de agua se consideran dispersadas.

La dispersión puede ser un mecanismo para eliminar el petróleo de la superficie del mar. La cantidad dispersada depende de las propiedades del petróleo (viscosidad y tensión superficial, en particular) y de las condiciones del mar.

Los productos de petróleo de baja viscosidad, como gasolina y queroseno, tienen más tendencia a dispersarse en el mar debido al oleaje que los petróleos altamente viscosos como los crudos IFO 380 u Oficina pesado. Por tanto, las fracciones de gasolina o queroseno dispersas en mar gruesa pueden ser relativamente importantes.

Un posible tratamiento de los derrames de petróleo consiste en rociar la mancha con dispersantes químicos. Los dispersantes químicos favorecen la dispersión natural disminuyendo la tensión superficial. En esta guía no se analiza el movimiento del petróleo por debajo de la superficie debido a las dificultades inherentes al desarrollo de análisis de trayectoria para petróleos dispersados.

Muestra de solubilidades del petróleo

Petróleo	Solubilidad acuosa (mg/L)*
Gasolina sin plomo	260.9
Diesel	60.4
Crudo Prudhoe Bay	20.5
Lagomedio	10.0

*Jokuty, P., S. Whiticar, Z. Wang, M. Fingas, B. Fieldhouse, P. Lambert, and J. Mullin. 1999. *Properties of crude oils and oil products*. EE-165. Ottawa, Ontario: Environment Canada

Disolución

La disolución comienza inmediatamente y suele continuar durante el proceso de envejecimiento.

La pérdida de productos de petróleo debido a la disolución es pequeña en comparación con otros procesos de envejecimiento.

De hecho, en la columna de agua se disuelve menos del 0.1% (petróleos muy pesados) o un 2% (gasolina). Sin embargo, los componentes del petróleo que se disuelven en la columna de agua son a menudo más tóxicos para el entorno.

Muestra de viscosidades

Producto	Viscosidad a temperatura ambiente (cP)
Agua	1
Diesel	10
Crudo Prudhoe Bay	46
Crudo Prudhoe Bay tras emulsificación	250,000
Lagomedio	20
Lagomedio tras emulsificación	300,000
Miel	10,000
Manteca de cacahuete	1,000,000

Emulsificación

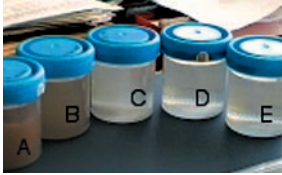
Es probable que muchos crudos y algunos productos refinados alcancen durante su envejecimiento un punto en el que gotas de agua se mezclen con el petróleo, formando una emulsión de agua en petróleo o "mousse".

La capacidad de formar una emulsión dependerá de las condiciones del mar y de las propiedades químicas del petróleo. Por ejemplo, petróleos de alto contenido en ceras y asfalteno, como el crudo Prudhoe Bay se emulsionan con facilidad en presencia de oleaje rompiente. Una vez emulsionado, la viscosidad del petróleo puede aumentar de forma espectacular (ver tabla).

En general, los petróleos deben experimentar un cierto grado de envejecimiento antes de formar una emulsión. Aunque el inicio de la emulsificación puede retrasarse durante unos días, la emulsificación en sí puede completarse en unas horas.

La emulsión puede contener de un 70 a un 90% de agua, por lo que el volumen combinado de petróleo y agua puede ser mucho mayor que el volumen del derrame original.

Las emulsiones se clasifican a menudo en base a su estabilidad. En las emulsiones inestables, el agua y el petróleo se separan con facilidad en condiciones calmadas y temperaturas cálidas. En las emulsiones estables, el agua permanece en el petróleo durante semanas o meses.



**Diferentes
concentraciones de
polvo fino en agua**

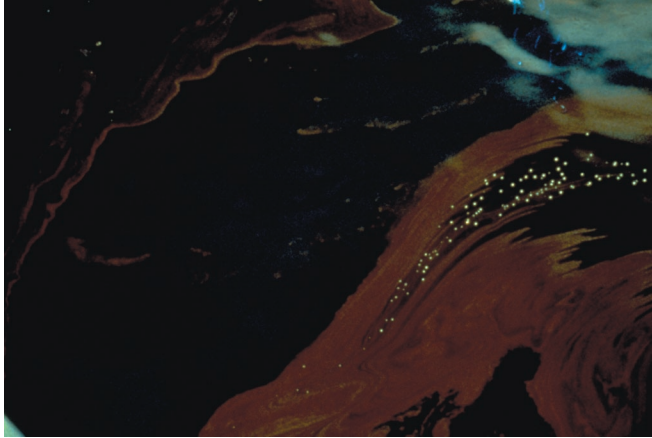
- A) $10,000 \text{ g/m}^3$
- B) 1000 g/m^3
- C) 100 g/m^3
- D) 10 g/m^3
- E) 1 g/m^3

Sedimentación

La sedimentación se define como la adhesión de petróleo a partículas sólidas en la columna de agua. El petróleo puede adsorberse a sedimentos en la columna de agua par acabar depositándose en sedimentos del fondo.

Aguas turbulentas con una alta carga de sedimentos ($\sim 500 \text{ g/m}^3$), como las de un río de caudal rápido y turbio, pueden transportar el petróleo a través de la columna de agua en cuestión de horas tras el vertido inicial.

Aguas con menor carga de sedimentos ($< 5 \text{ g/m}^3$), como las de mar abierto, permiten al petróleo permanecer en la superficie durante más tiempo (semanas), extendiendo la mancha por un área más grande.



Fotografía en la que se muestra una gran extensión de petróleo envejecido con una costra de “piel” en su superficie. Los puntos blancos que se pueden ver son tarjetas de deriva de 3 x 4”, arrojadas al agua para ayudar a seguir el movimiento del petróleo.

Fotooxidación

La luz solar altera las características físicas y químicas del petróleo derramado.

Este proceso se limita a la superficie del petróleo, pudiendo resultar en una “piel” delgada y costrosa sobre manchas y bolas de alquitrán.

Esta formación de “piel” limita la evaporación ya que los componentes más ligeros del petróleo no pueden difundirse a través de la superficie de la mancha.

La foto-oxidación puede incrementar la facilidad de emulsificación y se considera un proceso de envejecimiento a largo plazo con una duración de semanas a meses.

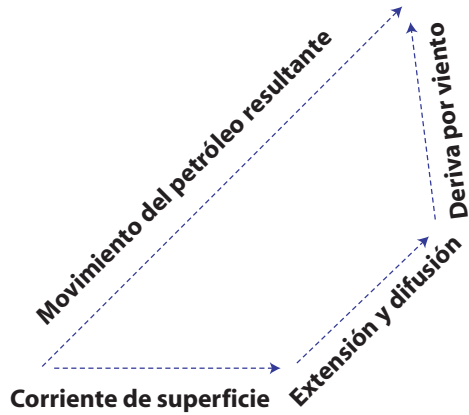


Algas adheridas a petróleo intemperizado o “bolas de alquitrán”

Biodegradación

El derrame se elimina en última instancia cuando el petróleo se biodegrada. Los microbios que degradan el petróleo están presentes de forma natural en el entorno.

El ritmo al cual los organismos degradan el petróleo depende de las propiedades del agua y del petróleo y de la actividad microbiana. Este proceso se prolonga durante escalas temporales de semanas a años.



Transporte de petróleo

El petróleo es transportado sobre el agua debido a dos principales procesos: extensión y advección. Para derrames pequeños (<100 barriles), el proceso de extensión se completa durante la primera hora del vertido.

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 (usando el 3% de la velocidad de l viento), la corriente de superficie, y la extensión y turbulencia de gran escala (difusión).

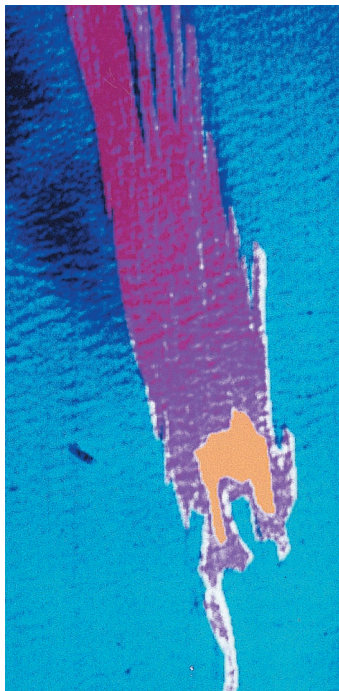


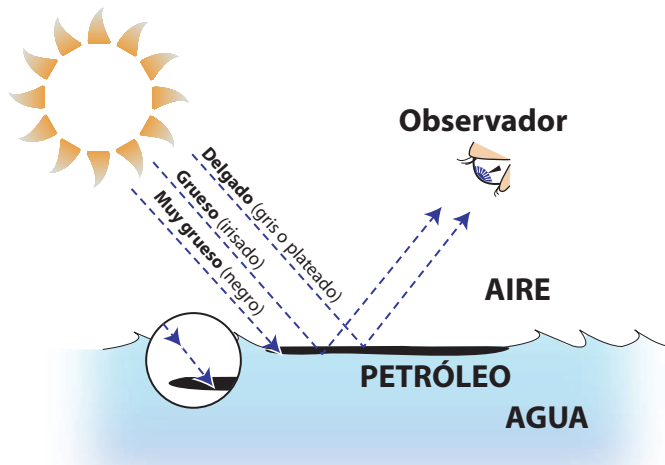
Imagen en color aumentado de un derrame de prueba. (<50 barriles)

Extensión del petróleo

El proceso de extensión se desarrolla rápidamente, completándose en la mayoría de los derrames durante la primera hora. En mar abierto, los vientos, corrientes y turbulencias mueven el petróleo con rapidez.

La extensión es más rápida para petróleos ligeros o menos viscosos en aguas cálidas y para petróleos calientes.

La mancha no se extiende de manera uniforme, sino que a menudo presenta una parte más gruesa rodeada por un brillo de mayor dimensión, pero más delgado. En la figura se muestra una imagen en color aumentado de un derrame experimental. La porción naranja es la zona gruesa, y la zona rosada, brillo. Observe que aproximadamente el 90% del petróleo se concentra en el 10% del área mancha (la porción negra de la figura).



Películas muy delgadas: no hay variación de fase o refracción, todas las frecuencias se reflejan (grises o plateadas)

Películas intermedias: la transición de fase depende de la longitud de onda y de la distancia recorrida a través del petróleo (aparición irisada)

Películas gruesas: la luz se absorbe (marrones o negras)

El análisis de trayectoria no proporciona normalmente buena información sobre el grosor.

Grosor del petróleo

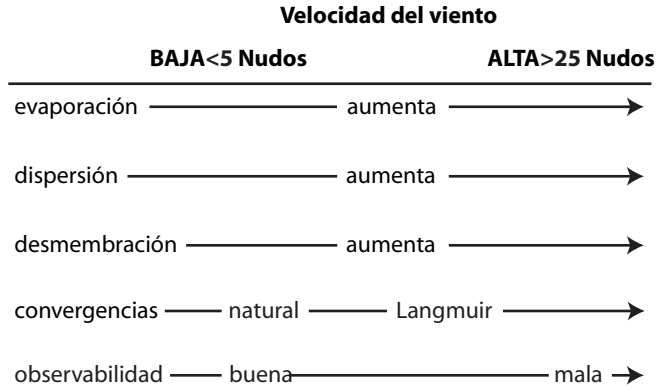
Las manchas de petróleo forman películas muy delgadas en aguas abiertas y, dependiendo del producto, el grosor puede variar de una décima a varios cientos de micras. Los investigadores sobre derrames han estado estudiando desde 1929 la relación entre el grosor del petróleo y el color de la película.

Cuando la luz directa del sol entra en contacto con una película muy delgada de petróleo (<math><0.1\ \mu\text{m}</math>), gran parte de la luz se refleja hacia el observador (ver diagrama) en forma de un brillo gris o plateado.

Si el grosor de la película es mayor (de 0.1 a $3\ \mu\text{m}$), la luz pasa a través de la película y es reflejada en la interfase petróleo-agua de vuelta al observador. El observador verá una película con brillos de tonos irisados a colores algo más oscuros.

Para películas algo más gruesas ($> 3\ \mu\text{m}$), la luz sea absorbe y la mancha ofrecerá al observador un color oscuro (marrón o negro). Sin embargo, el observador no podrá determinar el grosor de la película basándose en su color; si el color es oscuro no se puede estimar a simple vista si la película tiene un grosor de $3\ \mu\text{m}$ o $100\ \mu\text{m}$.

Puesto que la apariencia de la película se ve afectada por el ángulo del sol, deslumbramiento, ángulo de observación y visión a través de plexiglás, no resulta fiable basarse en el color para estimar el grosor. Para calcular el volumen de petróleo es necesario además conocer el porcentaje de cobertura, una tarea muy difícil.

Efectos del viento sobre la trayectoria del petróleo**Vientos**

Los vientos afectan a la trayectoria de tres maneras principales:

- 1) Envejecimiento del petróleo
- 2) Efectos de superficie del agua
- 3) Transporte directo

Estimación de la velocidad del viento desde helicóptero

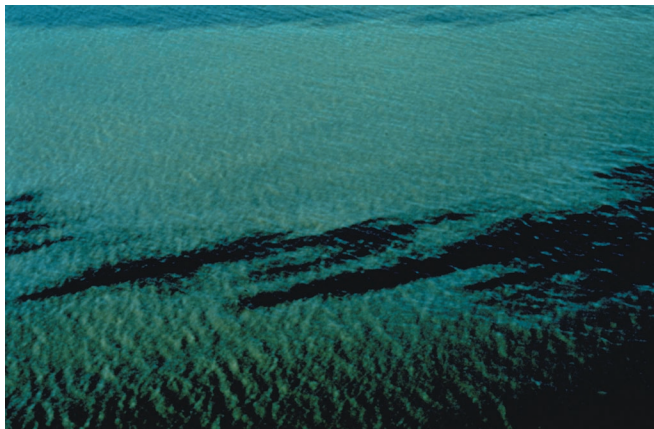
Velocidad del viento	Olas
0 a 5 nudos	Forma redonda o sinusoidal
5 a 10 nudos	Forma trocoidal (crestas en punta)
10 nudos	Rompientes
15 nudos	Las crestas se desprenden
20 nudos	Las olas dejan estelas de espuma
>20 nudos	Difícil de observar petróleo superficial

Escala de velocidades de viento

La escala de Beaufort recibe el nombre del Almirante Sir Francis Beaufort, que desarrolló la escala en 1805 para estimar la velocidad del viento observando el estado de la mar. La tabla a la izquierda proporciona un enfoque diferente para estimar la velocidad del viento, en especial para observaciones realizadas desde el aire. La tabla siguiente muestra la correspondencia entre la escala de Beaufort para la velocidad del viento y las características del mar.

Escalas de viento y descripción del estado de la mar (Willard Bascom, *Waves and Beaches*, 1980)

Escala Beaufort	Descripción marinera de la velocidad en nudos	Velocidad (nudos)	Estimación de la fuerza del viento sobre el mar	Escala internacional de descripción del estado del mar y altura de olas
0	Calma	<1	La mar está como un espejo	Calma o llana 0 pies
1	Ventolina	1-3	Rizos sin espuma	
2	Flojito (Brisa muy débil)	4-6	Olas pequeñas que no llegan a romper	Marejadilla 0-1 pies
3	Flojo (Brisa débil)	7-10	Olas algo mayores cuyas crestas comienzan a romper. Borreguillos dispersos	Marejada 1-2 pies
4	Bonancible (Brisa moderada)	11-16	Las olas se hacen más largas. Borreguillos numerosos.	Fuerte Marejada 2-4 pies
5	Fresquito (Brisa fresca)	17-21	Olas moderadas alargadas. Gran abundancia de borreguillos, eventualmente algunos rociones	Gruesa 4-8 pies
6	Fresco (Brisa fuerte)	22-27	Comienzan a formarse olas grandes. Las crestas de espuma blanca se extienden por todas partes. Aumentan los rociones.	Muy Gruesa 8-13 pies
7	Frescachón (Viento fuerte)	28-33	La mar engruesa. La espuma de las crestas empieza a ser arrastrada por el viento, formando nubecillas.	Montañosa 13-20 pies
8	Temporal (duro)	34-40	Olas de altura media y más alargadas. De las crestas se desprenden algunos rociones en forma de torbellinos. La espuma es arrastrada en nubes blancas. es arrastrada en nubes blancas.-marked streaks along the direction of the wind.	Montañosa 13-20 pies



Hileras

Deriva por viento

Observaciones realizadas sobre derrames reales y experimentos controlados indican que la deriva debida al viento varía del 1 al 6% de la velocidad del viento (la mayoría de modelos utilizan un 3%). El valor bajo de 1% puede deberse a la inmersión de algunas de las gotitas 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 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° . Las predicciones de dirección del viento no son habitualmente tan precisas, y muy pocos modelos incluyen un ángulo de rotación en sus cálculos.

La mayoría de los modelos utiliza velocidades de viento medidas 10 metros por encima de la superficie del mar. Observaciones realizadas a otras alturas deben ser ajustadas mediante técnicas usuales a la altura estándar de 10 m.

Ha de tenerse en cuenta que la dirección del viento se comunica a menudo como la dirección de donde sopla el viento y la corriente de superficie como la dirección hacia la que fluye el agua. Esto significa que un viento del norte y una corriente del sur se mueven en la misma dirección.

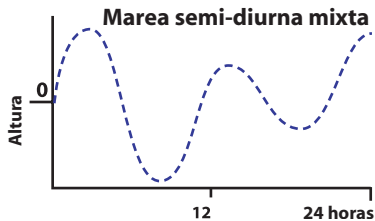
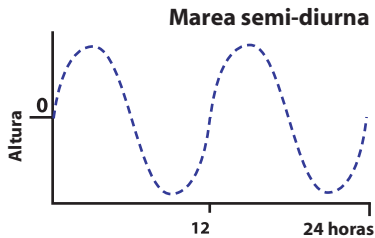
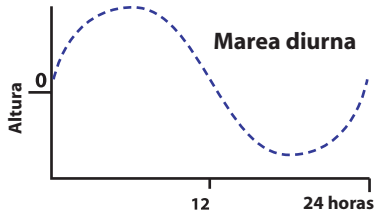


Regueros

Corrientes

La corriente de superficie es un mecanismo de transporte del petróleo. El régimen de corrientes presente 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 millas en meses y años
- El flujo costero puede transportar el petróleo a lo largo de cientos de millas en semanas
- La circulación en estuarios puede transportar el petróleo a lo largo de decenas de millas en días
- Los ríos pueden transportar el petróleo a lo largo de decenas de millas en horas o días

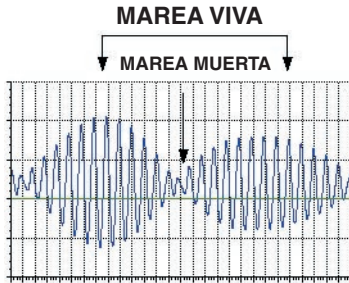


Patrones de mareas

En algunas áreas costeras, el patrón diario es de una pleamar y una bajamar. Este patrón se denomina marea diurna.

El patrón de mareas más predominante en la mayoría de los océanos del mundo consiste en dos ciclos de marea en el que la secuencia pleamar-bajamar ocurre dos veces al día. Si la altura de la pleamar y bajamar son diferentes, la marea se denomina entonces marea semi-diurna mixta.

Los patrones de mareas predichos astronómicamente se ven a menudo modificados a causa de otros factores. Los vientos que actúan sobre la superficie y la presión atmosférica pueden alterar el nivel del mar. Este tipo de efectos puede ser particularmente importante en áreas de agua poco profunda. Las tormentas costeras fuertes pueden también modificar notablemente los patrones de marea en una zona en particular.

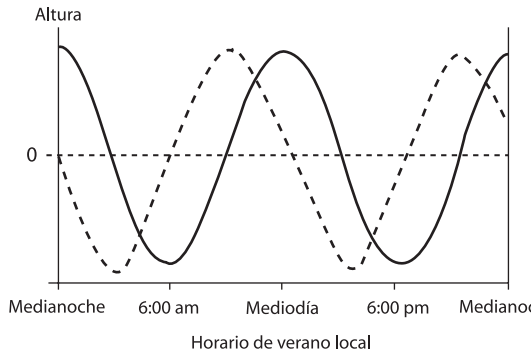
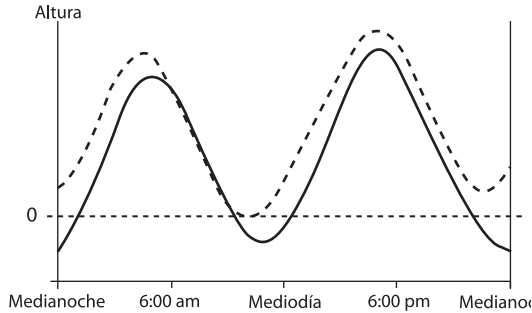


Mareas vivas y muertas

La marea viva marca los puntos más alto y más bajo de marea que tienen lugar dos veces al mes coincidiendo con la luna llena y nueva.

Las mareas muertas son lo contrario, la amplitud entre pleamar y bajamar es la menor y coinciden aproximadamente con los cuartos lunares.

Las mareas vivas son importantes para la respuesta a derrames pues el petróleo embarrancado en estas circunstancias tenderá a permanecer varado en la porción superior de la orilla hasta la próxima marea viva (unos 14 días). Si además se produce una sobreelevación por tormenta durante una marea viva, el petróleo puede permanecer embarrancado por un periodo aún más prolongado.



Corrientes de marea

Las corrientes de marea más fuertes se localizan en las áreas de aguas bajas o a través de canales estrechos que conectan grandes masas de agua.

Las corrientes en canales, (p. ej. entradas a estuarios y bahías) están obligadas a fluir hacia arriba o hacia abajo a lo largo del canal. En aguas abiertas, el flujo depende de la dirección de la ola de marea.

A lo largo de las costas exteriores, las corrientes y las alturas de marea están más sincronizadas (onda progresiva).

Las corrientes de marea están en general desfasadas respecto a las alturas de marea para puntos dentro de una bahía cerrada (onda estacionaria). El cambio de fase puede ser originado también por la fricción con el fondo.

Corrientes y alturas de marea en la entrada de la bahía de Galveston. La línea continua indica las alturas y la discontinua las corrientes.

Corrientes y alturas de marea en la entrada de la bahía de Portland Harbor, Casco Bay, Maine. La línea continua indica las alturas y la discontinua las corrientes.

Observe que la inundación máxima se produce unas tres horas antes que la pleamar.

$$\text{Carrera de marea} = V \frac{T}{\pi}$$

La carrera de marea viene dada por:

Donde T = tiempo de repunte bajo a repunte bajo (repunte alto a repunte alto)

V = velocidad máxima de la corriente de marea

Carrera de marea

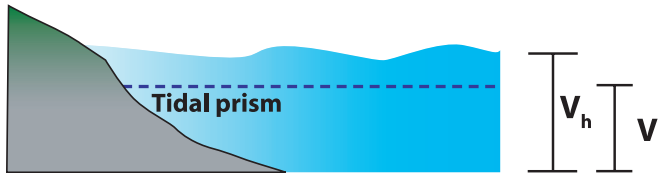
A menudo se le plantea al analista de trayectoria la cuestión de si un derrame fuera de la costa entrará en alguna bahía o estuario. Uno de los primeros factores a considerar para poder responder es la carrera de marea de la gola. Si el derrame está en las cercanías de la zona de carrera de marea, es posible que el petróleo penetre en la bahía con la marea.

Es importante tener en cuenta que la carrera de marea depende en gran medida de la batimetría. En áreas donde el fondo es muy amplio y llano, la influencia de la marea disminuye rápidamente; en cambio, en canales largos y estrechos, la influencia puede ser considerable.

Flujo

El volumen de agua intercambiado entre un estuario y el mar abierto durante un ciclo de marea completo se denomina el prisma de marea. En la figura, la diferencia entre el volumen de agua en bajamar (por debajo de la línea discontinua) y pleamar (por debajo de la línea curva) es el prisma de marea.

El método del prisma de marea para estimar el flujo presupone que el agua que entra con la marea llenante se mezcla totalmente con el agua en el interior del estuario. También presupone que el volumen de agua de río y mar durante la marea llenante es equivalente al prisma de marea.



Perfil vertical de una orilla simplificada. El área entre las líneas curva y discontinua define el prisma de marea

Para calcular el tiempo de flujo, se mide primero el área del estuario en un mapa. Luego se calcula el volumen del estuario en la bajamar V_l , seleccionando la profundidad más representativa del estuario. A continuación se calcula el volumen del estuario en marea alta, V_h . Por último, el tiempo de flujo se puede calcular a partir de

$$f_t = \left(\frac{V_h}{V_h - V_l} \right) t_c$$

donde t_c es el tiempo de un ciclo de marea (de bajamar a bajamar).

Este es un enfoque general, pero el método puede subestimar el tiempo de flujo debido a una mezcla de aguas incompleta; el agua dulce en la cabeza del estuario puede no moverse del todo a través de la boca del estuario a lo largo de un ciclo de marea y parte del agua que escapa con la marea vaciante puede retornar con la marea llenante. Subestimar los tiempos de flujo puede significar que el petróleo permanecerá en el estuario por más tiempo del predicho.



Derrame del *Exxon Valdez*

Mezclado turbulento

El petróleo derramado en le agua está sujeto regímenes de flujo turbulento. La turbulencia oceánica se genera a causa de vientos y corrientes, así como por el calentamiento y el enfriamiento. 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 100 a 1,000,000 cm^2/s .

La difusión vertical es menor que la horizontal en varios órdenes de magnitud, y generalmente disminuye con la profundidad.

No debe confundirse la difusión turbulenta con la dispersión mecánica (es decir, la mezcla ocasionada por el oleaje rompiente).



Petróleo en hileras o células de Langmuir.



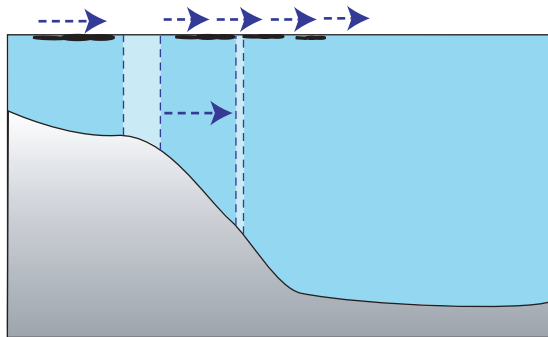
Petróleo en hileras o células de Langmuir.

Circulación de Langmuir

La circulación de Langmuir es el resultado de la interacción entre corrientes de superficie impulsadas por el viento y el oleaje superficial. Aunque puede existir circulación de Langmuir en condiciones de vientos débiles o nulos, lo más habitual es observarla con velocidades de viento de 1.5 m/s o superiores. La circulación de Langmuir es uno de los principales mecanismos de disgregación de la mancha y puede ser importante para el transporte de gotitas de petróleo hacia la columna de agua. La predicción de su aparición y fuerza es siempre difícil, aunque se sabe lo siguiente:

- 1) Las hileras o regueros tienden a durar de 5 a 30 minutos, deshaciéndose y volviéndose a formar.
- 2) La corriente superficial, más fuerte en los regueros, puede llegar a alcanzar el 5.5% de la velocidad del viento.
- 3) Las velocidades de submersión (vertical) en la convergencia varían de 5 cm/s a 20 cm/s.

Referencia: Edición especial "Langmuir Circulation and Oil Spill Modeling." *Spill Science and Technology Bulletin* Vol. 6



La figura muestra la columna de agua moviéndose de aguas someras a aguas profundas.

Convergencias de marea

Las convergencias son áreas de acumulación natural de petróleo, en especial bolas de alquitrán. Debido a su cercanía, las bolas de alquitrán de la convergencia pueden fusionarse para formar una mancha cohesionada.

Las convergencias de marea se forman a causa del estiramiento creado por el movimiento del agua de zonas bajas a más profundas (marea vaciante). Para conservar la masa, la velocidad superficial debe disminuir.

En estas áreas se puede acumular restos flotantes, algunas aves y petróleo.

Si los vientos son flojos, puede que el petróleo no atraviese las convergencias. Los vientos fuertes, en cambio, pueden romper las convergencias. De todas maneras, las convergencias de marea suelen aparecer en el mismo área aproximada durante las mareas vaciantes.



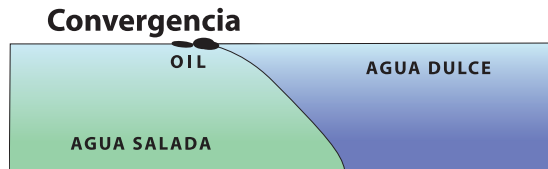
Interfase de agua dulce-salada, con un brillo de petróleo desplazándose hacia la convergencia.

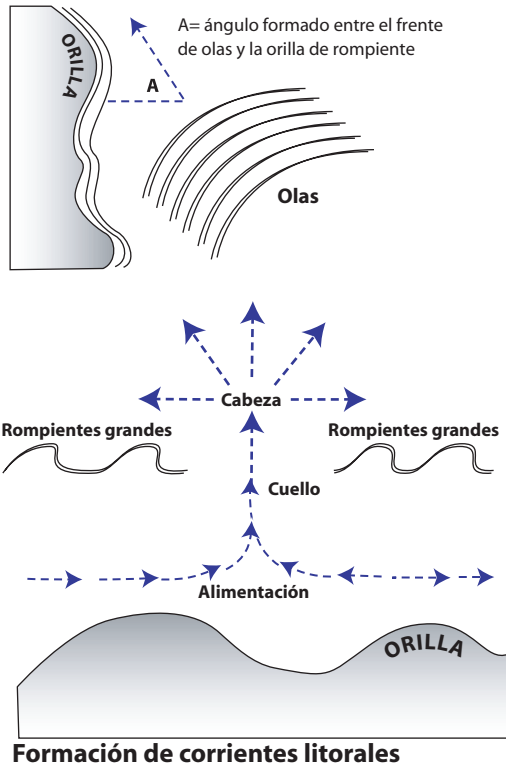
Interfase agua dulce-salada

Al igual que las convergencias de marea, las interfases de agua dulce-salada son áreas naturales de concentración de petróleo. Este tipo de convergencia se forma a causa del agua fluvial que fluye hacia el seno del mar extendiéndose por el agua salada.

El agua dulce es menos densa que la salada, con lo que se genera una convergencia en la superficie.

Los vientos fuertes pueden romper estas convergencias.





Corrientes litorales

Las corrientes litorales son producidas por el oleaje que se aproxima, en ángulo oblicuo, a una línea de orilla con playas de pendiente suave.

La velocidad de las corrientes litorales aumenta con la altura de las olas y con un mayor ángulo del frente de olas.

Las velocidades típicas de las corrientes litorales varían entre 0.3 m/s y 1.0 m/s.

Si al corriente adquiere velocidades cercanas a 1.5 m/s, a menudo se forma un chorro que devuelve flujo hacia el mar en forma de corriente de retorno.

Este tipo de corriente es muy importante por lo que respecta a la trayectoria, ya que proporciona un mecanismo de transporte de petróleo en áreas cercanas a la costa más allá de los rompientes.

Referencia: Horikawa, K. 1978. *An Introduction to Coastal Engineering*. New York: John Wiley and Sons. 403pp.



Petróleo en una marisma



Regueros de petróleo moviéndose en paralelo a la línea litoral.

Embarrancado / reflote

Las corrientes oceánicas no pueden en realidad hacer que el petróleo llegue a tocar la orilla a no ser que haya algún tipo de flujo que penetre en la orilla (p.ej. marismas y manglares). La primera fotografía muestra un derrame de petróleo entrando en una marisma con la marea llenante.

La segunda fotografía muestra regueros de petróleo moviéndose paralelos a la orilla. Para quedar embarrancados, el viento ha de soplar hacia la orilla.

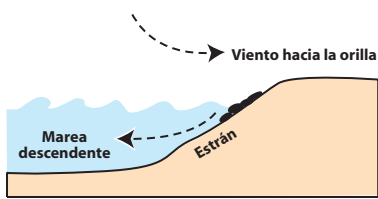


Diagrama que ilustra el embarrancado de petróleo con marea descendente y vientos hacia la orilla.

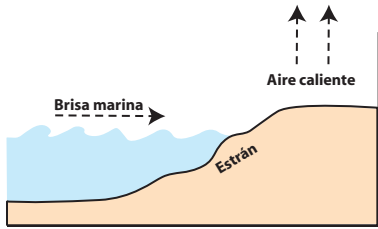


Diagrama que muestra el calentamiento de la tierra y la brisa marina (de mar a tierra) durante el día.

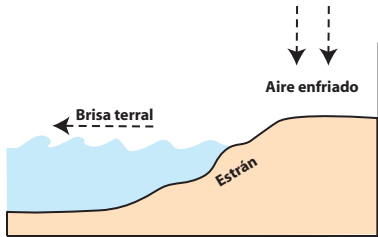


Diagrama que muestra el enfriamiento de la tierra y la brisa terral (de tierra a mar) durante la noche.

Brisa terral / marina

Una marea descendente con viento hacia la orilla puede incrementar notablemente la cantidad de contaminación en la orilla (ver la primera figura). Una brisa marina puede varar el petróleo en la orilla.

El ciclo de brisas terrales/ marinas tiene lugar en áreas costeras y está ocasionado por el calentamiento de la tierra durante el día y su enfriamiento durante la noche (figuras segunda y tercera). En algunas áreas, las brisas terrales y marinas pueden extenderse muchas millas mar adentro.

Resumen

Para desarrollar una “imagen” de la trayectoria, el analista debe examinar los componentes del modelo y los procesos descritos en esta guía. Los principales componentes de cualquier modelo con:

Datos del derrame

- localización del derrame
- tipo de petróleo
- volumen derramado
- momento/ tipo de vertido (¿instantáneo o continuo, móvil, estacionario?)

Datos medio ambientales

- vientos
- corrientes (de gran escala, de marea y flujo fluvial)
- alturas de marea
- difusión

Algunos de los procesos incluidos en esta guía no pueden modelarse fácilmente, por consiguiente el analista debe tenerlos en cuenta dentro de la incertidumbre que acompaña al análisis de trayectoria final. En particular:

- Grosor del petróleo
- Convergencias
- Variaciones locales de las mareas astronómicas
- Corrientes de pequeña escala (p. ej. alrededor de pantanes, espigones pequeños o diques de encauzamiento)
- Condiciones meteorológicas de pequeña escala

Embarrancado petróleo que alcanza la orilla

Biodegradación descomposición del petróleo en compuestos más pequeños por microorganismos, convirtiéndose en última instancia en agua y dióxido de carbono

Convergencia áreas donde las aguas superficiales “se encuentran”. Son áreas de acumulación natural de petróleo, especialmente de bolas de alquitrán.

Difusión turbulencia a gran escala que mezcla el petróleo derramado

Dispersión disgregación del petróleo en gotas más pequeñas que se mezclan con el agua debido a la energía de mar. Si las gotas son lo bastante pequeñas, permanecen en la columna de agua.

Disolución mezcla de los componentes del petróleo solubles en agua en la columna

Marea diurna áreas costeras con una pleamar y una bajamar cada día

Emulsificación pequeñas gotas de agua mezcladas en el seno del petróleo, espesándolo y confiriéndole la consistencia de un “mousse” de chocolate. El contenido de agua puede alcanzar el 50-80%.

Evaporación conversión de un líquido a su fase gaseosa

Restos desechos o basura en la superficie del agua

Flujo agua intercambiada por un estuario o un puerto con el mar

Interfase agua dulce- agua salada tipo especial de convergencia que se genera cuando el agua de un río desemboca en el mar extendiéndose por encima del agua de mar. Al igual que las convergencias de marea, esta interfase es un área natural de acumulación de petróleo.

Circulación de Langmuir movimiento del agua causado por el viento que genera hileras o regueros de petróleo que se deshacen y se vuelven a formar. Es uno de los principales mecanismos en la disgregación de la mancha y puede ser importante para transferir gotas de petróleo a la columna de agua.

Corrientes litorales producidas por olas que se acercan oblicuamente a playas de pendiente suave

Marea semi-diurna mixta dos ciclos de marea donde las secuencias de pleamar - bajamar tienen lugar dos veces por día a diferentes niveles

Movimiento y evolución la dirección en que se desplaza el derrame y los cambios físico-químicos que experimenta el petróleo con el paso del tiempo

Marea muerta es la contraria a la marea viva: la amplitud entre pleamar y bajamar es mínima y coincide aproximadamente con los cuartos lunares.

Datos observados mediciones en el lugar del derrame (vientos, corrientes y localización del petróleo)

Fotooxidación alteración de las propiedades físico-químicas del petróleo por efecto de la radiación solar

Onda progresiva la energía se transmite por el agua, aunque las partículas de agua se mueven de forma oscilatoria.

Reflete petróleo que llega a la orilla y permanece flotando frente al litoral

Sedimentación adhesión de petróleo a partículas sólidas en la columna de agua

Marea semi-diurna dos ciclos de marea donde las secuencias de pleamar - bajamar tienen lugar dos veces por día al mismo nivel

Marea viva la marea más alta y más baja, tiene lugar dos veces al mes coincidiendo con la luna llena y nueva.

Onda estacionaria cuando la onda de marea alcanza el final de la bahía o estuario se refleja de vuelta a la entrada

Tensión superficial tendencia de las moléculas a agruparse para presentar la mínima superficie al aire

Bolas de alquitrán petróleo intemperizado que forma una bola flexible. Su tamaño puede ir desde el de una cabeza de alfiler hasta 30 cm.

Carrera de marea grado de influencia de las mareas en el movimiento del petróleo

Mezclado turbulento movimientos aleatorios del agua causados por vientos y corrientes fuertes, que rompen la mancha de petróleo en porciones más pequeñas pero distribuidas sobre un área más extensa

Incertidumbre "límites de confianza", o grado de exactitud que se espera que posea la predicción

Viscosidad medida de la resistencia de un líquido a fluir

Intemperización alteraciones de las propiedades físicas y químicas del petróleo derramado debidas a evaporación, disolución, oxidación, sedimentación y biodegradación

Longitud

	cm	m	km	in.	ft	mi
1 cm	1	10^{-2}	10^{-5}	0.3937	3.281×10^{-2}	6.214×10^{-6}
1 m	100	1	10^{-3}	39.37	3.281	6.214×10^{-4}
1 km	10^5	1000	1	3.937×10^4	3281	0.6214
1 in	2.540	2.540×10^{-2}	2.540×10^{-5}	1	8.333×10^{-2}	1.578×10^{-5}
1 ft	30.48	0.3048	3.048×10^{-4}	12	1	1.894×10^{-4}
1 mi	1.609×10^5	1609	1.609	6.336×10^4	5280	1

Area

	m ²	cm ²	ft ²	in. ²
1 m ²	1	10^4	10.76	1550
1 cm ²	10^{-4}	1	1.076×10^{-3}	0.1550
1 ft ²	9.290×10^{-2}	929.0	1	144
1 in. ²	6.452×10^{-4}	6.452	6.944×10^{-3}	1

Volumen

	m ³	cm ³	li	ft ³	in. ³
1 m ³	1	10 ⁶	1000	35.31	6.102 x 10 ⁴
1 cm ³	10 ⁻⁶	1	1.000 x 10 ⁻³	3.531 x 10 ⁻⁵	6.102 x 10 ⁻²
1 li	1.000 x 10 ⁻³	1000	1	3.531 x 10 ⁻²	61.02
1 ft ³	2.832 x 10 ⁻²	2.832 x 10 ⁴	28.32	1	1728
1 in. ³	1.639 x 10 ⁻⁵	16.39	1.639 x 10 ⁻²	5.787 x 10 ⁻⁴	1

Velocidad

	ft/s	km/h	m/s	mi/h	cm/s
1 ft/s	1	1.097	0.3048	0.6818	30.48
1 km/h	0.9113	1	0.2778	0.6214	27.78
1 m/s	3.281	3.6	1	2.237	100
1 mi/h	1.467	1.609	0.4470	1	44.70
1 cm/s	3.281 x 10 ⁻²	3.6 x 10 ⁻²	0.01	2.237 x 10 ⁻²	1



Junio 2001

Donald L. Evans
Secretario, Departamento de Comercio de los EE.UU.

Vice Admiral Conrad C. Lautenbacher, Jr., USN (Ret.)
Subsecretario para Océanos y Atmósfera y Administrador de la NOAA

Margaret A. Davidson
Administrador en funciones adjunto para
Servicios Oceánicos y Gestión de Zonas Costeras,