

PREDICCIÓN OPERACIONAL DE LAS TRAYECTORIAS DE OBJETOS A LA DERIVA EN ALTA MAR

Javier Pérez Marrero¹ (*), Laura Cardona¹, José Manuel Amat García², Victor Marcos Delgado², Octavio Llinás³

¹Dpto. de Oceanografía. Instituto Canario de Ciencias Marinas. Po box 56, 35200, Telde Gran Canaria, España.

²Centro Coordinador de Rescate. Base Aérea de Gando, 35230, Gran Canaria. España.

³Plataforma Oceánica de Canarias. Po box 413, 35200, Telde, Gran Canaria, España.

(*) e-mail: jpmarrero@iccm.rcanaria.es

RESUMEN

Con el fin de apoyar las actividades de protección ambientales y civiles, se ha creado un sistema operativo de predicción de objetos a la deriva en el entorno de las aguas oceánicas del Archipiélago Canario, incluidos los vertidos de petróleo. Aquí se describen los componentes de dicho sistema, y una serie de actividades de validación que han permitido mejorar su adaptación a la zona.

También se presenta una aplicación para el diagnóstico de las zonas costeras del archipiélago, potencialmente sensibles en el caso de derrames de petróleo. Los experimentos de validación muestran una buena concordancia entre las trayectorias observadas y las predichas, tanto para los objetos forzados por el viento como para las corrientes de deriva.

No obstante, el sistema puede ser mejorado en algunas de sus etapas. Por lo que se proponen algunas estrategias proactivas para mantener / mejorar sus patrones en tiempo real, es decir, para obtener predicciones fiables con tiempos de respuesta corta.

PALABRAS CLAVE: Predicción de objetos de deriva, derrames de petróleo, búsqueda y rescate, oceanografía operacional.

ABSTRACT

In order to support civil and environmental protection activities, an operational system has been set up for the prediction of drifting objects' behaviour in the oceanic waters around the Canarian Archipelago, including oil spills. Here, the components of such system are described, along with a number of validation activities that have allowed to improve its suitability for the area. Application to the diagnostic of the potentially endangered coastal areas of the archipelago in case of an oil spill is also presented.

Validation experiments show good agreement between observed and predicted trajectories, for both wind and current driven drifters. Nevertheless, there is room for improvement at almost every stage. Proactive strategies are proposed as the mean of sustaining/ improving real time standards, that is, reliable predictions with short response times.

KEY WORDS: drifting objects forecasting, oil spills, search and rescue, operational oceanography.

INTRODUCCIÓN

Predecir las trayectorias de cualquier tipo de objeto que se encuentre a la deriva en la superficie del mar, es uno de los principales problemas para la toma de decisiones en las operaciones de seguridad marítima. En este aspecto, hay una gran variedad de situaciones concretas que se pueden dar, desde los derrames de hidrocarburos, a incidentes con personas a bordo de barcos, basuras oceánicas, etc. A pesar de todo, estas situaciones comparten una formulación general, lo que varía de una situación a otra es la importancia relativa de las distintas características oceanográficas que dan lugar a los campos de velocidad. Además, la dificultad de encontrar soluciones deterministas o probabilistas, en el contexto operativo, y la escasez de información que está disponible a tiempo para que puedan ser tomadas las decisiones, es también un problema importante.

El Archipiélago Canario se beneficia de una muy importante reserva de biodiversidad en un entorno natural único. Sin embargo, la presión antrópica es bastante alta y además, por el archipiélago pasan algunas de las rutas de transporte marítimo más concurridas del mundo. Estas condiciones llevaron a la declaración de las aguas de Canarias como Área Marina Especial Sensibilidad por la OMI en 2005 (MEPC, 2005). Con el fin de dar apoyo en la toma de decisiones, se ha establecido un sistema operacional de predicción de trayectorias en las aguas oceánicas del entorno de las Islas Canarias (Figura 1). Esto ha sido desarrollado como parte de un sistema de oceanografía operacional multi-propósito (Pérez Marrero et al, 2005, Barrera et al, 2008). Se tiene la intención de hacer frente, no sólo a los derrames de hidrocarburos, sino también a los cuerpos sólidos a la deriva. El sistema se ha adaptado a las condiciones específicas, y a las fuentes de datos que se disponen del entorno del archipiélago canario, que se caracteriza por los efectos que producen las islas sobre el campo de viento y de la corriente, y la ausencia de plataforma continental. Las principales

características de dicho sistema (que incluye la vigilancia, los modelos numéricos y campo de fuerzas impulsoras) se describen más abajo en la sección I.

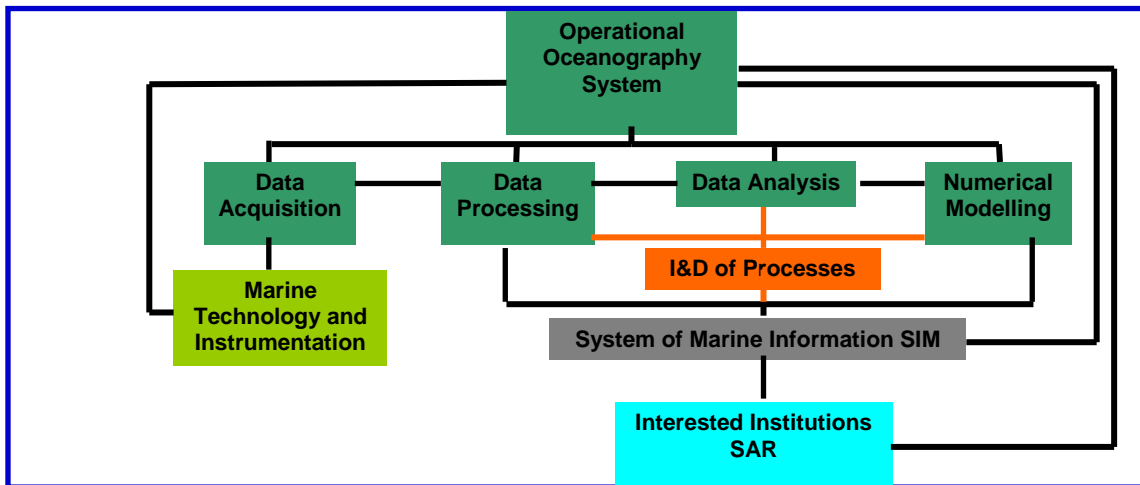


Figura 1. Se está implementando un Sistema de Oceanografía Operacional, basado en la combinación de observaciones y análisis de datos oceanográficos junto con modelos de simulación, para intentar predecir la trayectoria de objetos a la deriva. Se pretende con esto poder dar cobertura, en los casos de emergencias marítimas que se puedan dar en las aguas del Archipiélago Canario, como en las operaciones de salvamento y rescate.

Con el fin de seleccionar componentes fiables para el sistema, se han llevado a cabo varios experimentos de validación (*hindcats*). El sistema comprende el uso de información de satélites en tiempo real, y de las predicciones de viento a corto plazo, para alimentar los modelos numéricos hidrodinámicos, que como salida, predicen la posición final en términos de mapas de densidad de probabilidad. Se han realizado varias pruebas utilizando dos modelos diferentes: ESEOCAN (Álvarez Fanjul, 2005) y GNOME, Modelo General de Petróleo de la NOAA, (NOAA, 2002). Se han utilizado dos tipos de dispositivos seguidos por satélite, como *proxies* de los objetos impulsados por el viento las boyas OTR con seguimiento GPS-GSM (Ocean Trek Investigación) y las boyas WOCE-SVP (Niiler et al, 1987) como *proxy* de los impulsados por la corriente. La experiencia adquirida en los experimentos se ha incorporado al sistema operativo. En la sección II se describen estos experimentos y sus principales resultados. Como aplicación práctica, en la sección III, se presentan los principales resultados tras la evaluación de las zonas costeras del archipiélago potencialmente en peligro en el caso derrames accidentales. Por último, en la sección IV, se resumen los resultados y las experiencias obtenidas hasta la fecha y se discuten las fortalezas y debilidades del sistema, dando lugar a una serie de recomendaciones para futuras mejoras.

I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA OPERATIVO.

Este sistema (Sistema de Monitorización del Océano Macaronésico, SIMOM), que funciona en tiempo real, incluye dos vertientes principales que están relacionadas entre sí: la observación operativa y la modelización. Ha sido desarrollado por el Departamento de Oceanografía del ICCM, como un conjunto de herramientas que llevan a cabo la integración de la información oceanográfica multiparamétrica, obtenida por satélites de observación de la Tierra, así como de redes de observación in situ (Pérez-Marrero et al, 2006) . El sistema incluye la monitorización en tiempo casi real y una serie de herramientas para el análisis objetivo. Ha sido diseñado de forma modular para permitir la actualización de futuras mejoras en las metodologías de observación, así como en los modelos de desarrollo. Entre las múltiples aplicaciones de SIMOM, aquí sólo nos ocupamos en describir la de la predicción de las trayectorias.

1.1 SISTEMA DE OBSERVACIÓN OPERACIONAL

El sistema operativo de observación experimental SIMOM, integra datos multiparamétricos obtenidos de satélites y mediciones in situ en un marco de referencia común. SIMOM comprende todo el nivel inicial de procesamiento de los datos y su acondicionamiento, incluyendo la elección entre un conjunto de algoritmos de procesamiento. La información recopilada de la predicción se recoge en un informe que es entregado rápidamente al solicitante que lo requiera. Este escenario se utiliza para alimentar los modelos numéricos de predicción de trayectorias, y la dispersión en el caso de los derrames de hidrocarburos. A cambio, los resultados de los modelos hidrodinámicos se incorporan como nuevas entradas de datos en SIMOM, con el fin de realizar el procesamiento a posteriori, es decir, para definir las densidades de probabilidad y las zonas de búsqueda.

La principal fortaleza de este sistema operativo de observación, es que proporciona de forma rutinaria, la mejor estimación de pronóstico a corto plazo. Se ofrecen diariamente a través de la Web las condiciones del mar en tiempo casi real en forma de mapas sinópticos, como los que se muestran en las figuras 2 y 3. La información facilitada incluye pronósticos y predicciones a corto plazo de la temperatura superficial del mar, la velocidad del viento, velocidad de la corriente, la altura de ola, el periodo y dirección del oleaje y la concentración de clorofila que sirve como trazador de las corrientes superficiales.

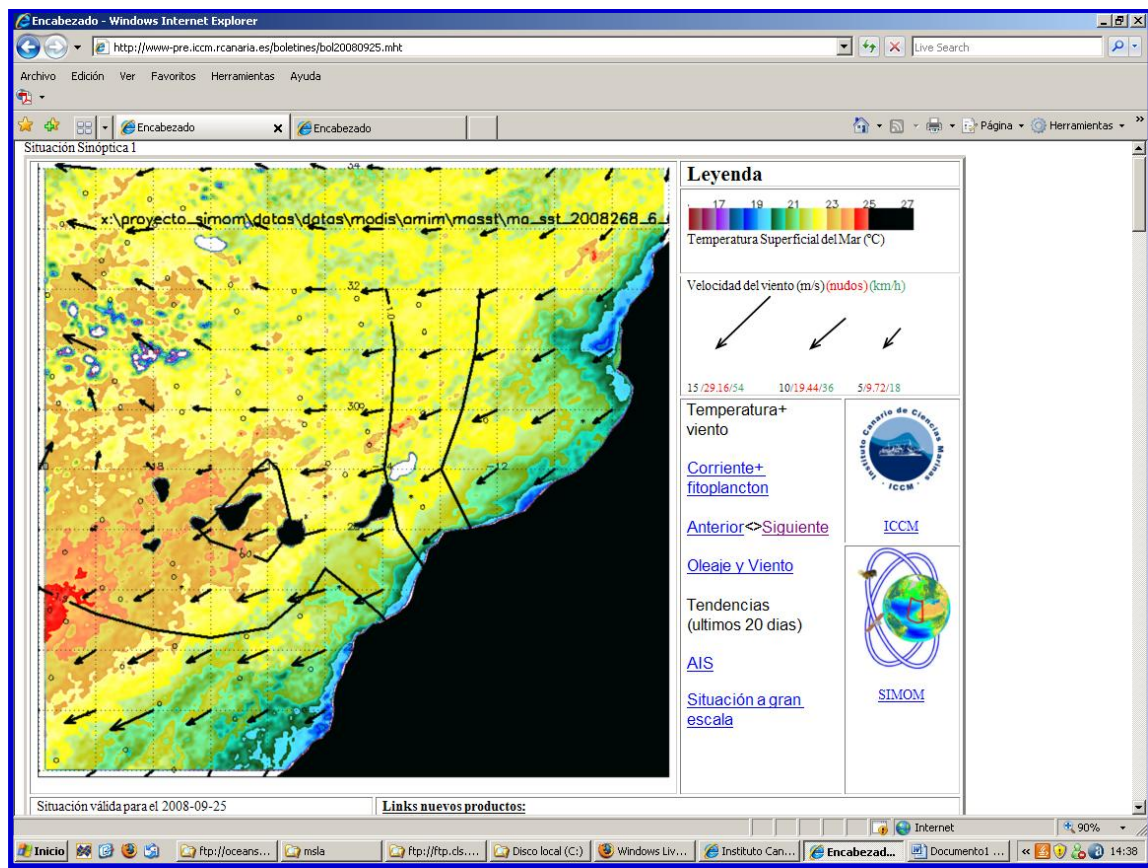


Figura 2. Informe *Nowcast*, elaborado por SIMOM de modo operacional. En esta captura de pantalla se observa una imagen sinóptica de la temperatura superficial del mar (colores), la velocidad del viento (flechas) y la altura de ola significativa (líneas de contorno). Las leyendas para su interpretación se pueden observar en la parte superior del margen derecho. Disponible en <http://www-pre.iccm.rcanaria.es/boletines.htm>

1.2 FORZAMIENTOS DEL MODELO

El movimiento de una parcela de agua, con contenido en petróleo o no, depende de la características advectivas y dispersivas del campo de velocidades. Las características oceanográficas que originan los campos de velocidad se caracterizan por sus escalas espaciales y temporales. En el caso de la predicción operativa, el enfoque es a nivel de mesoescala (de días a horas, de cientos de kilómetros a kilómetros) lo hace que sea posible omitir movimientos que distan mucho de estas (Juszko, 1985), como las ondas planetarias de Rossby en un extremo y la emulsificación y disipación viscosa en el otro. A falta de plataforma continental, las corrientes de marea y las ondas internas se consideran poco importantes para el transporte de masas (Tolmazin, 1985). Por lo tanto, las principales características hidrográficas que dan lugar a un transporte "efectivo" son los campos de remolinos y los frentes, y el movimiento inducido por el viento incluyendo la circulación de

Langmuir. Bajo circunstancias extremas, las ondas gravitatorias también podrían ser importantes para los desplazamientos de grandes cuerpos sólidos, como los contenedores, por medio de la llamada deriva de Stokes de segundo orden.

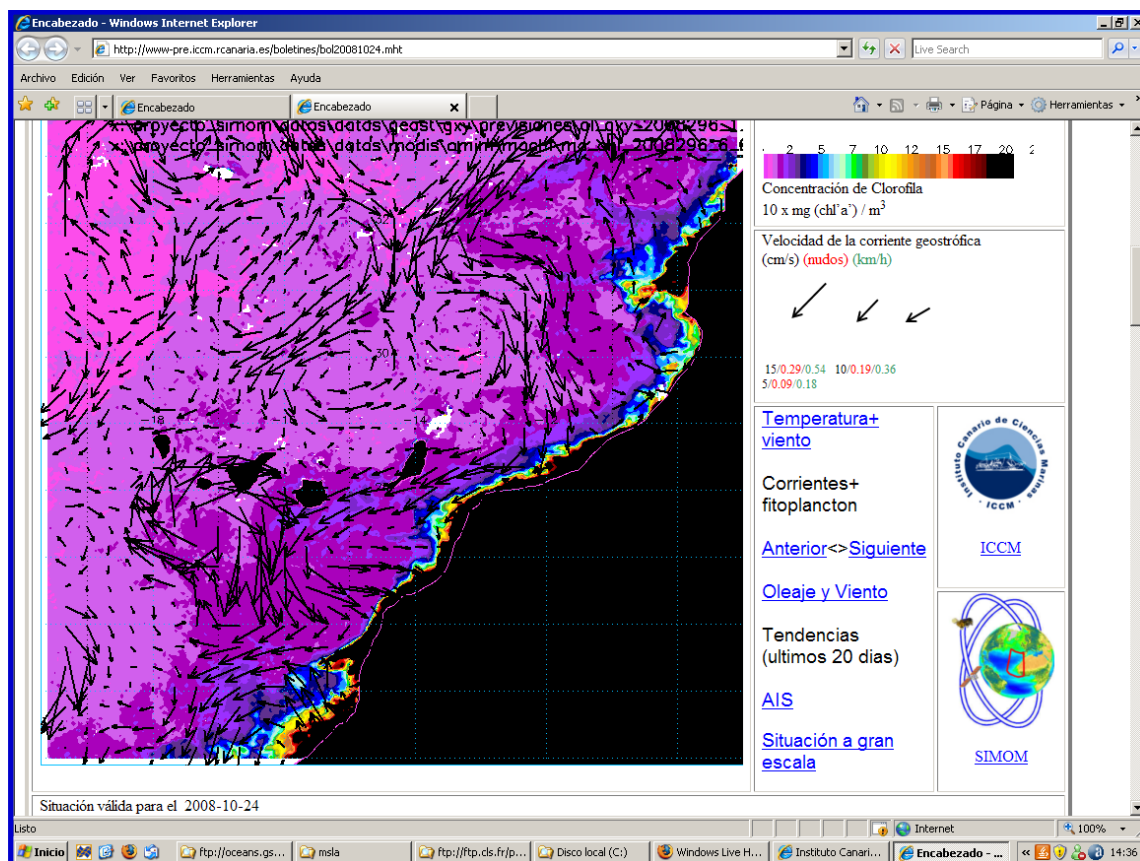


Figura 3. Visión sinóptica de las corrientes geostróficas suministradas por SIMOM de modo operacional. Superpuesta a la imagen, en colores, se puede observar la concentración de clorofila, que es un buen trazador de la corriente superficial.

Los satélites Altimétricos (AVISO, 1998) proporcionan una buena estimación de la velocidad geostrófica superficial con una alta resolución espacial (cerca de 33 Km en la zona de estudio), resolviendo los principales jets, los frentes y los remolinos que influyen en el movimiento del agua (Figura 3). Aunque esta resolución espacial es inmejorable con correntímetros convencionales, hay algunas limitaciones en la resolución temporal, ya que, dada la geometría de visualización de los satélites altimétricos, son necesarios alrededor de diez días para cubrir todo el archipiélago. Afortunadamente, las variaciones del campo de velocidades geostróficas son lo suficientemente lentas para hacer que estos datos sean útiles en muchas de las situaciones, como se analizará más abajo. Existe una alternativa que consiste en utilizar modelos de circulación, con la ventaja de que estos aportan también datos subsuperficiales, sin embargo, la resolución espacial, a día de hoy, es mucho menor.

Por lo tanto, una solución de compromiso es la necesidad de mejorar la resolución temporal de los modelos de circulación.

La velocidad del viento es necesaria para las predicciones junto con las corrientes. Las medidas de viento se pueden obtener también desde los satélites con sensores activos denominados Dispersómetros de viento, ofreciendo también una buena resolución espacial y temporal (Dunbar y Perry, 2000). Estos datos son útiles para experimentos de largo alcance retrospectivo. Sin embargo, para usos de pronósticos, son preferibles las previsiones meteorológicas, ya que tienen en cuenta las variaciones de alta frecuencia del campo de viento, que pasan desapercibidas en las mediciones por satélite, que ocurren dos veces al día en el mejor de los casos.

Para ejecutar el modelo, es necesario calcular los parámetros de las ecuaciones hidrodinámicas. A partir de la dinámica de fluidos, se determina el coeficiente de difusión de *eddy* necesario para dar cuenta de la parte caótica del campo de velocidad. Para la deriva de los objetos, los coeficientes de arrastre del viento y de la corriente deben ser establecidos en función de cada tipo de objeto, dependiendo de la parte que esté sumergida, que se encuentre expuesta a la corriente, y la emergida, expuesta principalmente al viento. Estos coeficientes, llamados “*lee coefficients*” pueden variar varios órdenes de magnitud tal y como determinó por la Guardia Costera de EE.UU. (Allen et al, 2005).

1.3 IMPLEMENTACIONES NUMÉRICAS

La advección y la difusión son los procesos que impulsan el movimiento de una partícula en el océano abierto. La turbulencia aporta un comportamiento caótico, por lo que son preferibles las implementaciones de manera probabilística a las deterministas (ASCE, 1996). En este sentido, GNOME ha sido utilizado como un motor de movimiento estocástico (Monte Carlo), en donde los datos del sistema operacional de observación (datos de forzamiento) se asimilan junto con una serie de parámetros tales como el coeficiente de arrastre del viento, la difusividad turbulenta y los factores de incertidumbre para cada componente. Una vez que son conocidos los datos de forzamiento, se pueden introducir al modelo, junto con la información del incidente: la hora, lugar y tipo de objeto, a fin de generar un escenario para ejecutarlo. Como resultado se obtiene una serie temporal de gráficos de puntos que representan una cierta cantidad de probabilidad (Galt et al, 1996).

Las líneas de contorno de las distribuciones de densidad de probabilidad delimitan las áreas de búsqueda.

II. PRUEBAS DEL MODELO

Con el fin de establecer un conjunto coherente de parámetros, se realizaron algunos experimentos retrospectivos. En estos ejercicios, se desplegaron derivadores desde helicópteros o buques, y se siguieron durante algún tiempo utilizando telemetría por satélite tipo ARGOS o GSM-Inmarsat. Se trabajó con dos tipos de objetos de deriva: en el primer caso se usaron boyas de deriva WOCE seguidas mediante ARGOS, estas se utilizaron para simular objetos sumergidos, con largas dragas y una exposición mínima a la tensión del viento (Figura 4), por lo tanto, impulsados casi en su totalidad por las corrientes oceánicas. En el segundo caso, las boyas OTR, boyas enganchadas a un dispositivo flotante tipo donut, se han utilizado como simulación de una balsa salvavidas equipada de un ancla de capa (Figura 5). Por lo tanto, como estos dos tipos de dispositivos son representativos de dos situaciones extremas, se puede suponer que cualquier objeto se moverá como una cierta combinación de estos dos, mientras que los coeficientes considerados para cada uno dependerán de las características geométricas.

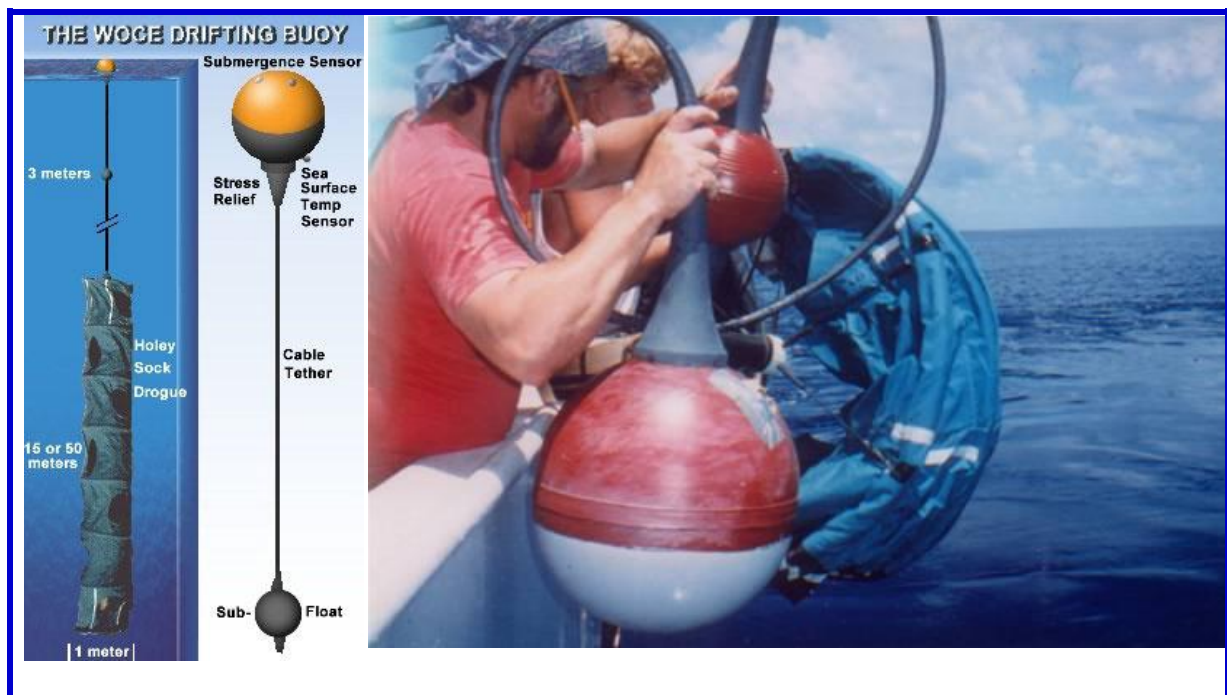


Figura 4. Esquema de la boya de deriva SVP-WOCE (a la izquierda), y su despliegue desde un buque (a la derecha).

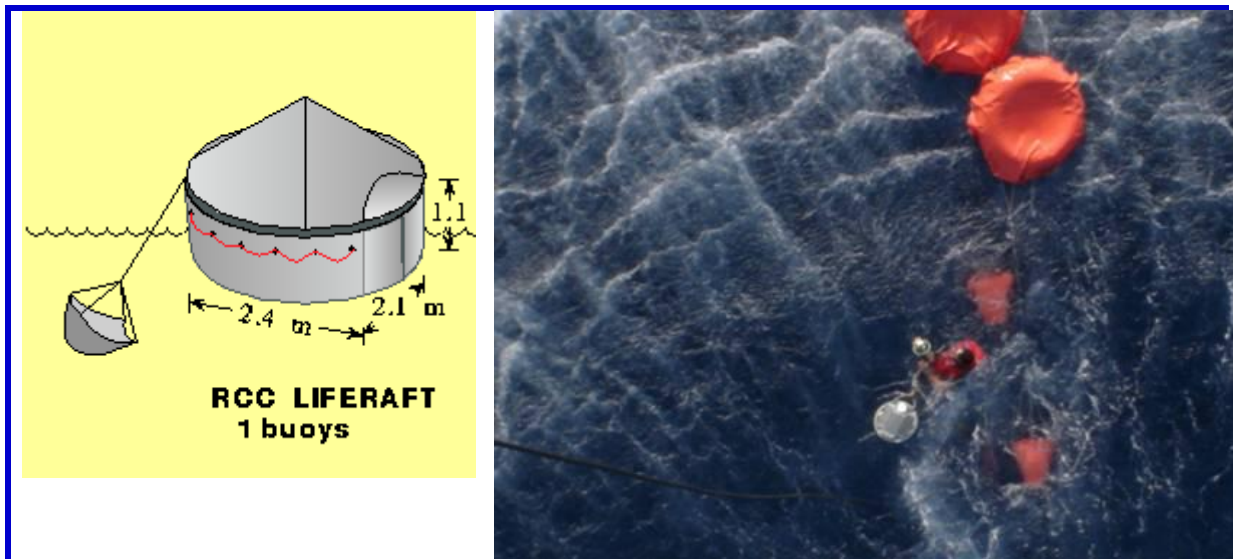


Figura 5. Boya OTR atada a un dispositivo flotante que tiene un ancla de capa y simula una balsa salvavidas (esquema de la izquierda).

II.1 DERIVADORES SIN DRAGA

El discreto sistema de las boyas Ocean Trek serie 200 presenta un diseño robusto y extensible, disponible con un número de sensores y configuraciones que puede ser estándar o personalizado. La boya OTR 200 transmite la posición vía GPS y otros datos a una frecuencia que puede ser programada vía satélite. Los mensajes se envían en tiempo casi real por correo electrónico a los investigadores que controlan su desplazamiento. El investigador puede enviar un correo electrónico a la boya para aumentar la tasa de mensajes o para encender una luz de alta intensidad para ayudar en los esfuerzos en su recuperación.

En el caso de los derivadotes OTR, los experimentos sugieren que un coeficiente de arrastre del viento del 10% reproduce bastante bien el movimiento del objeto. En la figura 6, se muestra una representación de uno de esos experimentos. En este ejercicio, se desplegó un figurativo desde un helicóptero del RCC-Canarias, cerca de la punta sur-oeste de la isla de Fuerteventura ($27^{\circ} 59'16''N$, $14^{\circ} 39'55''W$) a las 09:30, el 28 de julio de 2008. En ese momento, el informe *nowcast* de SIMOM indicaba vientos de 8 ms^{-1} (15,5 nudos) del NE y una corriente moderada de $11,7 \text{ cm s}^{-1}$ (0,2 nudos) hacia WSW (Figura 6). Con estas condiciones, y una previsión a 36 horas de viento de la AEMET (Agencia Estatal de Meteorología), se creó un escenario para GNOME. La información de Oleaje también estaba disponible.

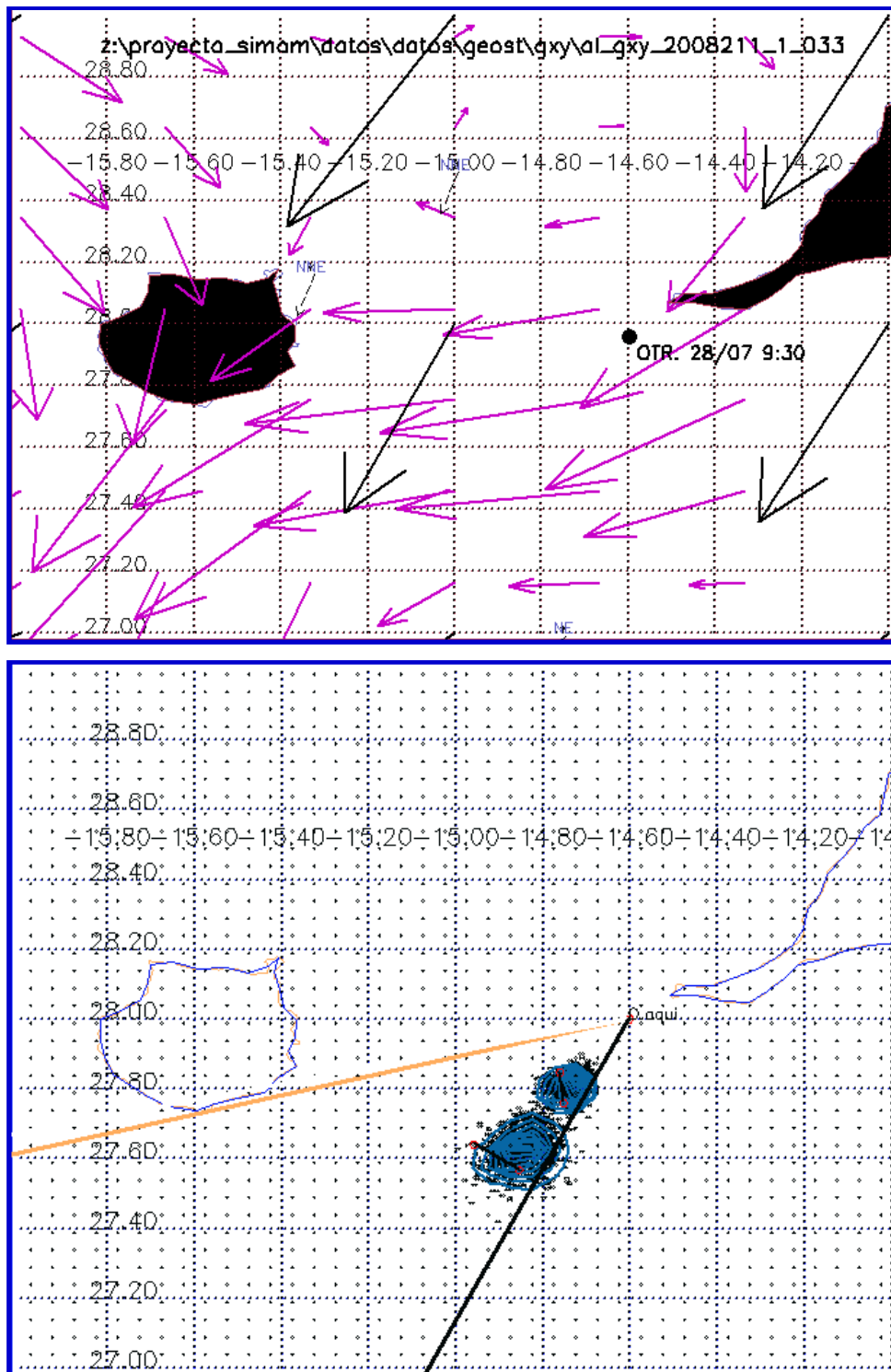


Figura 6. Esquema del experimento. En el panel superior, se marca con un punto negro el punto donde se desplegó la boya atada al dispositivo flotante, junto con la dirección del viento (flechas negras) y de la corriente (flechas púrpuras). En el panel inferior, se observan dos nubes de puntos que representan los resultados del modelo para las 14 y 26 horas de simulación. Estas nubes tienden hacia donde va la dirección del viento (línea negra) y de la corriente (línea naranja). Los puntos rojos indican la localización real de la boya OTR y la distribución de máxima de probabilidad, se encuentra entre un ángulo constante de $13,5^\circ$ hacia la derecha de la dirección del desplazamiento (*lee divergence*).

La componente aleatoria difusiva de la corriente fue asumida como isotrópica 10^5 $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$. Se asumió una distribución Gaussiana con un factor de error del 20% en las estimaciones, tanto para los vientos como para las corrientes. Con estas condiciones, se simularon las trayectorias de 1000 bolitas durante 24 horas. Basado en las posiciones de las bolitas, se obtuvieron los contornos de densidad de probabilidad, y se comparó con las posiciones reales transmitidas por la boya OTR cada 3 horas. A partir de estos contornos, se sugirió un área de búsqueda a fin de planificar las operaciones de rescate. A las 23:30, (tras 14 horas) el derivador se ubicó en 27.83583° N , 14.76073° W , (en adelante se usarán grados decimales), mientras que la distribución de máxima probabilidad obtenida fue $27.816707^\circ \text{ N}$, $14.735448^\circ \text{ W}$. Por lo tanto, se obtuvo una diferencia de aproximadamente 2.373 millas náuticas, para un 95% de probabilidad. La zona de búsqueda resultó ser aproximadamente el 40 mn^2 , esta distancia está dentro del alcance normal de una patrulla del SAR. Después de 26 horas de simulación (a las 11:00 horas del 29 de julio), la boya estaba situada en la posición 27.62917° N , 14.9586° W , es decir, a 5,3077 millas náuticas de distancia de la predicha por la simulación: $27.625457^\circ \text{ N}$, $14.856573^\circ \text{ W}$. Sin embargo, el área de búsqueda aumentó hasta alrededor de 140 mn^2 .

El experimento descrito anteriormente apoya la eficacia del sistema para la predicción de áreas de búsqueda. No obstante, como están disponibles nuevas predicciones meteorológicas a las 00:00 horas del día siguiente, la mejor práctica consiste en producir nuevas predicciones con esta información actualizada. Esto reduciría las diferencias entre las posiciones de la predicción (máxima probabilidad) y las observadas, reduciendo el área de búsqueda drásticamente (casi el 70%).

Se realizaron un total de cinco experimentos como el que se ha presentado en cooperación con el RCC Canarias, entre abril de 2005 y julio de 2008. En todos los casos excepto uno, se obtuvieron resultados similares. En este caso, durante la última parte del ejercicio, la boya se aceleró bruscamente; de hecho perdió el ancla como se confirmó por el personal del RCC cuando fue recuperada. El reanálisis de la trayectoria demuestra que su movimiento es compatible con un factor de arrastre del viento del 30%, desde el momento en que la aceleración se detectó mediante la transmisión por satélite.

II.2 BOYAS CON DRAGA

Estos derivadores son una versión de alta tecnología de los antiguos "mensaje en una botella". Consisten en una boya de superficie y un ancla subsuperficial (ancla de mar), atada por un largo y fino cable (Figura 4). La boya mide la temperatura y otras propiedades, y tiene un transmisor para enviar los datos por satélite. El ancla domina la superficie total del derivador y está centrada a una profundidad de 15 metros bajo la superficie del mar. El desarrollo de estos dispositivos tuvo lugar dentro del marco del Programa de Velocidad Superficial (SVP), del Experimento de Circulación Mundial de los Océanos. Las posiciones de los derivadores se estiman mediante 16-20 pases de satélites fijos por día, a través de Argos, un sistema para la recolección de datos basado en satélites, el procesamiento y la distribución de los datos, es operado por el Collecte Localisation Satélites en Toulouse, Francia.

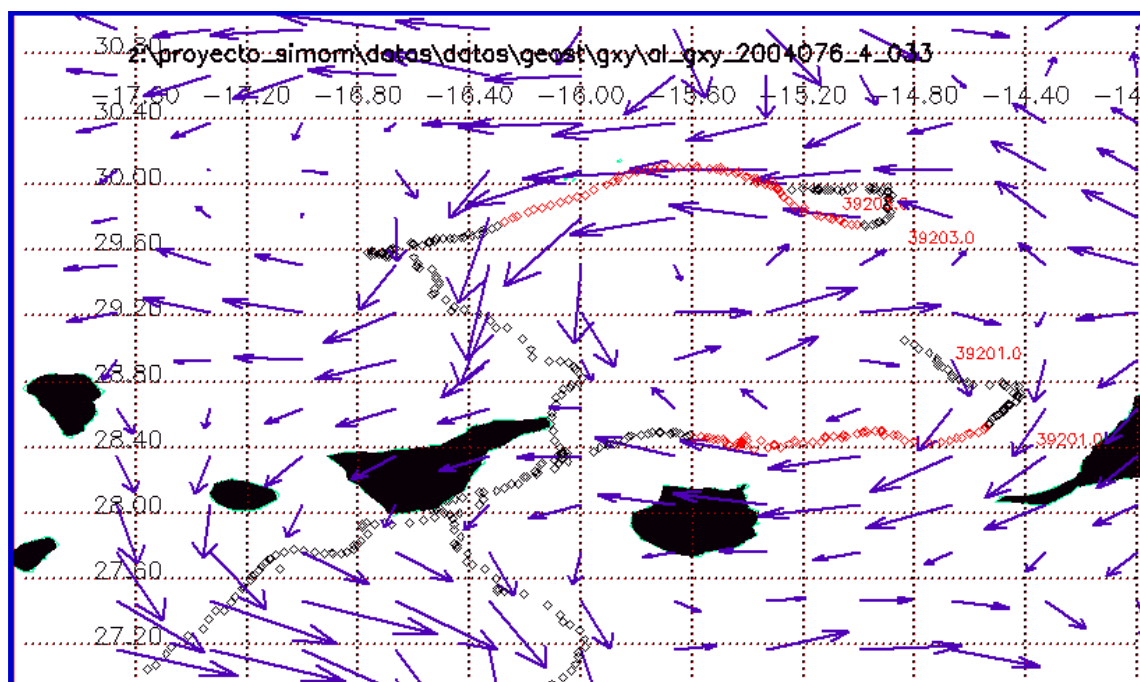


Figura 7. Representación de dos boyas de deriva SVP-WOCE indicado con las trayectorias de puntos, sobre gráficos de corrientes, en flechas, para marzo de 2004. Se observa como este tipo de derivadores lagrangianos siguen la corriente geostrofica. El periodo de coincidencia entre la medida euleriana (corriente geostrofica) y la lagrangiana (la boya) está indicado con los puntos en rojo.

Cuando se utilizan los derivadores WOCE con dragas de 15 metros, el panorama es más complicado, aunque las principales fuerzas motrices siguen siendo las corrientes geostroficas, como era de esperarse debido a su diseño (Figura 7). Los coeficientes de correlación entre la velocidad de deriva y la velocidad geostrofica indican una relación lineal, pero no un modelo lineal (Figura 8). Esto podría ser debido a procesos de

deslizamiento vertical producido por las variaciones en las fuerzas que actúan sobre la boya, se produce un aumento cerca de la superficie debido al viento y a las corrientes inducidas por el oleaje (Niiler et al, 1995). También se plantean algunas debilidades en el ámbito operacional del campo geostrofico de AVISO, debido básicamente a la limitación en la cobertura espacial y temporal de los altímetros para generar los campos de velocidad. De hecho, los derivadores muestran una serie de pequeños movimientos que son inapreciables por los altímetros o por los modelos de circulación disponibles. Sin embargo, el movimiento general de la deriva parece estar bien correlacionado con las corrientes geostroficas, por lo menos en los casos más frecuentes. En la Figura 8 se presentan dos ejemplos de esta relación.

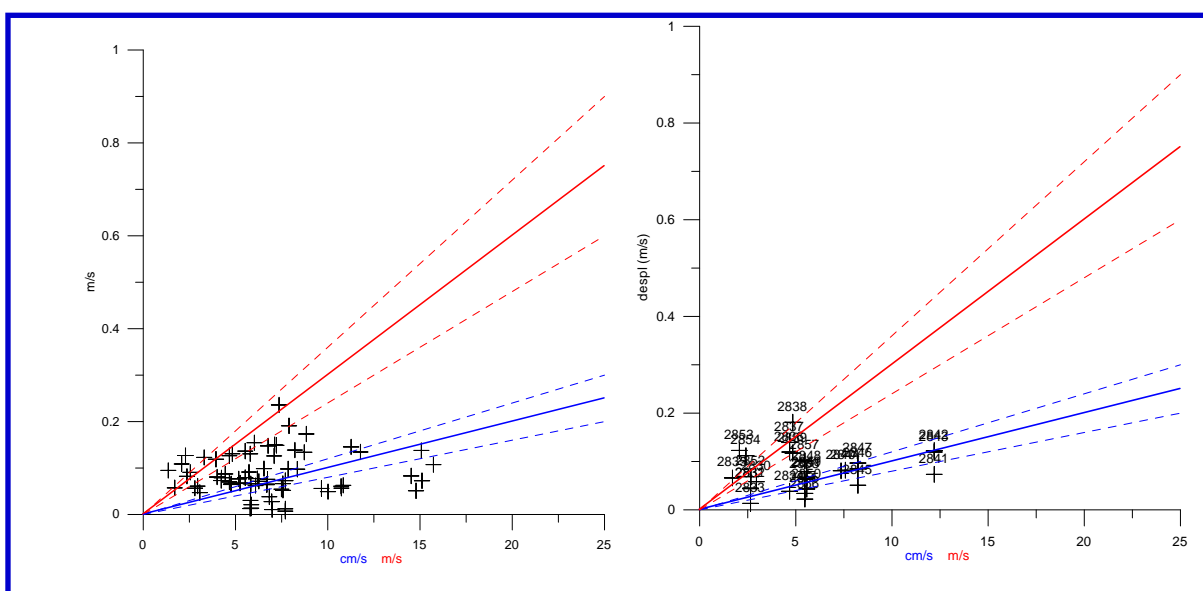


Figura 8. Comparación de los desplazamientos de las boyas SVP (cruces) con la corriente geostrofica (líneas azules) y el 3% de la velocidad del viento (líneas rojas).

II.3 CONSIDERACIONES OPERACIONALES

La experiencia adquirida hasta ahora con estos dos tipos de derivadores, es representativa de los dos extremos de posibles casos que se pueden dar en los objetos de deriva en la superficie del mar. Por un lado, el OTR + el flotador es representativo de los objetos que son impulsados por el viento, mientras que por otra parte; las boyas WOCE_SVP representan el comportamiento de los objetos que se encuentran sumergidos parcialmente. Por lo tanto, se espera que el comportamiento de cualquier objeto abandonado a la deriva en el mar se encuentre entre estos dos. La proximidad a uno u otro dependerá de las características geométricas que determinan la interacción entre el objeto y las fuerzas

motrices, es decir, un buque abandonado se moverá, en condiciones normales, sobre todo en función de la deriva del viento, pero en caso de que vire se comportaría más siguiendo las corrientes.

Por lo tanto, como norma general, la probabilidad de encontrar un objeto que esté libre en la superficie del mar, puede ser representado como líneas de contorno centradas en la posición donde se ha desplegado. El radio de estas zonas será proporcional a la difusión turbulenta del agua, multiplicado por el horizonte de predicción (tiempo). Si hay fuerzas netas actuando, la distribución de probabilidad aumentará en la región delimitada por la dirección del viento y de la corriente. La forma de la distribución dependerá principalmente, de las características del objeto considerado que se encuentra en el agua, es decir, en un primer enfoque determinista, la velocidad de cualquier objeto a la deriva puede escribirse de la siguiente manera (Kirwan et al, 1975):

$$V_d = aW + bC + \delta$$

Donde W y C son respectivamente el viento y los vectores de corriente, modulados por los coeficientes de ponderación a y b, que dependen de la relación de las áreas expuestas a la acción del viento y δ es un término de incertidumbre aleatorio. Esto significa que el área de densidad de probabilidad "tenderá" a uno u otro en función de los aspectos geométricos a los que tienda cada problema en particular. Una dificultad que se presenta es cuando se dan condiciones de viento muy flojos, y/o, cuando W y C forman un ángulo cercano a los 180°. En estos casos, los movimientos inerciales son bastante importantes y el término δ no se puede despreciar. La experiencia del operador es crítica para producir predicciones fiables en estas circunstancias.

Resumiendo el párrafo anterior, como regla general, la función de densidad de probabilidad se puede obtener como un área delimitada por los vectores de viento y de geostrofia actuales, mientras que la forma dependerá de las circunstancias geométricas de la interacción (los coeficientes de ponderación), y la distancia al lugar de despliegue va ha venir controlada por el horizonte de predicción.

Gracias al control continuo que se tiene de las aguas de Canarias mediante SIMOM, la información de pronóstico a corto plazo puede ser obtenida tan pronto como se recibe el informe del incidente. Los resultados de las primeras simulaciones pueden llegar al solicitante en el periodo de 1 hora. Para incidentes prolongados, se pueden llevar a cabo nuevas simulaciones tan pronto como las nuevas predicciones de viento estén disponibles.

Cuando las características reales del objeto de deriva son inciertas, se harán algunas suposiciones en las estimaciones, ordenándolas por su probabilidad a priori, basada en la experiencia de los operadores.

III. EVALUACIÓN DE AMENAZAS PARA LAS COSTAS DE LAS ISLAS CANARIAS EN CASOS DE DERRAMES ACCIDENTALES DE PETRÓLEO

Como consecuencia de la declaración de las aguas de Canarias como ZMES, el tráfico marítimo pesado que pasa por las islas debe limitarse a dos rutas restringidas. Una entre el canal de las islas de Tenerife-Gran Canaria (ruta oeste) y otra entre el canal de Gran Canaria-Fuerteventura (ruta este, Figura 9). Para evaluar los posibles efectos de estas restricciones en las costas de las islas, se creó un escenario a largo plazo. Se simularon las dos líneas de tráfico como una fuente continua de derrame de petróleo, se dejó evolucionar durante varios meses en condiciones reales, extraídas de la base de datos de SIMOM. Se calcularon las amenazas según la relación entre el balance de masa entre la fuente y las playas a las que llegó, en función del tiempo transcurrido.

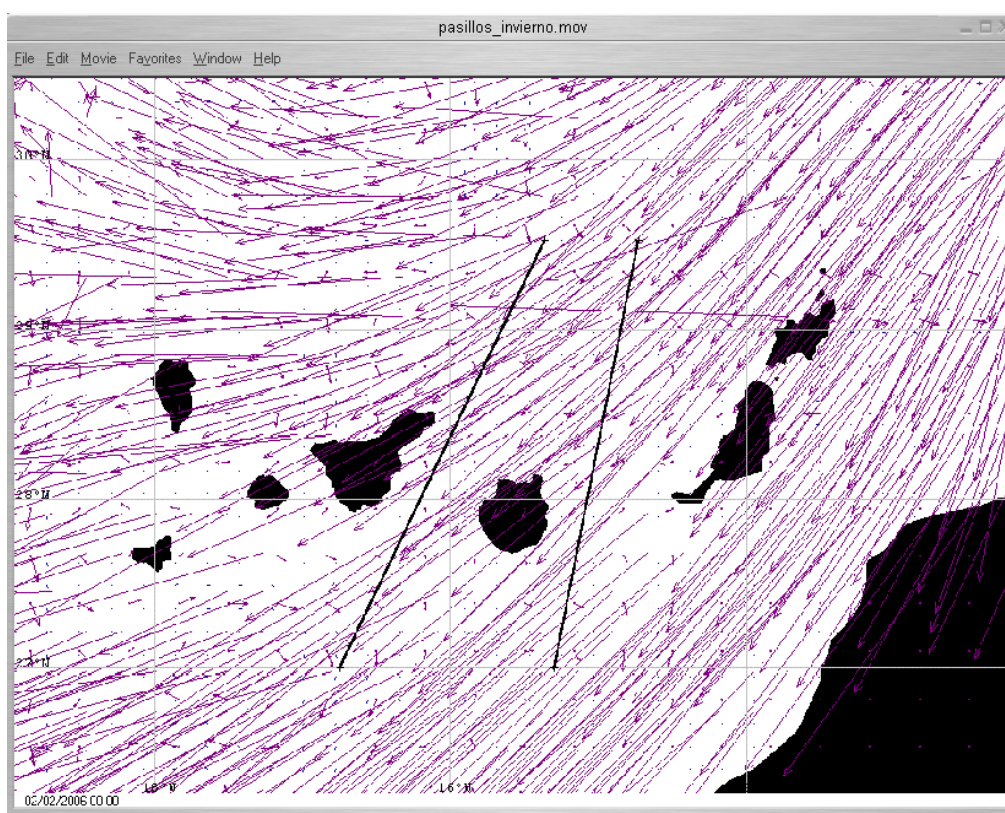


Figura 9. Líneas de tráfico marítimo a través de las Islas Canarias después de la declaración de ZMES en 2005. Se muestra el escenario con las condiciones iniciales de la simulación realizada el 2 de febrero de 2006.

Este escenario generalizado, aunque poco realista, se consideró muy útil para calcular los porcentajes globales de petróleo en las playas. Lo que dio lugar a útiles, estadísticas significativas, sobre la ubicación de las principales amenazas para las costas del archipiélago en condiciones meteorológicas realistas.

Para estas simulaciones se eligió un coeficiente de arrastre del viento del 3% basándose en la bibliografía (Beegle-Krauss, 1999). Se consideró un combustible de viscosidad media, sin erosión (ni evaporación ni descomposición) para hacer los resultados más generales. En el caso de un derrame, los efectos de tal erosión pueden calcularse si sus propiedades físicas y químicas son conocidas, y esto es lo que se suele hacer, utilizando por ejemplo el modelo ADIOS2 (NOAA, 1999).

Se llevaron a cabo dos simulaciones de cuatro meses de duración, representando los periodos de invierno y de verano. El comportamiento general de los derrames varía notablemente con las estaciones, siendo los vientos en verano mucho más constantes, hacen que la mayoría de los derrames acaben acumulándose al suroeste de la posición del vertido. En invierno, son frecuentes los frentes del oeste, que hacen que la dispersión del material derramado sea mucho más complicada (Figura 10).

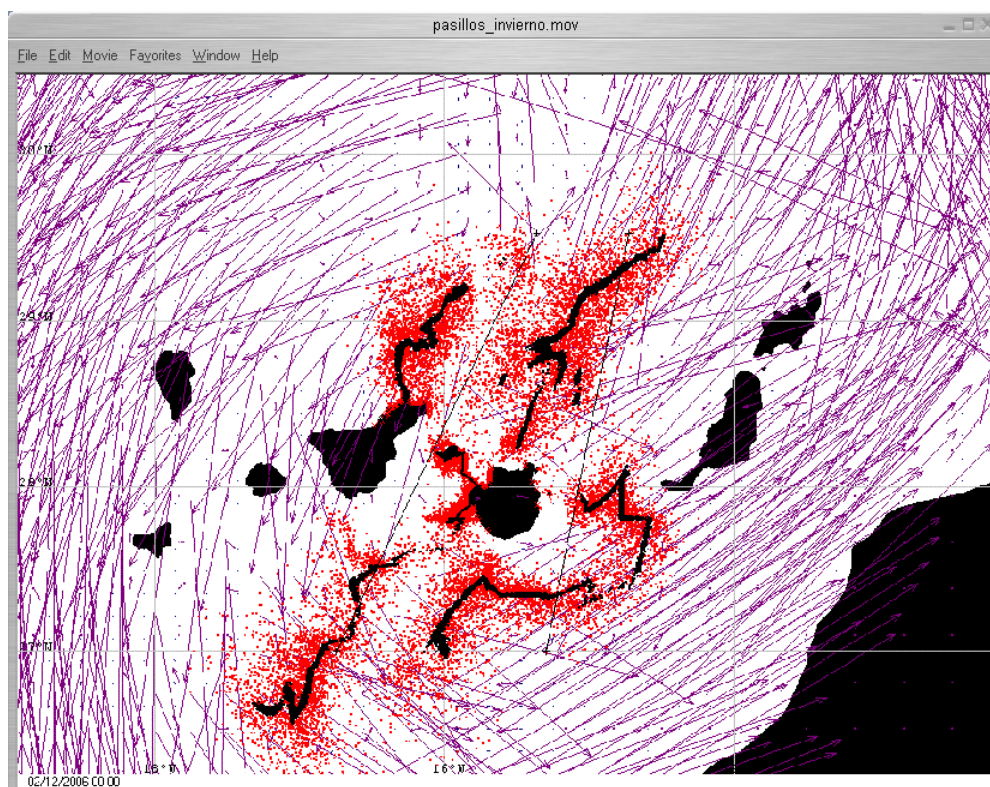


Figura 10. Dispersión de petróleo en todo el Archipiélago Canario, después de 10 días de simulación para el escenario mostrado en la figura 9, afectado por el paso de un sistema de bajas presiones del oeste.

Las simulaciones muestran que la ruta occidental es bastante más peligrosa que la oriental, en general, el 6% de todo el material derramado llegará a alguna playa en un plazo de 6 días, mientras que el porcentaje global para la ruta oriental es del 1%. El tiempo medio que tarda el material en encallar en la playa fue estimado en $4,8 \pm 1,5$ días en ambas rutas. En plazos de 15 días, aproximadamente el 20% del material de la ruta oeste terminará en la playa, frente a un 5% en el caso de la ruta oriental. Estos valores medios pueden considerarse representativos de la probabilidad media del petróleo que encalla en la zona.

Como se mencionó anteriormente, el invierno es bastante más complicado. Durante este período, el 20% de las simulaciones mostraron que el tiempo mínimo en el que los vertidos van a parar a la playa está a un plazo de 3 días. El balance de masa indica que aproximadamente el 15% del material derramado encalla en un periodo de 6 días, y el 39,7% llegará a la costa en 15 días.

En el caso de la ruta occidental, las amenazas del litoral se clasifican de la siguiente manera. Anaga (NE de la península de Tenerife) alcanzó el 27,4% de las simulaciones, la zona de La Aldea (punta W de Gran Canaria) el 25,4%, el norte de la costa de Gran Canaria el 19,6%, Mogán (SW de Gran Canaria) el 15,7%, Güimar (SE de Tenerife) 5,8% y La Isleta (noroeste de Gran Canaria) el 5%.

Las zonas más vulnerables a la ruta oriental son La Isleta con el 38%, la costa oriental de GC (Telde) con el 26,5%, la península de Jandía el 14,7%, la costa norte de Gran Canaria el 11,7% y Maspalomas con el 5,8%. En algunas ocasiones, la costa de Yaiza, en Lanzarote también se vio afectada por los derrames.

Con estos datos y las probabilidades de impacto en costa que se han mencionado anteriormente, se pueden calcular los índices de sensibilidad ambiental para las posibles amenazas en casos de derrames de petróleo. Estos datos se pueden combinar con las valoraciones de los ecosistemas, con el fin de estimar la vulnerabilidad real de las costas de las Islas Canarias, lo que es muy importante para planificar las estrategias de protección del medio ambiente.

IV. DISCUSIÓN Y PROPUESTAS DE MEJORA

Gracias a los conocimientos obtenidos de los ejercicios realizados en colaboración con el Escuadrón 802 del SAR del Ejército del Aire español, se ha logrado un buen nivel de precisión y de tiempos de respuesta en las predicciones, al menos en relación con los objetos

que puedan comportarse como los dispositivos utilizados. Sin embargo son necesarias algunas mejoras, algunas de las cuales se enumeran a continuación:

- Incluir las corrientes subsuperficiales, de especial importancia para los vertidos profundos, (una importante amenaza si finalmente se inicia la explotación petrolera en la cercana costa de África), así como para la predicción del movimiento de personas muertas que normalmente están durante varios días sumergidas hasta que los gases de descomposición les hacen reflotar.
- Son necesarios experimentos en los que se consideren grandes objetos como son los contenedores de carga y que pueden caer de la cubierta de los barcos durante el mal tiempo. Principalmente porque es probable que hayan cambios en el coeficiente de arrastre de agua. En segundo lugar, las ondas típicas de mal tiempo, puede provocar movimientos de deriva de Stokes.

El sistema aquí descrito sólo es adecuado para las aguas en océanos abiertos, que son las mayoritarias en las Islas Canarias. Para los incidentes ocurridos cerca de la costa y / o en puertos, son necesarias algunas modificaciones. Sin embargo, la adaptación técnica de este sistema se puede hacer sin mayores problemas, pero las mediciones de alta resolución para la costa / puerto de las corrientes, aún no están al alcance de nuestra mano.

Las autoridades deben promover estrategias proactivas y el entrenamiento de personal, con el fin de mantener y mejorar estas capacidades estratégicas. Una medida interesante debe ser la inclusión en la línea de redes de comunicaciones seguras, a fin de evitar los fallos típicos en los casos de fenómenos meteorológicos adversos, que suelen estar asociados al tipo de incidentes que hemos estado tratando. Por último, algunas carencias en materia de observación deben ser cubiertas, la instalación y el mantenimiento de nuevos instrumentos, como los radares de alta frecuencia y correntímetros cerca de costa, mejorarán la capacidad de previsión actual, especialmente cerca de las zonas potencialmente sensibles y con alto valor ecológico. Además, la rutina de adquisición de imágenes de radar de apertura sintética, podría mejorar la detección de los frecuentes, pequeños vertidos ilegales, ya que puede funcionar incluso bajo condiciones de nubosidad.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología Español; dentro del proyecto SEXCODE-h, ref. VEM-20567-2003-Inter. También queremos expresar

nuestro más sincero agradecimiento al teniente coronel Julio Arcar Bermúdez y al comandante Fernando Rubí Maté, Jefe de Operaciones, y al resto del personal del Escuadrón 802 de Salvamento y Rescate de las Fuerzas Aéreas Españolas en Gran Canaria. Y también al personal del departamento de oceanografía del ICCM, en especial al Sr. Víctor García Gamez, principal operador en la cadena de procesos en tiempo real, y de las actividades de validación, que hacen posible el control permanente de las aguas de Canarias.

BIBLIOGRAFÍA

- AEMEN (Agencia Estatal de Meteorología). Disponible el 30/04/09 en URL: www.aemet.es/
- ÁLVARES FANJUL, E. 2005. Descripción del proyecto ESEOO. Revista de Puertos del Estado.
- ARGOS. Worldwide tracking and environment monitoring by satellite. Disponible el 30/04/09 en URL: www.argos-system.org
- ARTHUR A. ALLEN. 2005. LEEWAY DIVERGENCE. Report No. CG-D-05-05. U.S. Coast Guard Research and Development Center. 1082 Shennecossett Road Groton, CT 06340-6048.
- ASCE task comitee on modelling of oil spills of the water resources engineering division (1996). State of the art on modelling transport and fate of oil spills. Journal of Hydraulic Engineering, 122 (11) paper no. 10364.
- AVISO. 1998. Aviso Sea Level anomaly user's handbook. AVI-NT-011-312-CN.
- BARRERA, C., E.B. AZEVEDO, M.D. GELADO, M.J. RUEDA & O. LLINÁS. 2008. "Real-time monitoring network in the Macaronesian region as a contribution to the Coastal Ocean Observations Panel". *Journal of Operational Oceanography (JOO)*. Volume 1:59-72.
- BEEGLE-KRAUSE, C.J. 1999. GNOME: NOAA's Next-Generation Spill Trajectory Model. Oceans '99 MTS/IEEE Proceedings. Escondido, CA: MTS/IEEE Conference Committee, 3: 1262-1266.
- DUNBAR, R.S., K.L. PERRY. 2000. QuikSCAT science data products users manual. JPL-document D-18053. Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California.
- GALT, J.A., D.L. PAYTON, H. NORRIS, C. FRIERL. 1996. Digital distribution standard for NOAA trajectory analysis information. HAZMAT report 96-4, Hazardous materials response and assessment division, National Oceanic and Atmospheric Administration and Florida Marine Research Institute, Florida Department of Environmental Protection.

- JUSZKO, B.A. 1985. Determination of oceanographic factors associated with the movement of oil. Marine Environment protection branch. Environmental Protection Service. Canada.
- KIRWAN, A.D., J.R. G MCNALLY, M. S. CHANG & R. MOLINARI. 1975. The Effect of Wind and Surface Currents on Drifters. *Journal of Physical Oceanography* 5: 361-368.
- NIILER, P.P., R.E. DAVIS, et al. 1987. "Water-following characteristics of a mixed layer drifter." *Deep-Sea Research Part a-Oceanographic Research Papers* 34(11): 1867-1881.
- NIILER, P.P., A.S. SYBRANDY, et al. 1995. Measurements of the water-following capability of holey-sock and TRISTAR drifters. *Deep-Sea Research Part I-Oceanographic Research Papers* 42(11-12): 1951.
- NOAA, 1999. Automated data inquiry for oil spills (ADIOS2) NOAA hazardous materials, response and assesment division.
- 2002. General NOAA oil modelling environment (GNOME) User`s Manual. NOAA hazardous materials, response and assesment division.
- OCEAN TREK RESEARCH. Providding innovative and cost-effective solutions to our clients remote sensing, data acquisition, and asset tracking needs. Disponible el 30/04/09 en URL: <http://www.oceantrekresearch.com/>
- PÉREZ-MARRERO, J., O. LLINÁS, L. MAROTO, L. CARDONA, M.J. RUEDA, C. BARRERA, y M. VILLAGARCÍA. 2005 Una herramienta para la fusión de datos oceanográficos obtenidos mediante satélites. *Teledetección, avances en observación de La Tierra*. Eds. M.Arbelo, A González. Asociación Española de Teledetección.
- PÉREZ-MARRERO, J., L. MAROTO, O. LLINÁS, M.J. RUEDA, A. TEJERA, J. GODOY, C. BARRERA. 2006. Integración de observaciones remotas y modelos hidrodinámicos para el estudio de la dispersión de contaminantes en el mar. *Rev. de teledetección*, 26: 60-64.
- RESOLUCIÓN MEPC.134 (53) adoptada el 22 de julio de 2005.
- TOLMAZIN, D. 1993. *Elements of dynamic oceanography*. George Allen & Unwin (Publishers) London, UK.