

# CONTAMINACIÓN SUPERFICIAL DEL MEDITERRÁNEO NOROCCIDENTAL: DETECCIÓN DE DERRAMES DE CRUDO.

Alexéi K. Platónov y José M. Redondo

## Resumen:

Se presenta una continuación temática del artículo "Aplicación de las imágenes SAR en el estudio de la dinámica de las aguas y de la polución del Mar Mediterráneo cerca de Barcelona", publicado en la Revista "Ingeniería del Agua", Vol. 8, N1 en marzo de 2001. Ahora el área de estudio se amplió y comprende toda la zona del Mediterráneo Noroccidental MN, es decir incluye el Mar Balear y el Golfo de León. Los resultados del análisis de cerca de 330 imágenes del Radar de Apertura Sintética, obtenidas mediante los proyectos *Clean Seas*, *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* y *Oil Watch* nos permitieron obtener una visión general, pero estadísticamente justificada, sobre el estado del ambiente marino del MN en los años 1996 – 1998. Se constata que las rutas marítimas cercanas a Marseille están más limpias que cerca de Barcelona. Se evalúa la contaminación total del área, la contribución de los penachos de aguas residuales procedentes de los ríos regionales y de los pequeños pero "habituales" derrames causados por los petroleros. Los derrames de productos petroquímicos durante el período 1996-1998 en el MN ocupan un área estimada de diámetro de 150 km., con un peso de 4,5x103 Tm.

**Palabras clave:** calidad de ambiente marino, imágenes SAR, manchas de hidrocarburos, penachos de aguas residuales, percepción mediante satélites, Mediterráneo Noroccidental.

## INTRODUCCIÓN.

### Problema de la contaminación de aguas marinas y terrestres.

En los últimos años, los países de la Comunidad Europea están prestando más atención a la contaminación, la preservación y al control del medio ambiente terrestre y marino debido al aumento, en las últimas décadas, de la presión antropogénica sobre los ecosistemas marinos y, sobre todo, en las zonas costeras.

Según consta (Ministerio de Medio Ambiente, 1999), en el Mediterráneo se detecta un alto número de derrames accidentales de crudo y de penachos de aguas residuales procedentes de los ríos.

Los productos de petróleo y de sus derivados como nafta, queroseno, aceites pesados y lubricantes son sustancias peligrosas y tóxicas. El petróleo

crudo es un complejo de hidrocarburos que contiene muchas sustancias químicas diferentes. Una de ellas es el benceno: un cancerígeno de grado 1 según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer, IARC. La otra es el tolueno, que produce mutación en las células vivas y puede afectar el desarrollo embrional y fetal del ser humano. El petróleo es un veneno tanto para los ecosistemas acuáticos y terrestres como para la vida humana.

La mayor causa de la pérdida de crudo o de productos petroquímicos en alta mar está relacionada con el tráfico marítimo de estas sustancias peligrosas mediante petroleros. Es evidente que los petroleros no pueden viajar con los tanques medio vacíos por causas de la seguridad de navegación (el buque pierde estabilidad). Los tanques tienen que estar vacíos o llenos por completo. En la práctica, lo que se hace es llenar los tanques de crudo con agua del mar. Así se consigue la estabilización del centro de peso del buque, lo que es muy importante en el

Dep. de Física Aplicada, Universitat Politècnica de Catalunya UPC. C/J.G.Salgado s/n. Campus Nord, Modul B-5, E08034, Barcelona, España.  
A.K. Platonov: Tel. 658692657, e-mail: alexei@fa.upc.es. J.M.Redondo: Tel. 93-401-6088, e-mail: redondo@fa.upc.es

Artículo recibido el 19 de noviembre de 2002, recibido en forma revisada el 4 de marzo de 2003 y aceptado para su publicación el 8 de abril de 2003. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

caso de marejada. El petróleo es menos pesado que el agua y en los puertos es fácil recogerlo desde la capa superior de los tanques, pero durante el viaje las aguas marinas se mezclan (aún en cantidades relativamente pequeñas) con el crudo y son contaminadas. La mayoría de los puertos europeos tienen terminales especiales para recoger esta agua de lastre, pero un petrolero amarrado en el muelle sólo trae pérdidas económicas para sus armadores. Por esto, frecuentemente los petroleros echan esta agua de lastre al mar abierto.

Según información de Terrés y Arias (2000) procedente de la *International Association of Independent Tanker Owners* (INTERTANKO) [www.intertanko.com](http://www.intertanko.com), tenemos los siguientes datos sobre la masa total (en %) de hidrocarburos procedentes de las distintas fuentes de descargas al mar:

- Descargas industriales y residuos urbanos (37%)
- Operaciones técnicas rutinarias de los buques (33%)
- Accidentes de petroleros (12%)
- Origen atmosférico (9%)
- Fuentes naturales (7%)
- Actividades asociadas con explotación y producción de petróleo (2%)

En un primer momento, el crudo o productos de mismo origen, al aparecer en la superficie del agua se desplazan sobre la superficie del mar y forman una película superficial ("*oil spill*"). Inmediatamente, en la superficie se inician procesos de oxidación y emulsificación de las sustancias petroquímicas, dispersándose por sedimentación hacia el fondo del mar, y por evaporación hacia la capa atmosférica.

En las primeras 12 horas se evapora un 25% de las partes ligeras de crudo. Con una temperatura del agua mayor o igual a 15°C, todos los hidrocarburos, hasta el  $C_{15}$ , se evaporan en un período inferior a 10 días. Cuando desaparecen todos los constituyentes gaseosos y disolventes, el crudo restante se transforma en una sustancia viscosa del tipo "*chocolate mousse*". Con el tiempo la viscosidad de "*mousse*" crece y comienza su agregamiento en bolas de crudo de diferentes diámetros (de 1 mm hasta 10 cm, pero con mas frecuencia de 1 a 20 mm). Las sustancias estructuradas con una viscosidad alta ("*mousse*" y bolas de crudo) pueden mantenerse un largo tiempo en la superficie marina (según Vladimirov et al., 1991, hasta un año). También son trasladadas por corrientes marinas, se sedimentan y se agregan y aparecen en las costas del mar. Frecuentemente las bolas de petróleo están colonizadas por varias especies de fito y zoo plankton.

La capa de crudo elimina por completo las ondas capilares en la superficie del mar, reduciendo considerablemente las pequeñas ondas gravitatorias y disminuye el coeficiente de rugosidad de la superficie marina hasta 2-3 veces. Este hecho permite aplicar los Radars de Apertura Sintética (SAR) a la detección de las películas de crudo y de sus derivados tensioactivos. También la película de petróleo cambia la intensidad y la composición espectral de la luz solar y de las ondas electromagnéticas que penetran en el agua. La capa de crudo de 30-40m<sup>-6</sup> absorbe completamente las ondas de la luz infrarrojo. Las capas más gruesas interrumpen el intercambio de gases entre la atmósfera y el ambiente marino, poniendo en peligro la vida de las comunidades acuáticas.

Resumiendo, podemos decir que todos los tipos de contaminación química de aguas marinas provocan deterioro de las áreas costeras, mortandad de aves y mamíferos marinos, reducción de los bancos de peces y crustáceos, y a veces ponen en peligro la salud pública.

Los factores generales que determinan la magnitud e impacto ambiental de los derrames de productos tóxicos en el mar son las siguientes:

- El primero, es la ubicación geográfica del vertido. La gravedad de impacto de sustancias tóxicas se incrementa cuando se produce en las zonas costeras debido a la gran diversidad biológica y vegetal existente, a la concentración de las zonas pobladas, de lugares de turismo y de la protección ambiental y decrece en alta mar donde el número total de especies y de actividades humanas disminuye notablemente.
- El segundo, son los factores hidrometeorológicos imperantes en el lugar del accidente. Las mareas de amplitudes altas, las corrientes, oleaje y los fuertes vientos agravan los efectos ambientales del derrame. Pero influyen también los factores ambientales secundarios como son las particularidades locales del proceso de la difusión de la sustancia vertida, la temperatura de la capa superficial del mar, el nivel de la salinidad de aguas marinas, la batimetría del lugar.
- Y el tercero es la composición de la sustancia tóxica vertida.

También influye el período del tiempo de impacto, es decir si es un derrame instantáneo y puntual o prolongado, mientras el buque averiado estaba a la deriva.

## Peligros actuales de contaminación química en el litoral y en alta mar del MN.

Según los datos del Ministerio de Medio Ambiente de España (1999), “de toda la contaminación que sufre el Mediterráneo, el 25% tiene su origen en el propio mar y el 75% restante se origina en tierra.

Las mayores causas de la contaminación del litoral del MN son las aguas residuales procedentes de las costas y los derrames accidentales o a propósito de sustancias petroquímicas tanto en alta mar como en las áreas portuarias.

Los accidentes técnicos de los petroleros, la habitual descarga de los residuos y de aguas de lastre determinan la aparición constante de derrames y estelas de crudo en las aguas costeras y en las playas. Esta contaminación se refleja en las pequeñas bolas de crudo descompuesto.

Los resultados del análisis de imágenes SAR de los años 1996-1998, adquiridos mediante el proyecto CS y otros, permitieron apreciar las rutas marítimas habituales de los barcos-petroleros que lavan clandestinamente sus tanques en las aguas de la Zona Económica Exclusiva de España.

Los penachos detectados cerca de la costa se deben principalmente a las fuentes de contaminación habitual como son los deltas de los ríos regionales: Ebro, Llobregat, Besós, Rhone, etc., cuyas aguas incluyen productos químicos industriales tensioactivos, pesticidas y fertilizantes agrícolas (Figura 1).

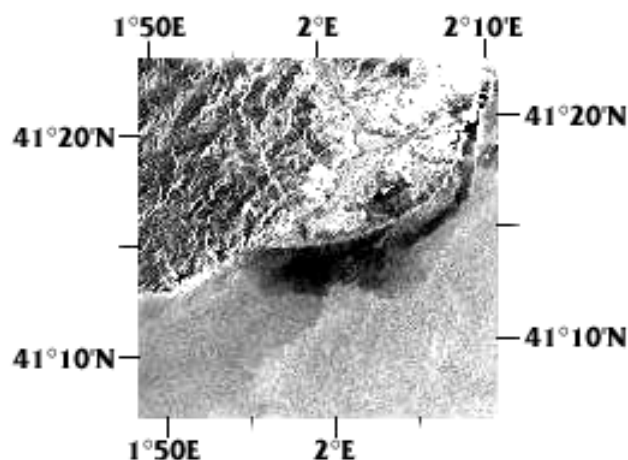


Figura 1. Imagen del SAR del satélite ERS-1 del 06.12.96. Un penacho de aguas con productos tensioactivos procedente del Río Llobregat, Barcelona.

Por ejemplo, según la información de los periódicos locales (el día 16 de enero de 2002): “Cen-tenares de peces, la mayoría carpas, aparecieron ayer muertos en el Llobregat, en su paso por Martorell, después de que se detectase el vertido ilegal de algún tipo de detergente, posiblemente jabón, que se utilizó para lavar una cisterna de camión, y llegó al río a través de un colector del polígono industrial de Can Soterespag”.

En Cataluña, según Arranz (1998), la Costa Brava sufre una contaminación orgánica y petroquímica de las aguas residuales provocada por el déficit de saneamiento y por los vertidos de carburros y lubricantes desde embarcaciones náuticas deportivas. La Costa Daurada se encuentra bajo la presión de la contaminación orgánica de las aguas superficiales debida a las actividades turísticas y de la contaminación industrial derivada del sector petroquímico de Tarragona. También existe cierto peligro de derrames de crudo desde la plataforma petrolera Casablanca o desde las tuberías que conectan dicha plataforma con los terminales costeros. El periódico “El País” del 28.07.01 informó sobre un vertido de petróleo de tres kilómetros que contaminó las playas catalanas de Salou y Camris (costa Daurada). El derrame lo provocó el petrolero *Tromso Trust* que descargaba el petróleo en la monoboya de REPSOL ante el litoral de Tarragona y vertió el crudo en el mar por un problema con la manguera que conecta el barco al tubo submarino.



Figura 2. Principales corrientes marinas y lugares de peligro asociado con las industrias petroleras y la contaminación marina en el MN. (Cortesía de François Cauneau, Ecole des Mines de París).

La figura 2 muestra los focos más evidentes de peligro de contaminación del Mediterráneo Noroccidental a través de las industrias petroleras y actividades marítimas asociadas.

## Definiciones

En este trabajo nos concentramos generalmente en la detección y análisis de las fuentes de contaminantes terrestres y marítimos en las aguas del MN mediante satélites.

La fuente principal de datos es la colección de las imágenes espaciales de los satélites ERS 1/2 y RADARSAT del sensor tipo Radar de Apertura Sintética SAR (más de 300 imágenes en el área), obtenidas de forma periódica durante los años 1996-1998, generalmente en el ámbito del proyecto *Europeo Clean Se*). También se utilizan las imágenes de los proyectos *Oil Watch* y *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia*.

El área geográfica de interés comprende el área marítima del MN: Islas Baleares-Delta del Ebro-Cabo de Creus-Golfo de León-Marseille.

## Radares de apertura sintética SAR.

El radar de apertura sintética SAR (Figura 3) es un radar activo que emite la energía en el intervalo de frecuencias de microondas (unos centímetros) en un período pequeño de tiempo. Más información sobre los conceptos teóricos de funcionamiento del SAR en ESA (1992), Johannessen et al. (1994) y en Martínez-Benjamin, (1999).

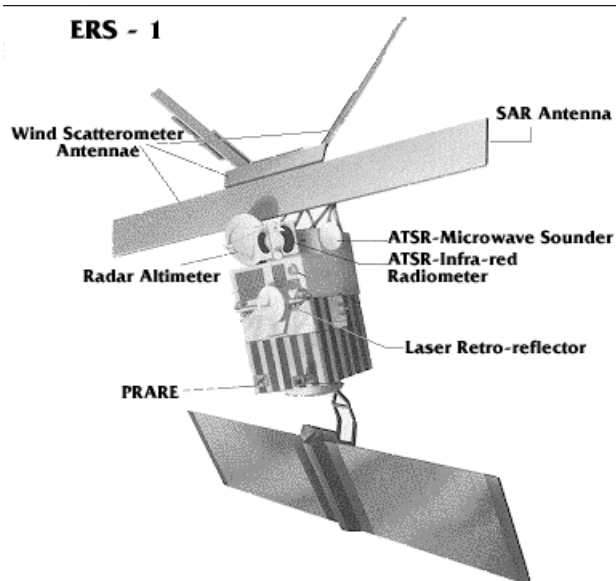


Figura 3. Satélite ERS-1/2 de la ESA equipado con el SAR. Fuente: ESA.

El dispositivo SAR puede ser instalado a bordo de un avión o de un satélite.

El procesamiento de datos obtenidos por SAR es complicado debido a un gran volumen de información correspondiente a cada imagen. Al final de este complejo procesado se obtienen imágenes en tonos de gris con una resolución entre 30 m y 200 m (ERS) ó entre 25 m y 100 m (RADARSAT) por píxel dependiendo del tipo de radar y de las necesidades del usuario.

La intensidad de la señal del SAR recibida es debida principalmente a la rugosidad a pequeña escala de la superficie. Cuando la superficie monitoreada mediante radar es rugosa y contiene pendientes pequeñas, cuyo tamaño es comparable con la longitud de la onda de la señal de radar, entonces se observa el fenómeno de difracción. En el caso de la superficie del mar, la señal del SAR dispersada por los trenes de ondas capilares (o las pequeñas de altura comprendida entre 0,1 mm y 10cm) se suma coherentemente, es decir se produce una dispersión resonante de tipo Bragg. En efecto, en la imagen se observa un área marina en altos tonos de gris, casi blanca. En el caso contrario, cuando en la superficie del mar no hay olas pequeñas, no se produce resonancia de la señal y en la imagen se observan unas zonas superficiales oscuras.

Las trazas de materia orgánica que tienen propiedades tensioactivas en la superficie marina (como son los productos de crudo, de aceites minerales, de desechos urbanos y rurales, de la vida marina natural etc.) producen una disminución local de la rugosidad de la superficie del mar debida principalmente al viento y a las olas capilares, que se reflejan en una menor reflectividad de la señal emitida y detectada por los sensores del SAR (Gade et al., 1998). Estas manchas o penachos oscuros en las imágenes SAR, son independientes de las condiciones de iluminación solar y de cobertura por nubes, sin embargo, el posible contraste depende fuertemente de la velocidad del viento (Gade y Alpers, 1999). Cuando la velocidad del viento es mayor de 2-3 m/s y menor de 10-12 m/s las condiciones de la detección de las manchas mediante el SAR son más favorables. Las imágenes de los radares activos SAR ayudan a detectar en alta mar y en las proximidades de las costas los derrames de residuos oleosos procedentes de los buques y de otras fuentes de contaminación tal como se ven en las Figuras 4-6. Aquí se aprecian estelas detectadas respectivamente mediante fotografía aérea y SAR imágenes.





Figura 4. Foto aérea de un buque con una estela de crudo. Mar del Norte. Copyright Greenpeace/Morgan. 1989.

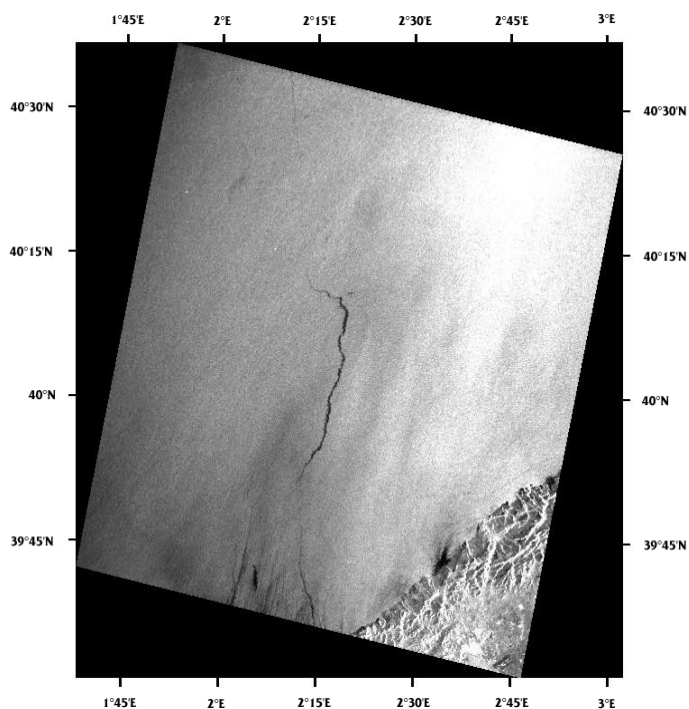


Figura 5. Ejemplo de una estela que lleva un tiempo en el mar, imagen del SAR de ERS-2 de 05.07.98 del área al Noroeste de Mallorca.

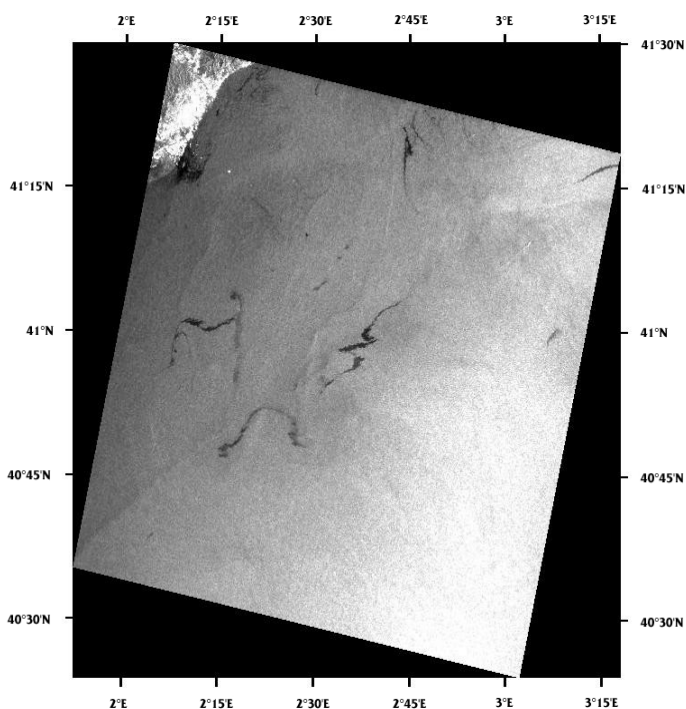


Figura 6. Imagen del SAR de ERS-2 de 05.07.98. Derrames de crudo frente a Barcelona y penacho de aguas procedentes del Río Llobregat

Según nuestra experiencia de monitorización de superficie marina mediante las imágenes del SAR, los derrames de petróleo procedentes de los petroleros se encuentran en alta mar en su fase de transformación y de degradación en general (Figura 6), pero, a veces se puede captar en su fase inicial cuando se ve perfectamente cómo el buque delincuente (los puntos brillantes en la punta de estela oscura de aguas contaminadas) está vertiendo aguas de lastre (probablemente) en su ruta en alta mar.

## Imágenes disponibles.

Se analizaron más de 300 imágenes SAR específicamente limitándonos a las áreas marítimas 1,2 y 3 del MN (Figura 7) obtenidas mediante dos proyectos: Clean Seas (285 imágenes de satélites ERS-1/2) y ERS-1/2 SAR *Exploitation Study in Catalonia* (4 imágenes de satélite ERS-2). También se utilizaron los resultados y los fragmentos de las imágenes SAR del proyecto Oil Watch (19 imágenes del satélite RADARSAT y 9 de POLPERS) (Gonzales et al., 1999).

El número de las imágenes disponibles de cada uno de los 22 recuadros fijos de unos 100x100km correspondientes a las imágenes se presentan en la figura 8.

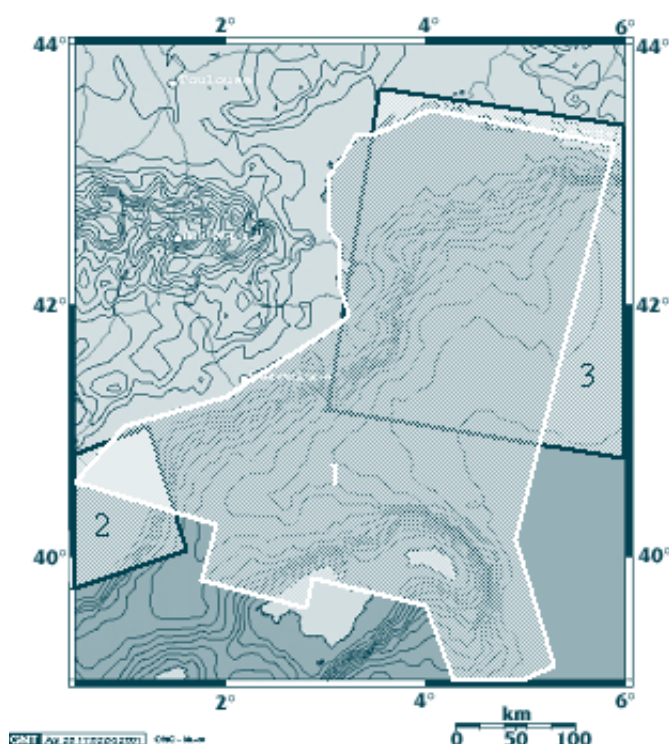


Figura 7. Esquema simplificado de situación y superposición de las zonas estudiadas en 1996-1998 bajo los proyectos: 1 - Clean Seas (ERS 1/2), 2 - ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia, 3 - OILWATCH (RADARSAT) en el Mar Balear y en el Golfo de León.

Los recuadros número 1-20 son del proyecto Clean Seas, el recuadro número 21 es del proyecto ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia y el recuadro 22 de 300km por 300 km es del proyecto OILWATCH.

Es necesario resaltar que todos los valores estadísticos de frecuencia y probabilidad de detección de derrames de crudo mencionados más adelante corresponden a una periodicidad de toma de datos del satélite de 35 días. Las observaciones del satélite en cada recuadro (1-21) fueron realizadas solamente unas 20 veces, en promedio, a lo largo del período total de observación de 713 días (proyectos Clean Seas y ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia). En cuanto al proyecto OILWATCH: hemos usado solamente los fragmentos de las imágenes en los cuales se detectaron los derrames de petróleo con un criterio subjetivo, lo que no permitió valorar la probabilidad de detección en función del número total de imágenes RADARSAT obtenidas durante el período de observaciones.

El número de imágenes en cada uno de las 21 cuadrículas varía entre 4 y 20. En algunas zonas había imágenes superpuestas de diferentes proyectos,

hecho que resulta en un menor o mayor número de observaciones de diferentes lugares del área observada (de 4 a 58). Para normalizar los resultados de la detección de derrames de crudo, se elaboraron dos esquemas complementarios de las zonas de la distribución espacial de los recuadros y zonas geográficas superpuestas, donde se realizaron las observaciones múltiples.

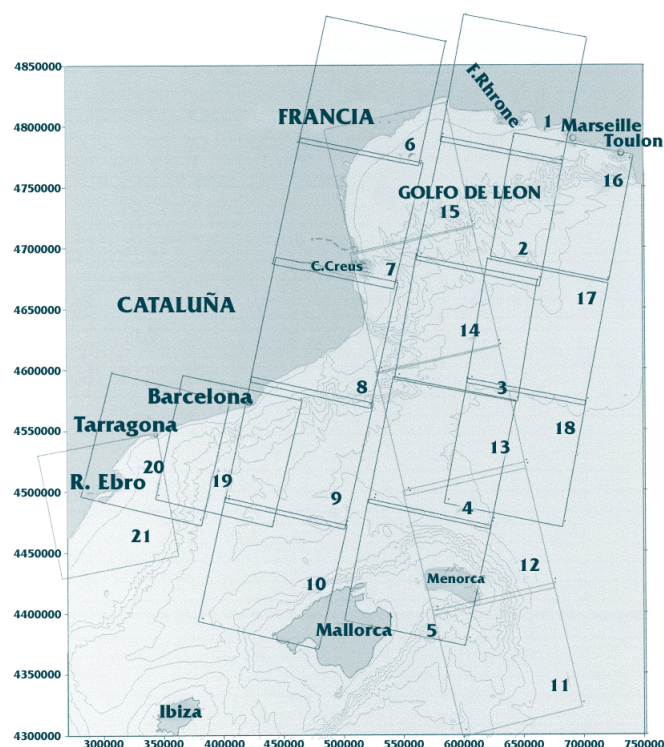


Figura 8. El área de estudio, la situación geográfica de los recuadros y el número de las imágenes obtenidas en cada recuadro está marcado en las elipses (NN 1-20 a través del proyecto Clean Seas, NN 21 y 22 a través de los proyectos ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia y OILWATCH correspondientemente).

## ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS MANCHAS Y ESTELAS DE CRUDO DETECTADAS EN EL MN EN EL PERIODO 1996 - 1998.

En total fueron detectadas 293 (Figura 9) manchas, estelas de crudo en mar abierto y penachos de aguas residuales cerca de las costas, complementando los datos parciales anteriormente publicados (Redondo y Platónov, 2001). De estos 293 derrames detectados (Gonzales et al., 1999, Jolly et al., 2000) 11 corresponden a las imágenes obtenidas mediante el proyecto ERS-1/2 SAR

Exploitation Study in Catalonia en la zona del Delta de Ebro, 31 corresponden al proyecto



*OILWATCH* (dos derrames coincidían con los del proyecto *Clean Seas* y fueron excluidos) y el resto (253 derrames) al proyecto *Clean Seas*.

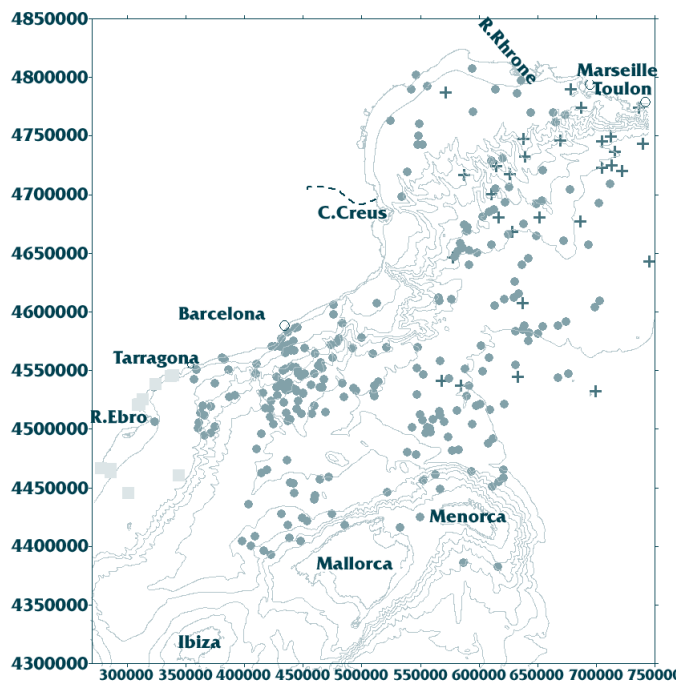


Figura 9. Todas las manchas, estelas y penachos de aguas residuales detectados mediante imágenes SAR obtenidas bajo los proyectos *Clean Seas* (círculos), ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia (cuadrados) y *OILWATCH* (cruces).

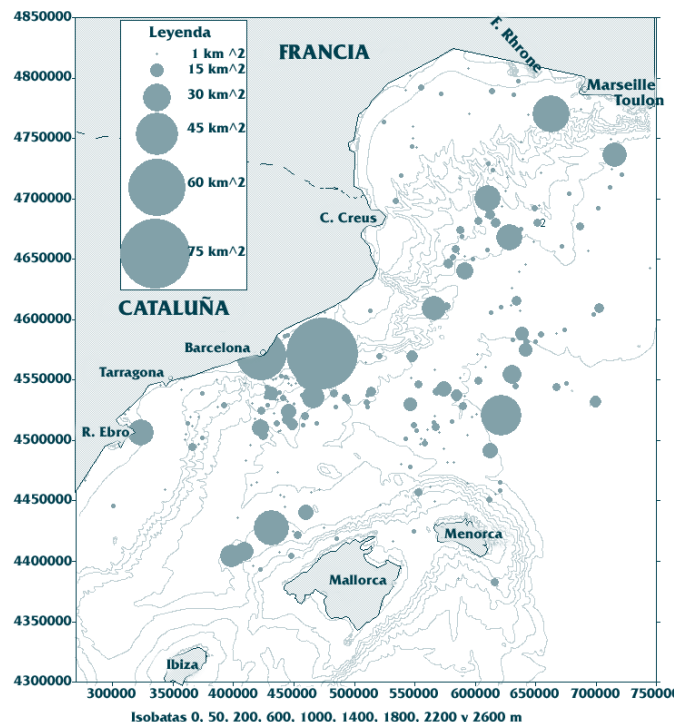


Figura 10. Las áreas de las manchas, estelas y penachos de aguas residuales mayores de 1 km² detectados en el período 1996-1998 en el Mediterráneo Noroccidental en el ámbito de tres proyectos.

Fueron calculadas algunas características geométricas y físicas de las manchas tales como: el área (Figura 10) y la masa total, los valores medios y máximos de longitud y anchura. El peso de las manchas fue estimado bajo la siguiente aproximación: el espesor medio de la película oleosa superficial es de 0.305  $\mu\text{m}$  que corresponde a unos 352 litros de crudo por 1 km² de la superficie marina según la clasificación de A. Nelson-Smith citada en Vladimirov et al., (1991); el valor de la densidad media del crudo fue tomado como 760 kg/m³ que nos dio 0.267 Tm / km². El área total de todos los vertidos de dicho período es de 1521 km² y la masa total bajo dichas condiciones es de 407 Tm. El área y la masa promedias de conjunto de manchas son 5.28 km² y 1.41 Tm.

Es interesante resaltar que la mayoría de los derrames se detectó en las imágenes de órbitas descendentes, hecho que se confirma en Gade y Alpers (1999). Es probable que tal muestra de actividades ilegales de contaminación en la superficie del mar también esté relacionada con la hora habitual del paso de satélites a las 10 h 30 m UTC sobre el área del MN en su órbita descendente. La limpieza de los tanques y sentinas se realizan usualmente por la noche y las manchas de petróleo son recientes a la mañana siguiente y su difusión no es excesiva: por eso se detectan con facilidad mediante imágenes SAR. En su órbita ascendente, el satélite sobrevuela la región estudiada a las 21 h 58 min UTC y el número de manchas detectadas disminuye mucho frente a las detectadas por la mañana según Gade y Alpers (1999) siendo su proporción relativa de un 13%.

## Las estelas de crudo en alta mar.

Si sólo consideramos las estelas de productos petroquímicos procedentes de buques en alta mar: en dicho período fueron detectados 101 casos de típicos derrames. El resto (190 manchas) o fueron demasiado pequeñas para definir sus parámetros topológicos o no tenían un aspecto claro (fueron mezclados con los derrames naturales, etc.) o fueron los penachos de aguas tensioactivas procedentes de la costa. Las estelas típicas tenían las siguientes características medias: la longitud de la mayoría de las estelas está comprendida entre 5 y 20 km, la anchura entre 0,2 - 0,4 km y el área es inferior a 10 km². Estos datos pueden servir para definir un patrón de derrame "oil spill" típico en el área del M N.

En principio, dichos derrames de crudo dependen tanto de las características de los buques

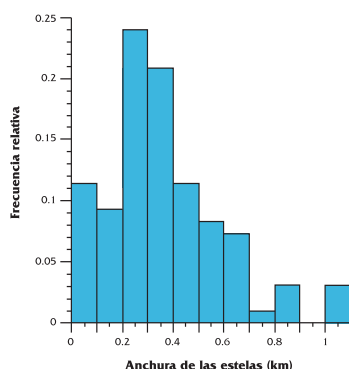


Figura 11. Frecuencia relativa de anchura de las estelas detectadas en los años 1996 – 1998

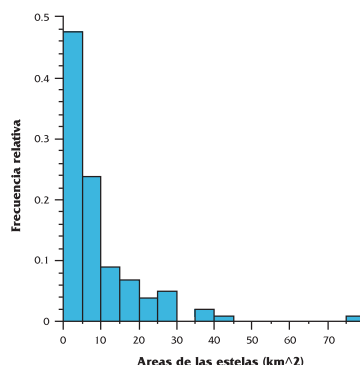


Figura 12. Frecuencia relativa de áreas de las estelas detectadas en 1996-1998.

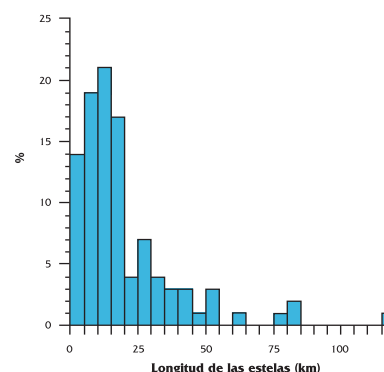


Figura 13. Porcentaje en función de la longitud de las estelas de crudo detectadas en los años 1996-1998.

como de las condiciones medioambientales de la zona (viento, oleaje, corrientes, etc.) que se reflejan en el coeficiente de difusión turbulenta.

La longitud total de todas estas estelas fue de 2014 km. El área – 919.4 km<sup>2</sup> y la masa – 246Tm. No obstante los datos promedios no se pueden generalizar siempre de forma Gausiana ya que los procesos de difusión turbulenta no son lineales. Un ejemplo de ello es la estela detectada frente a Barcelona que poseía una longitud total de 120 km aproximadamente (contando con todas las ramificaciones) tal como se ve en la figura 15. Los gráficos de las figuras 11-13 muestran algunas características estadísticas de las estelas de crudo detectadas en el área del Mediterráneo Noroccidental.

No existe una relación significativa entre la anchura y longitud de las estelas. Una estela puede ser corta, pero llevar bastante tiempo en el mar y por fenómenos de difusión, según las condiciones del medio ambiente marino local, ésta se dispersaría bastante.

En las figuras 14 y 15 se muestran los ejemplos de diferentes estelas cuya apariencia es cada vez más compleja. La forma geométrica de estelas y su estado de difusión depende de la actividad turbulenta de la zona y del tiempo que transcurre desde su generación hasta su detección mediante satélite.

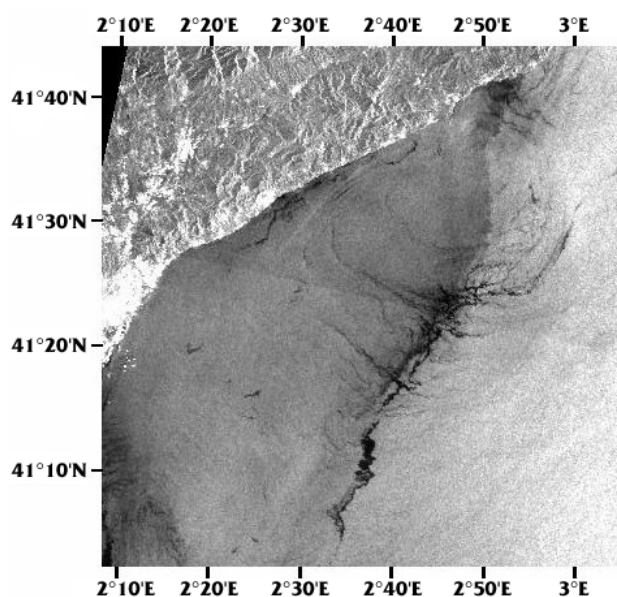
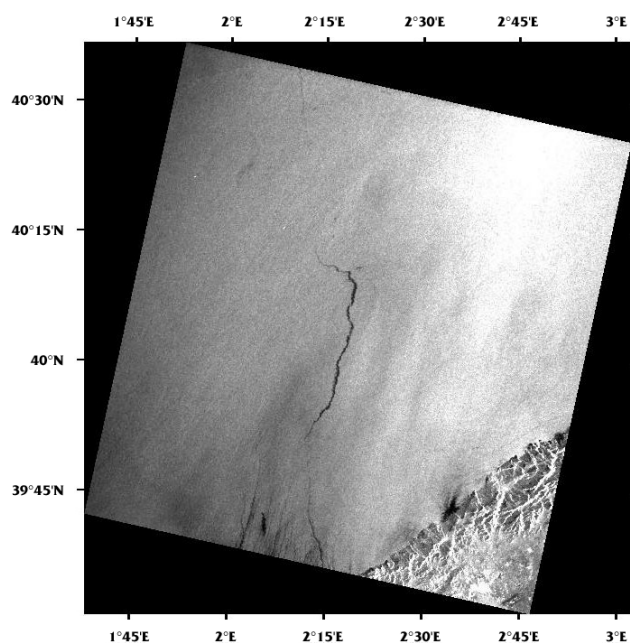


Figura 14 y 15. Ejemplos de diferentes estelas detectadas: 14) una estela que lleva algunos días en el mar de 05.07.98. 15) una estela diluida (una parte de la imagen), día 15.06.97.



## Estimación de nivel de la contaminación del Mediterráneo Noroccidental.

Cerca de la costa francesa, principalmente en las rutas marítimas que se dirigen a Marseille, no se detectó un número tan grande de derrames como en las proximidades de Barcelona. Este hecho puede ser explicado por la existencia de un control aéreo sistemático realizado sobre aguas costeras por el Gobierno de Francia, que repercute en el conocimiento de dicha actividad y de las consecuencias administrativas para los capitanes de los buques.

Una comparación de las manchas detectadas en los años 1996-1998 en función de la distancia desde Marseille y desde Barcelona se muestra en la figura 16. Según muestra esta figura, justo en el límite de las aguas territoriales Españolas, a una distancia de 12 millas de la costa (unos 22 km aproximadamente) se observa un gran aumento de la contaminación y el número de derrames detectados tiene un máximo en la franja entre 40-60 km.

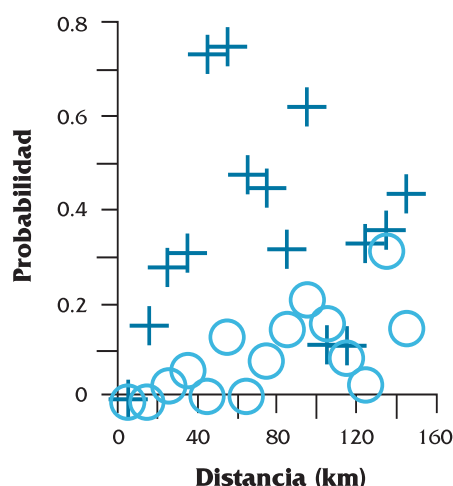


Figura 16. Probabilidad de la detección de derrames en las rutas marítimas frente a la distancia desde los puertos de Barcelona (+) y de Marseille (O) en los años 1996-1998, se basa en los resultados del proyecto Clean Seas.

En cuanto a los derrames detectados en las proximidades de la costa de Marseille: el mayor número de casos fue detectado a distancias de 130-140 km. de la costa, lo que evidencia la importancia de un control medioambiental.

Un área imaginaria equivalente a todos los derrames de productos petroquímicos estimada para todo el período 1996-1998 (a escala real) en el Mediterráneo Noroccidental se muestra en la figura 17.

La estimación supone 3 días de posible existencia en la superficie del mar de las manchas detectadas mediante el SAR (supongamos que cada 3 días detectamos el mismo número de manchas que en el período de 35 días). El diámetro de esta área estimada es de 146 km., con un peso de 4.477 Tm. Esta masa se obtiene multiplicando el peso real total de 407Tm de 291 manchas, estelas y penachos detectados en el período de 2 años de observación por la probabilidad relativa de detección de la misma cantidad de derrames con periodicidad no de 35 días, sino de su persistencia estimada de 3 días. Su área total es de 16780 km<sup>2</sup> aproximadamente suponiendo que un kilómetro cuadrado tiene una masa promedia de 0.2675 Tm de crudo.

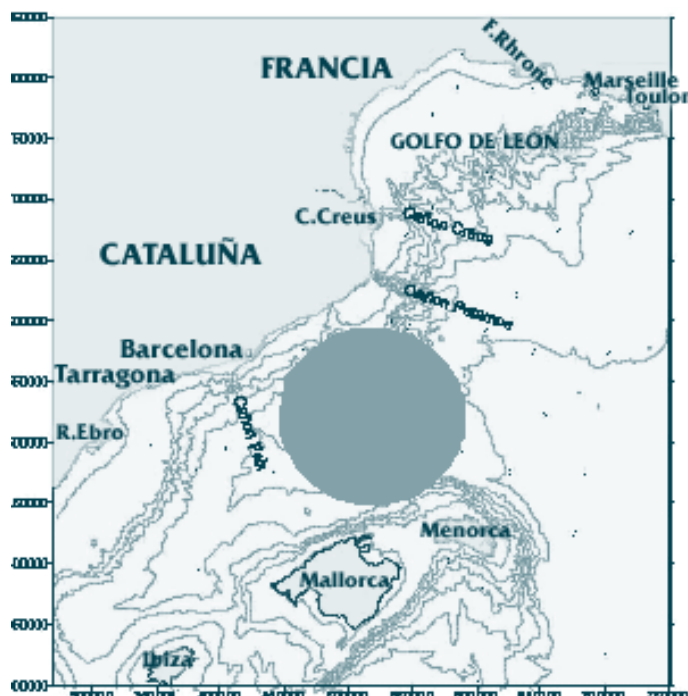


Figura 17. Área estimada de todas las manchas que pudieran aparecer en el período 1996-1998 según la estimación realizada.

## Penachos de aguas residuales en el litoral del MN.

Los penachos de aguas residuales procedentes de los ríos y fuentes costeros de contaminación también se observan frecuentemente mediante imágenes del SAR en las proximidades de las costas del MN. En el período entre 1996 y 1998 fueron detectados 42 penachos. En el litoral del Golfo de León y en las proximidades del Río Rhone fueron detectados 4 penachos, en la Costa Brava – 8 y en la Costa Dourada – 6. El mayor número de penachos (a saber 24), generalmente procedentes del Río Llobregat,

fue detectado cerca de Barcelona (Figura 1, 18) mediante 31 imagen del SAR. Casi todos los penachos detectados cerca de Barcelona se desplazan hacia Oeste-Suroeste debido a la influencia de la corriente dominante (Liguro-Provençal).

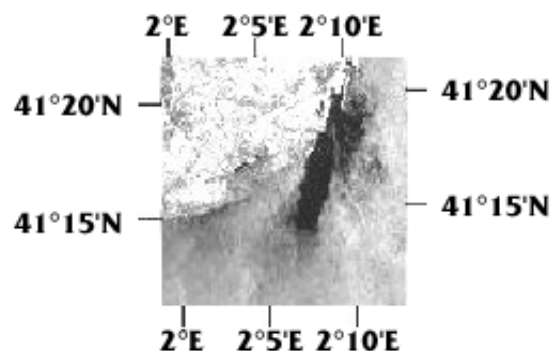


Figura 18. Penacho típico en las proximidades de Barcelona del 10.01.97. Área de penacho es de 40 km<sup>2</sup>.

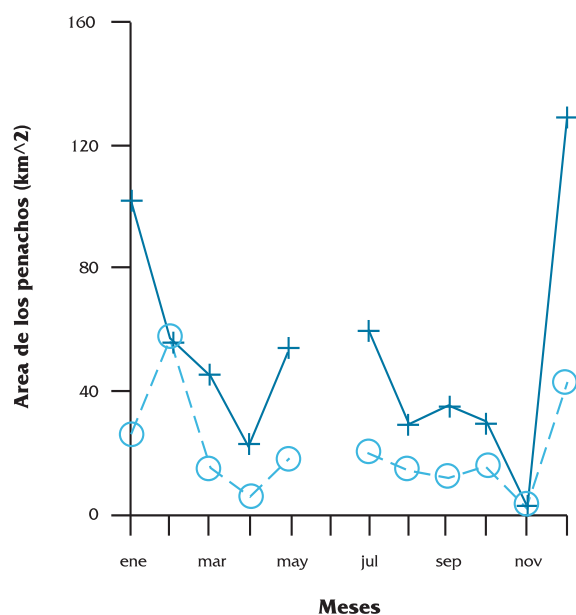


Figura 19. Áreas de penachos detectados cerca de Barcelona en período comprendido entre 06.12.96 y 18.10.98. Cruces – área total de dos años, círculos – área media mensual.

El área total de los penachos detectados en las proximidades de Barcelona fue 589.7 km<sup>2</sup>, área media de un penacho: 24.5 km<sup>2</sup> y área máxima de mayor penacho detectado el día 06.12.96 fue 90 km<sup>2</sup>. La figura 19 muestra las áreas totales y medias mensuales de penachos en la escala del tiempo promedio detectados cerca de Barcelona en el período comprendido entre 06.12.96 y 18.10.98. La escala temporal de análisis estadístico (solamente dos años) no nos permite conclusiones generales fiables respecto a la ocurrencia de los penachos.

Tampoco de sus características físicas. Se ve que el área total y media mensual de la figura 19 tienen unas tendencias de incremento en el verano y en algunos meses de invierno (diciembre, febrero), lo que nos indica la presencia de unas condiciones hidrometeorológicas favorables para la detección de las manchas mediante dispositivo SAR en estos períodos del tiempo.

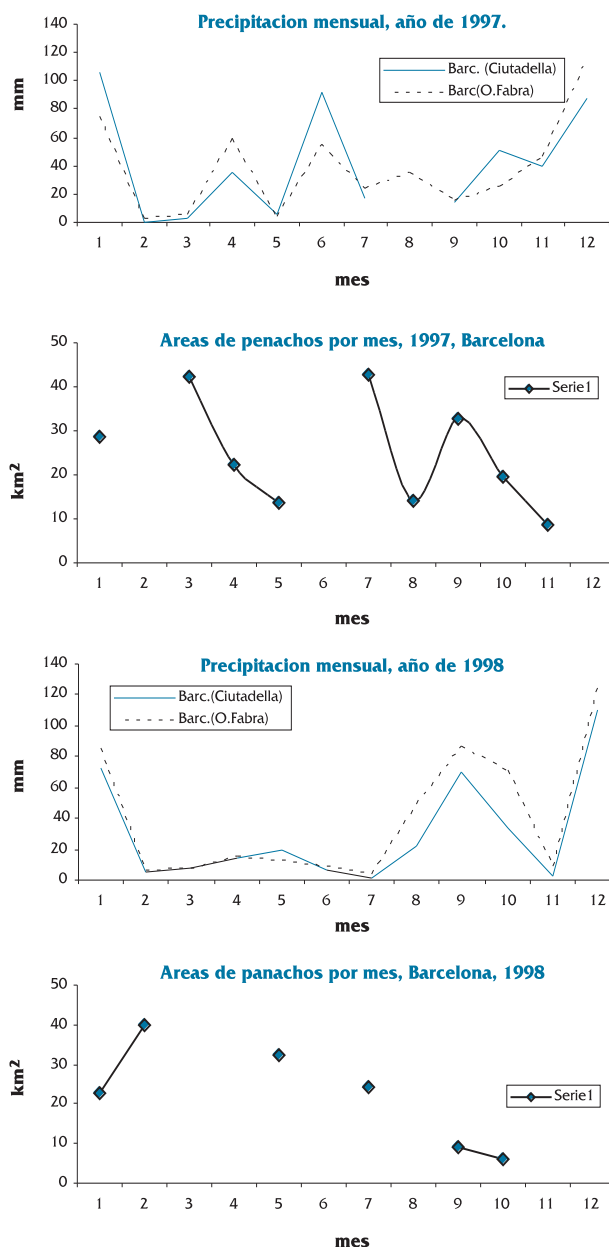


Figura 20. Precipitación mensual obtenida mediante las observaciones realizadas por estaciones meteorológicas de Ciutadella y O. Fabra (ambas de Barcelona) en los años 1997 y 1998 y el área total de los penachos detectados en cada mes del mismo período cerca de Barcelona.

A pesar de que lógicamente los mayores penachos están asociados con aguaceros, desbordamientos del sistema de saneamiento urbano y los caudales de ríos considerables, las figuras 19 y 20 muestran que en los meses de menor precipitación se observa un área total de penachos detectados mayor. La explicación de esta aparente discrepancia puede deberse a las condiciones meteorológicas que acompañan normalmente a las lluvias y a los frentes atmosféricos, es decir a los fuertes vientos y oleaje, lo que perjudica la detección de los derrames de aguas contaminadas en la superficie marina según se conforme en Gade et al., 1998. La figura 21 tampoco nos da una clara relación entre las áreas de penachos detectados y precipitación mensual.

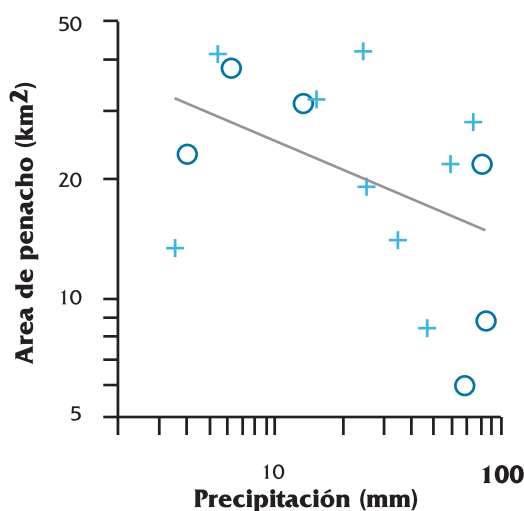


Figura 21. Dispersión de los valores medio mensuales de precipitación y de las áreas de penachos cerca de Barcelona, año 1997 (+) y año 1998 (o).

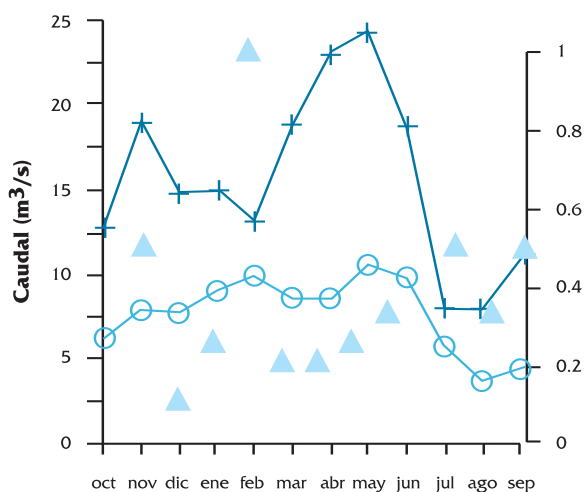


Figura 22. Caudales medio mensuales (1996-1998) de los ríos Llobregat (+) y Fluvià (O) y frecuencia relativa de la detección de los penachos ( $N/N_{max}$ ) en los años 1996-1998 en el litoral de Cataluña.

Como muestra la figura 22, el mayor número de penachos detectados en el litoral de Cataluña coincide con meses de menores caudales de los dos ríos típicos de la región, lo que está a favor de nuestra hipótesis de la relación inversa entre la intensidad de lluvias (asociada con las condiciones hidrológicas y meteorológicas que facilitan una rápida dilución de contaminantes) y el número de los penachos detectados. Con la información limitada a dos años de observaciones parece ser que en épocas de caudales bajos la concentración de productos tensioactivos aumenta y por tanto la detección de penachos es más probable.

## Número normalizado de derrames detectados.

Utilizando el número de recuadros superpuestos y los puntos de situación espacial de los derrames detectados, fue elaborado el esquema general en el cual se muestran las zonas de imágenes superpuestas, el número de las observaciones realizadas en cada zona, el número de las imágenes en las cuales fueron detectados los derrames y el número de los derrames detectados en cada zona (más información en Platónov, 2002).

Para cada zona específica, fue calculado el valor de probabilidad de detección de las manchas como el resultado de la división del número de las imágenes que contenían las manchas por el número total de las observaciones/imágenes realizadas sobre esta área. Después, toda el área de estudio fue dividida en cuadrados de 50x50 km y en sus centros fueron colocados los valores correspondientes de dicha fracción, que indica la probabilidad de detección.

El número normalizado  $N_n$  de manchas o número promedio de manchas detectado por observación a escala de 50km por 50 km fue calculado como el resultado de la división del número de las manchas detectadas  $N$  en una zona específica por el número total de las imágenes obtenidas  $N_i$  sobre esta misma zona  $N_n = N / N_i$ . Después los valores obtenidos de  $N_n$  fueron colocados en los centros de las dichas áreas (50x50km).

En la figura 23 se muestran los resultados generalizados de la interpolación espacial de los valores de probabilidad; pueden verse cómo las áreas más oscuras indican que se realizó la interpolación de los valores  $N_n$ : la probabilidad de la ocurrencia de las manchas es mayor.



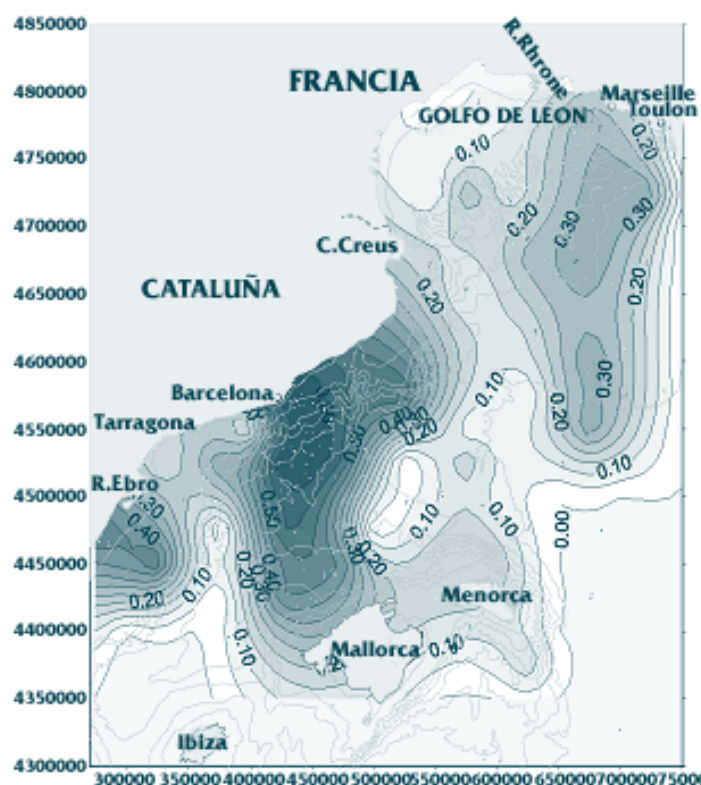


Figura 23. Probabilidad P de detección de las manchas en el período de 1996-1998 en el área de estudio.

La zona de mayor probabilidad (0.7) de detección de las manchas está situada en las proximidades de Barcelona (casi todas las imágenes en esta zona tenían las manchas o penachos de aguas residuales). Cerca de Marseille la probabilidad de detección de las manchas es menor (probabilidad de 0.34). En la zona al Sur del Delta de Ebro las observaciones no fueron frecuentes y esta área posee solamente cuatro imágenes superpuestas obtenidas en cuatro fechas diferentes. Pero dos de estas cuatro imágenes tenían los derrames detectados, hecho que dió una probabilidad de detección de las manchas en esta zona relativamente alto. Pero en la realidad con tan poco número total de imágenes obtenidas sobre esta zona no se puede evaluarla estadísticamente con confianza. Por lo tanto el problema de la evaluación del nivel de la contaminación superficial de la zona situada en las proximidades del Delta del Ebro está aún por resolver mediante nuevos datos y observaciones en el futuro.

En la figura 24 se presentan los resultados de la interpolación generalizada del número normalizado  $N_n$  de manchas sobre el área de estudio. Las áreas con el mayor número normalizado (de hasta 1.8) de las manchas detectadas están situadas cerca de Barcelona, hecho que significa que esta zona marítima está más contaminada mediante los vertidos de productos petroquímicos. Las áreas al Sur de Marseille y Toulon parecen estar menos contaminadas: el número normalizado de la detección de las manchas por observación varía entre 0.5 y 0.7 aproximadamente

## CONCLUSIONES

Los resultados del análisis de cerca de 330 imágenes del SAR obtenidas mediante los proyectos *Clean Seas*, *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* y *Oil Watch* nos permiten presentar las siguientes conclusiones sobre el estado de la contaminación del área del Mediterráneo Noroccidental en los años 1996 - 1998:

La contaminación muy próxima a la costa procede generalmente de las desembocaduras de los ríos y de algunas ciudades portuarias y centros turísticos costeros. En el período de estudio fueron detectados 42 penachos. En el litoral del Golfo de León y en las proximidades del Río Rhone fueron detectados 4 penachos, en la Costa Brava y Maresme – 8 y en la Costa Dourada – 6. El mayor número de penachos procede del Río Llobregat situado cerca de Barcelona. En esta zona el área total de los penachos

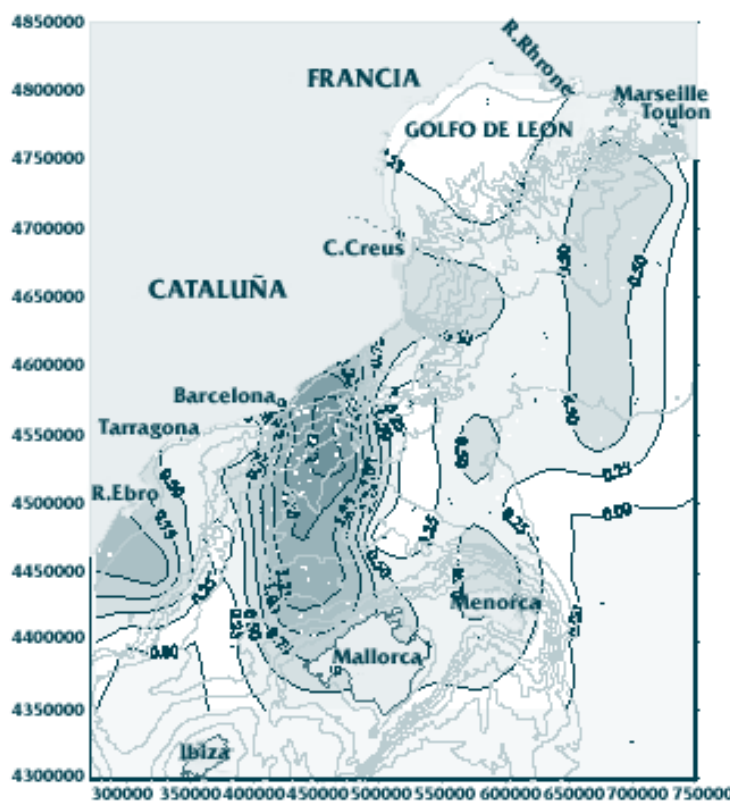


Figura 24. Número normalizado  $N_n$  de casos de detección de manchas de petróleo en el área de estudio en el período de 1996-1998.

chos detectados fue de 589.7 km<sup>2</sup>, el área media de un penacho fue de 24.5 km<sup>2</sup> y el área del mayor penacho detectado el día 06.12.96 fue de 90 km<sup>2</sup>.

A pesar de que lógicamente los mayores penachos están asociados con aguaceros, desbordamientos del sistema de saneamiento urbano y los caudales de ríos considerables, en los meses de menor precipitación se observa un área total de penachos detectados mayor. La explicación de esta aparente discrepancia usando los resultados de Gade et al., 1998, puede deberse a las condiciones meteorológicas que acompañan normalmente a las lluvias y a los frentes atmosféricos, es decir, los fuertes vientos y oleaje perjudican la detección de los derrames de aguas contaminadas en la superficie marina y por otro lado aumenta la intensidad de los procesos dinámicos dando lugar a la mezcla y dilución de los contaminantes en aguas costeras. Por otro lado, a pesar de la información limitada sólo a dos años de observaciones, parece ser que en épocas de caudales bajos (verano) la concentración de productos tensioactivos en la superficie acuática aumenta y por tanto la detección de penachos es más probable.

En la zona de alta mar se observa gran número de derrames de crudo y/o los productos tensioactivos asociados generalmente con las rutas marítimas habituales de los petroleros. Cerca de Marseille (Francia) fueron detectados menos casos de derrames que alrededor de Barcelona, esto se demuestra claramente en la figura 16 entre 20 y 80 km mar adentro desde los respectivos puertos. Para Marsella en esta zona existe una probabilidad de detección de vertidos de 0.07 frente a 0.45 para aguas cercanas a Barcelona, la única explicación viable, conociendo la presencia de vuelos de reconocimiento franceses y que en las aguas españolas no existe tal control de la contaminación marina es que algunos capitanes de los buques efectúan los deslastes y otras operaciones técnicas en mar abierto con alevosía.

El área total de todos los vertidos del período de nuestro estudio es de 1521 km<sup>2</sup> y la masa total estimada bajo la condición que una masa de crudo de 0.267Tm ocupa un kilómetro cuadrado de la superficie marina, es de 407 Tm. Considerando la falta de las observaciones de mayor frecuencia, la masa total sería de  $4,5 \times 10^3$  Tm.

El papel de las pequeñas y “habituales” manchas en la contaminación del mar es más importante que de los grandes derrames causados por naufragios catastróficos tipo del petrolero Érica acon-

tecido en diciembre de 1999 cerca de las costas francesas o del Prestige frente a las costas Gallegas en octubre de 2002 aunque no tengan un impacto tan definido. La distribución probabilística de derrames pequeños y grandes está asociada con la ley de Zipf, es decir, tanto a escala temporal y espacial, la masa total de pequeños y frecuentes derrames es mucho mayor y su distribución es hiperbólica (Platonov, 2002).

### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo está basado en datos e imágenes obtenidos mediante los proyectos *Clean Seas* (ENVA4-CT96-0334), ERS-1/2 SAR *Exploitation Study in Catalonia* y *Oil Watch* de la Unión Europea, también en datos meteorológicos del Servei Meteorologic de la Generalitat de Catalunya. Agradecemos al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte de España (SB2000-0076) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (FTN-2001-2220 ) por su ayuda financiera.

### REFERENCIAS

- Arranz, J.L.C. (1998) Problemática Medio Ambiental de las Áreas Costeras de Catalunya. Retos para la Gestión Integral e Integrada del Litoral Catalán. Memorias de "Litoral 98", 14-17 de Septiembre de 1998. Barcelona.
- ESA, 1992. ERS-1 User Handbook. Proud, L., and Battrick, B. (Eds). Noordwijk.
- Gade, M. Alpers, W., Huhnerfuss, H., Masuco, H., Kobayashi, T., 1998. Impaging of biogenic and anthropogenic ocean surface films by the multifrequency / multipolarization SIR-C/X-SAR. *Journal of Geophysical Research*. Vol, 103, N0, C9, pp. 18851 - 18866.
- Gade, M., Alper, W., 1999. Using ERS-2 SAR images for routine observation of marine pollution in European coastal waters. *The Science of the Total Environment* Vol. 237/238 , pp. 441-448.
- Gonzales, E.P., Carbajosa, J.S., de CETEMAR, Barcelona, Spain; McIntyre, N., Lankester, T. de EOS, UK; Febre, A., Ravailleau, S., de CEDRE, France; Leca, J. De FRESTI, Portugal; Manzella, G.M.R., Ferretti de ENEA, Italy (consortium partners) and the European Commission (EC), 1999. Oil Watch Project Final Report. "Oil spill detection and monitoring in the European Union's Mediterranean and South-West Atlantic coastal areas", <http://oilwatch.eos.co.uk/project.htm>
- Jolly, G. W., A. Mangin, F. Cauneau, M. Calatuyud, V. Barale, H. M. Snaith, O.Rud, M. Ishii, M. Gade, J. M, Redondo and A. Platonov, 2000. The Clean Seas Project (ENV4-CT96-0334) FinalReport<http://www.satobsys.co.uk/CSeas/report.html> DG XII/D of the EU

- Commission under contract N° ENV4-CT96-0334. Brussels, pp. 1 -75.
- Johannessen; J.A., Digranes, G., Espedal, H., Johannessen, O.M., Samuel, P., Browne, D., Vachon, P., 1994. SAR ocean feature catalogue. ESA Publications Division. Noordwijk.
- Ministerio de Medio Ambiente, 1999. El Medio Ambiente Marino. Centro de Publicaciones, Secretaría General Técnica, España.
- Martínez Benjamin J.J., 1999. Sistemes Espacials i Percepció Remota. Centre de Publicacions del Campus Nord, UPC, Barcelona, España..
- Platónov, A.K., 2002. Aplicación de imágenes de satélite SAR en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo Noroccidental.<http://www.tdcat.cesca.es/TDCat-0905102-135541/>. Catálogo TDC.
- Redondo, J.M., Platonov, A.K., 2001. Aplicación de las imágenes SAR en el estudio de la dinámica de las aguas y de la polución del Mar Mediterráneo cerca de Barcelona. Ingeniería del Agua. Vol. 8, N° 1, pp. 15-23.
- Terrés, J.Z., Arias, A.L., 2000. La contaminació des dels vaixells: realitat i solucions. Actes de les Jornades "Qui embruta el mar?". Museo Marítim, Barcelona. pp.7-32.
- Vladimirov, A.M., Lyakhin, Y.I, Matveev, L.T., Orlov, V.G., 1991. Protección de Medio Ambiente. Editora Hidrometeoizdat, Leningrado, URSS. (en ruso, "Okhrana okrujayushey sredi").