

4. RESULTADOS

4.1 Análisis estadístico de las manchas y estelas de crudo detectadas en el MN durante el periodo 1996 - 1998

4.1.1. Derrames de crudo detectados en tres proyectos *Clean Seas*, *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* y *OILWATCH*

Los derrames de crudo en alta mar se detectan visualmente en las imágenes del SAR como manchas oscuras debido a la disminución de rugosidad de la superficie marina en pequeña escala (ver capítulos Introducción (1.1) y Radares de Apertura Sintética (2.3)). Frecuentemente estas manchas tienen una forma típica de estela, que a veces es transformada debido a los procesos dinámicos marinos. Los derrames se manifiestan en la superficie del mar como unos objetos artificiales no asociados al resto de la imagen, hecho que facilita su detección visual subjetiva mediante un técnico con experiencia.

Se presentan los resultados del análisis de 311 imágenes SAR generalmente de una superficie de

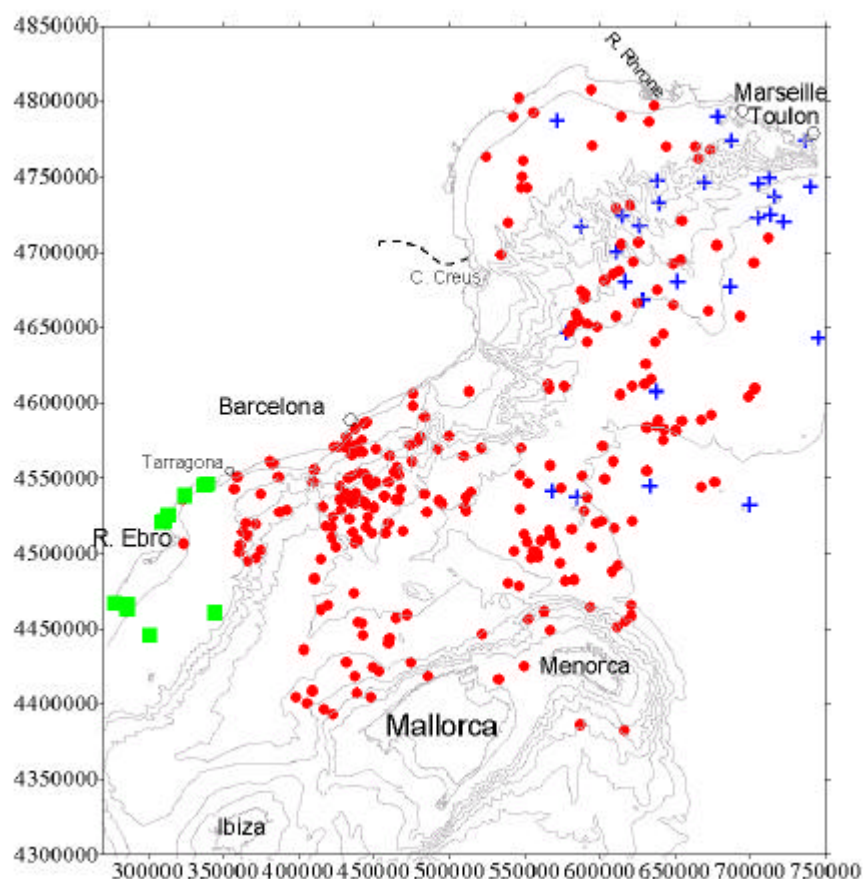


Figura 4.1.1. Manchas, estelas y penachos de aguas residuales detectados mediante imágenes SAR obtenidas bajo los proyectos *Clean Seas* (círculos), *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* (cuadrados) y *OILWATCH* (cruces).

10^4 Km^2 cada de una ($100\text{Km} \times 100\text{Km}$) correspondientes a 105 fechas distintas realizando entre 1 y 5 imágenes SAR cada día que pasaba el satélite. Dichas imágenes han sido obtenidas generalmente con una periodicidad de 35 días en las distintas zonas del área del Mediterráneo Noroccidental descritas en (3.1 – 3.2), durante los años 1996 - 1998 en el ámbito de los proyectos *Clean Seas*, *ERS-1/2 SAR*

Exploitation Study in Catalonia y OILWATCH. En la figura 4.1.1 se ve la distribución espacial de las manchas de petróleo detectadas en la zona del estudio.

Para realizar el presente análisis fueron utilizadas 22 posiciones o zonas de observación fijas (recuadros indicados en la Figura 3.2) de recepción de imágenes SAR en un dominio de $1^0 \times 1^0$ (áreas de cobertura de los satélites ERS-1/2 de la ESA según se muestra en la figura 3.1 con los índices 1,2) y en un dominio de 300×300 Km (área de cobertura del satélite canadiense RADARSAT, figura 3.1, índice 3) de la zona marítima comprendida entre Delta del Ebro, Barcelona, Cabo de Creus, Golfo de León, Marsella e Islas Baleares.

En total fueron detectadas 293 manchas (figura 4.1.2), estelas de crudo en mar abierto y penachos de aguas residuales cerca de las costas complementando los datos parciales anteriormente publicados (Redondo y Platonov, 2001).

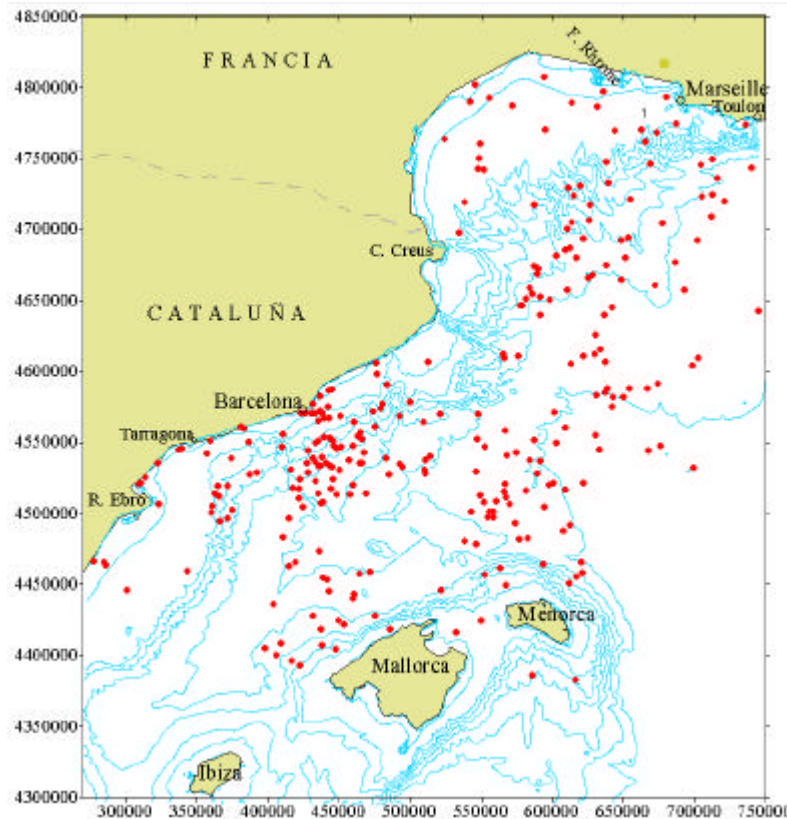


Figura 4.1.2. Todas las manchas, estelas y penachos de aguas residuales detectados mediante imágenes SAR obtenidas mediante los tres proyectos, durante los años 1996-1998 en el Mediterráneo Noroccidental sin especificar el área o la masa de cada una.

De estos 293 derrames detectados 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 se coincidían con los del proyecto *Clean Seas* y fueron excluidos) y el resto (253 derrames) al proyecto *Clean Seas*.

Fueron calculadas algunas características geométricas y físicas de las manchas tales como: el área (Figura 4.1.3) 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 Km^2 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/m^3 que nos dio $0.267 \text{ Tm} / \text{Km}^2$, (ver sección 2.1.4). El área total de todos vertidos de dicho período es de 1521 Km^2 y la masa total bajo dichas condiciones es de 407 Tm. El área y la masa promedias de conjunto de manchas son 5.28 Km^2 y 1.41 Tm.

Es interesante resaltar que la mayoría de los derrames se detectó en las imágenes de orbitas 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 está relacionada con la hora habitual del paso de satélites a las 10 h 30 m UTC sobre el área del MN en su orbita 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 esto se detectan con facilidad mediante imágenes SAR. En su orbita ascendente el satélite sobrevuela la región estudiada a las 21h 58min UTC y el número de las manchas detectadas disminuye bastante.

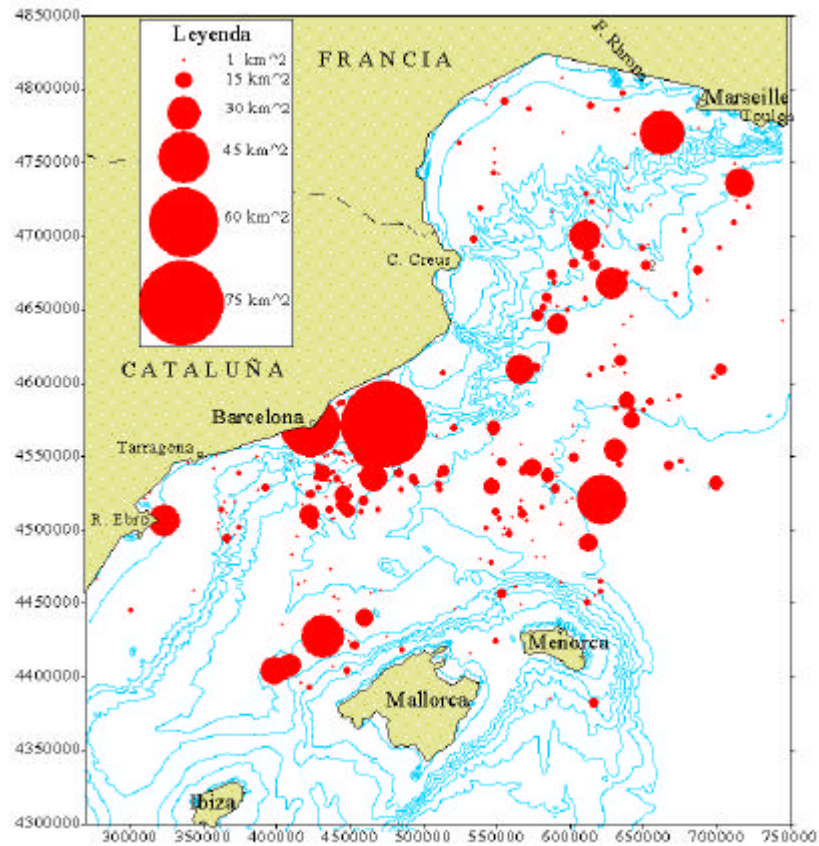


Figura 4.1.3. Las áreas de las manchas, estelas y penachos de aguas residuales mayores de 1 Km² detectados durante el período 1996-1998 en el Mediterráneo Noroccidental en el ámbito de tres proyectos.

4.1.2. Número normalizado de derrames detectados

Con los datos de las figuras 3.4 y 4.1.2 (números de recuadros superpuestos y posiciones de los derrames detectados) fue elaborado el esquema general (figura 4.1.4) donde 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.

Para cada zona especificada de la figura 4.1.4 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 (número verde de la figura 4.1.4) por el número total de las observaciones/imágenes (número negro) realizadas sobre esta área. Después toda el área de estudio fue dividida en cuadrados de 50x50 Km y en

sus centros fueron colocados correspondientemente los valores de dicha fracción, que indica la probabilidad de detección.

En la figura 4.1.5 se muestran los resultados generalizados de la interpolación espacial de los valores de probabilidad donde se puede observar como las áreas más oscuras indican que la probabilidad de la ocurrencia de las manchas es mayor.

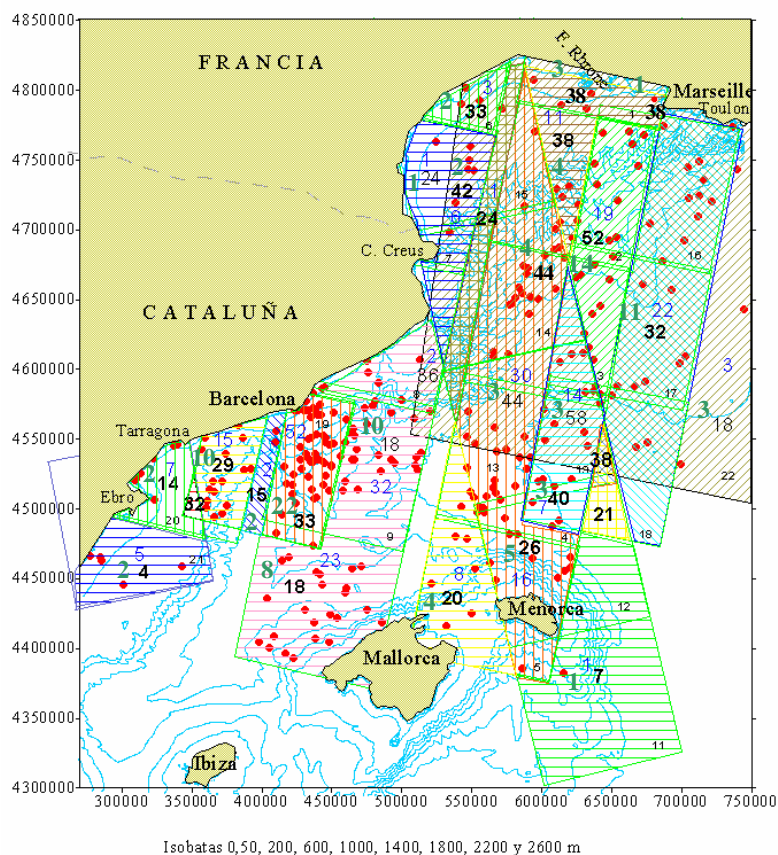


Figura 4.1.4. Esquema del número de los derrames detectados y de la superposición de las imágenes. Número negro – número del recuadro, número “en negrita” – número de las observaciones o imágenes realizadas sobre una área señalada N_i , número verde – número de las imágenes en las cuales fueron detectados los derrames, número azul – número total de los derrames detectados en esa zona N .

En la figura 4.1.5 se muestran los resultados generalizados de la interpolación espacial de los valores de probabilidad donde se puede observar como las áreas más oscuras indican que la probabilidad de la ocurrencia de las manchas es mayor.

La zona de mayor probabilidad (0.7) de la 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 la detección de las manchas es menos probable (probabilidad de 0.34). En la zona al Norte 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 dio un número de 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 evaluar estadísticamente con confianza, por 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.

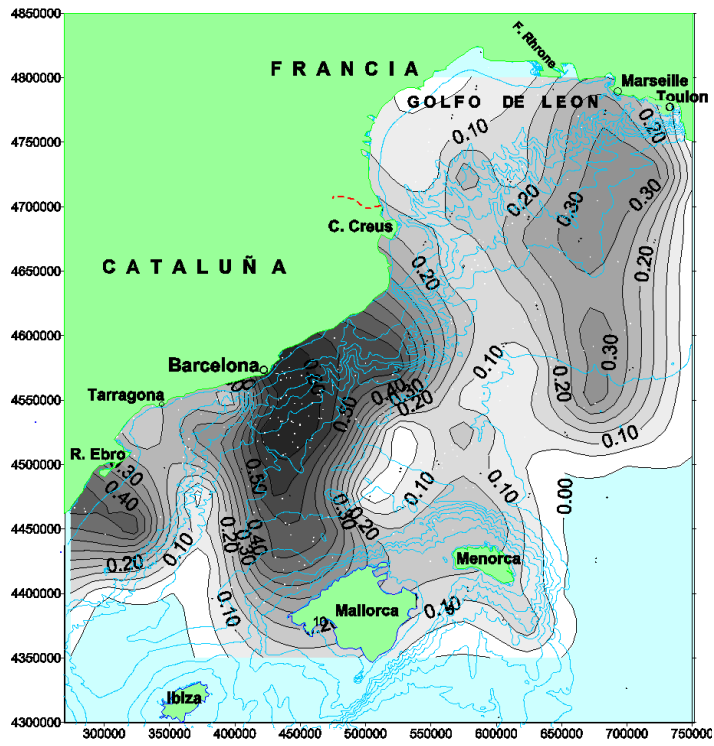


Figura 4.1.5. Probabilidad P de detección de las manchas en el período de 1996-1998 en el área de estudio.

Figura 4.1.5. Probabilidad P de detección de las manchas de petróleo en el área de estudio en el período de 1996 a 1998.

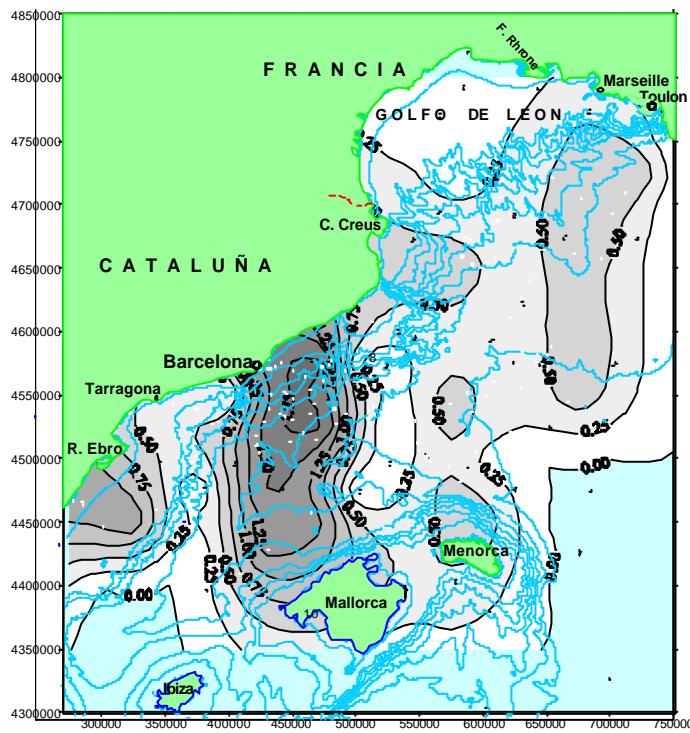


Figura 4.1.6. Número normalizado de casos de detección de las manchas de petróleo en el área de estudio en el período de 1996 a 1998.

El número normalizado N_N de manchas o número promedio de manchas detectada por

observación a escala de 50 Km 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 del SAR N_i realizada sobre esta misma zonas a base de los datos de la figura 4.1.4 $N_N = N / N_i$. Después se realizó la interpolación de los valores N_N obtenidos y colocados en los centros de las áreas señaladas.

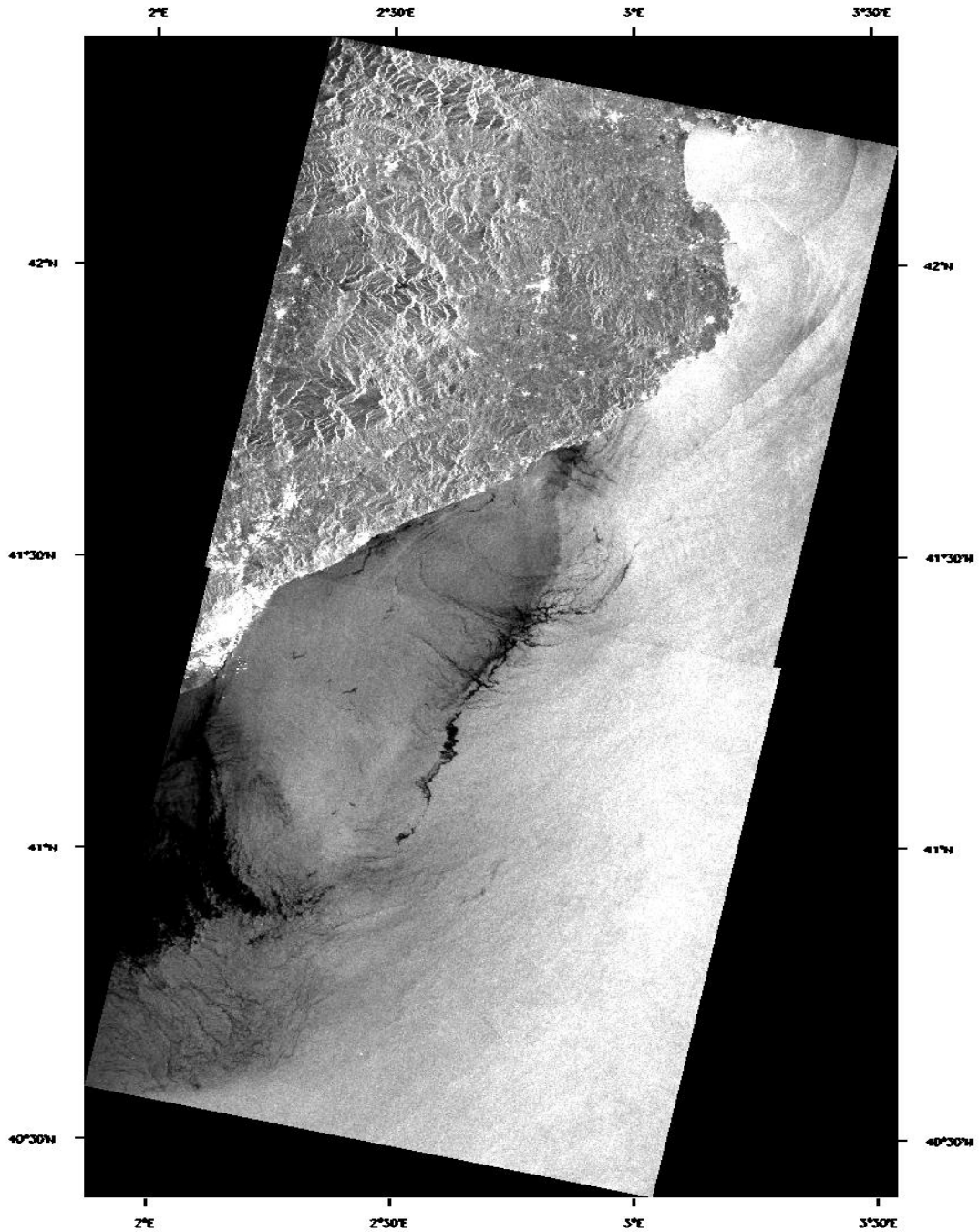


Figura 4.1.7. Dos imágenes SAR superpuestas. Estela de crudo detectada frente a Barcelona el día 15.06.97

En la figura 4.1.6 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 varía entre 0.5 y 0.7 aproximadamente.

En el apartado 4.1.4 se realiza un estudio comparativo de las cercanías de los puertos de Marseille y Barcelona.

4.1.3. Las estelas de crudo en alta mar

Si sólo consideramos las estelas de productos petroquímicos procedentes de los buques en alta mar en dicho período, podemos decir que fueron detectados 101 casos de “oil spills” típicos. El resto de las manchas (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 Km 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 “oil spill” típico en el área del Mediterráneo Noroccidental.

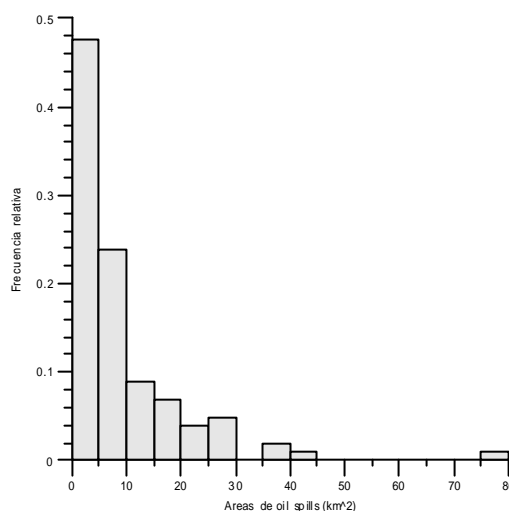
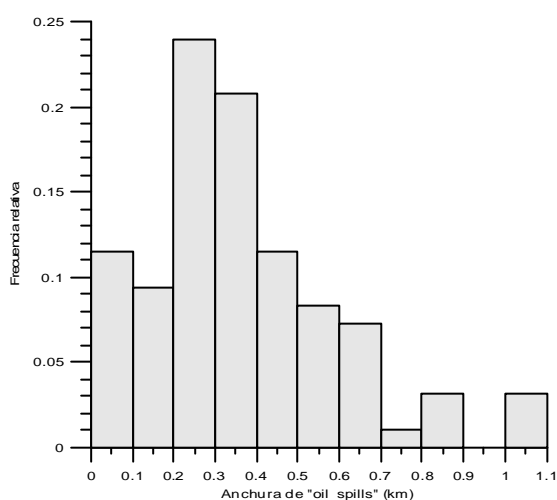


Figura 4.1.8. Frecuencia relativa de anchura de las estelas detectadas durante los años de 1996 a 1998

Figura 4.1.9. Frecuencia relativa de áreas de las estelas detectadas en los años de 1996 a 1998

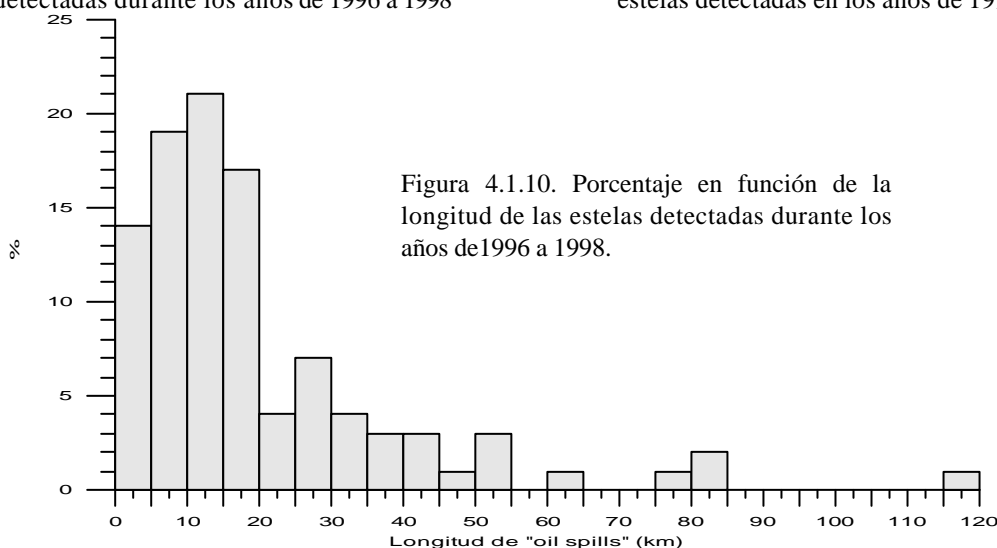


Figura 4.1.10. Porcentaje en función de la longitud de las estelas detectadas durante los años de 1996 a 1998.

En principio dichos derrames de crudo dependen tanto de las características de los buques 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 Km² y la masa – 246Tm. No obstante los datos promedios no se pueden generalizar siempre de forma Gausiana ya que los procesos son no-lineales. Un ejemplo de ello es la estela detectada frente a Barcelona el día 15.06.97 que poseía una longitud total de 120 Km aproximadamente (contando con todas las ramificaciones) tal como se ve en la figura 4.1.7.

Los gráficos de las figuras 4.1.8 - 4.1.11 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 (Figura 4.1.11). 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, esta se dispersaría bastante (Figura 4.1.12).

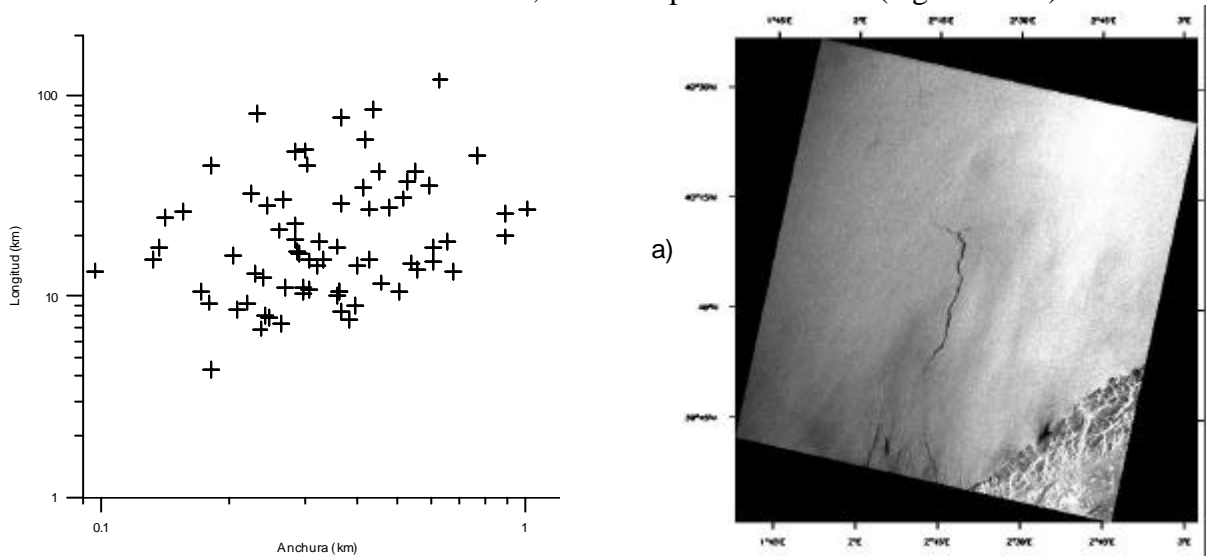


Figura 4.1.11 Relación entre longitud y anchura de las estelas.

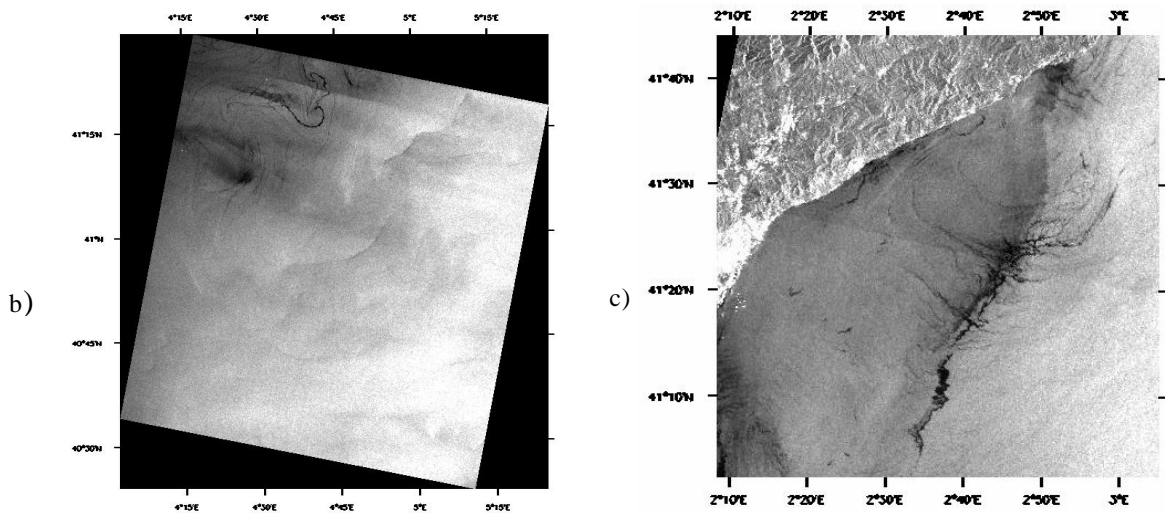


Figura 4.1.12. Ejemplos de diferentes estelas detectadas: a) estela que lleva algunos días en el mar, 05.07.98. b) estela en una zona dinámicamente activa, día 28.02.98, c) estela diluida (una parte de la imagen), día 15.06.97.

En la figura 4.1.12 se muestran los ejemplos de diferentes estelas cuya apariencia es cada vez más compleja. La forma geométrica de las 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. Estos aspectos se discutirán en los apartados 4.2 y 4.3.

4.1.4. 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 fue detectado 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 probabilidad de la detección de las manchas en los años de 1996 a 1998 cerca de Marseille y de Barcelona se muestra en la figura 4.1.13. 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 aumento del nivel de la contaminación y la probabilidad máxima de la detección de las manchas tiene lugar en la distancia de 40 a 60 Km de Barcelona. En cuanto a los derrames detectados en las proximidades de la costa de Marseille, la mayor probabilidad se nota a una distancia de 130-140 Km de la costa, lo que evidencia la importancia de un control medioambiental.

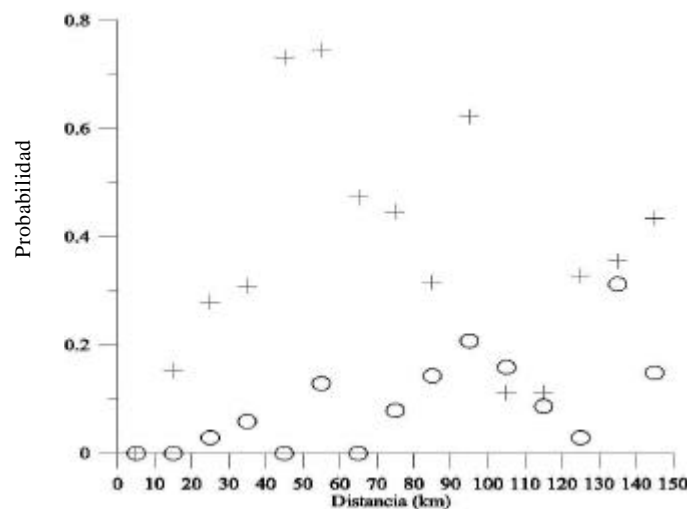


Figura 4.1.13. Probabilidad de la detección de derrames en las rutas marítimas los puertos de Barcelona (+) y de Marseille (O) durante los años de 1996 a 1998 sobre la base de los resultados del proyecto *Clean Seas*.

En la figura 4.1.14 se muestra el área imaginaria equivalente a todos los derrames de productos petroquímicos estimada para todo el período 1996-1998 (a escala real) en el Mediterráneo Noroccidental. 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 periodo de 35 días). El diámetro de esta área estimada es de 146 Km con un peso de 4.477 Tm (multiplicando el peso real total de 407Tm de 291 manchas, estelas y penachos detectados en tres proyectos en el período de 2 años de observación con 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: $35/3 \approx 11$;

407 Tm·11=4477 Tm) y su área total es de 16780 Km² aproximadamente suponiendo (ver apartado 4.1.1) que un kilómetro cuadrado ocupa la masa de 0.2675 Tm de crudo (Figura 4.1.14). En el apartado 4.2.4 presentaremos una discusión más amplia sobre el tiempo de persistencia de los vertidos en el mar.

4.1.5 Penachos de aguas contaminadas en el litoral del Mediterráneo Noroccidental



Figura 4.1.14. Área estimada de todas las manchas que pudieran aparecer en el período 1996-1998 según la estimación realizada.

Los penachos de aguas residuales procedentes de los ríos y fuentes costeras de contaminación también se observan frecuentemente mediante imágenes del SAR en las proximidades de las costas del Mediterráneo Noroccidental. En el período entre 1996 y 1998 fueron detectados 42 penachos. Los fragmentos de imágenes del SAR con los penachos detectados se muestran en el Anexo 1. 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 Daurada – 6. El mayor número de penachos (a saber 24, lo que corresponde a un 57% del número total de los penachos detectados en toda área de estudio), generalmente procedentes del Río Llobregat, fue detectado cerca de Barcelona (Figura 4.1.15) mediante 31 imagen del SAR.

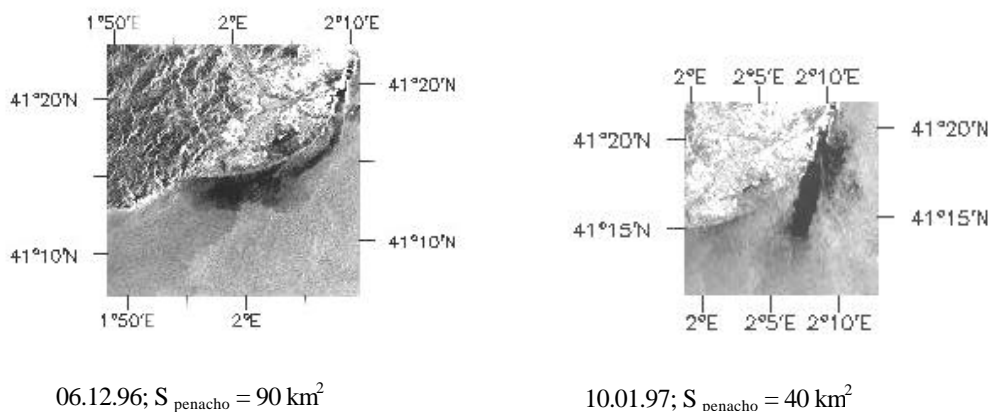


Figura 4.1.15. Penachos típicos en las proximidades de Barcelona

Casi todos los penachos detectados cerca de Barcelona se desplazan hacia Oeste-Suroeste debido a la influencia de la corriente dominante (Liguro-Provenzal). El área total de los penachos detectados en las proximidades de Barcelona fue de 589.7 Km², el área media de un penacho fue de 24.5 Km² y el área máxima del mayor penacho detectado el día 06.12.96 fue 90 KM². La figura 4.1.16 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.

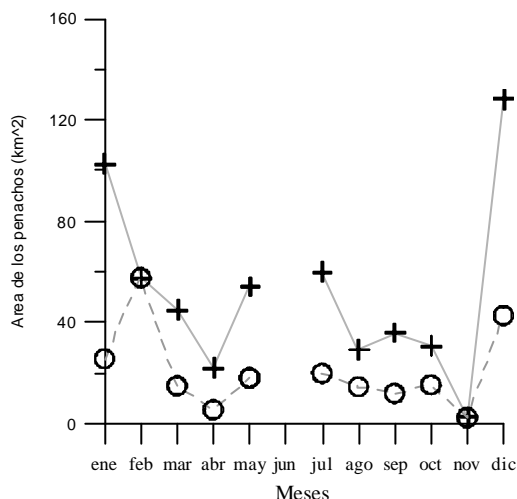


Figura 4.1.16. Áreas de penachos detectados cerca de Barcelona en período comprendido entre 06.12.96 y 18.10.98. Cruces – área total de dos años, círculos – área media mensual.

La escala temporal de análisis estadístico (dos años) no nos permite conclusiones generales fiables respecto a la ocurrencia de los penachos, tampoco de sus características físicas, pero se ve que el área total y media mensual (figura 4.1.15) 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. A pesar de que los mayores penachos están asociados con aguaceros, desbordamientos del sistema de saneamiento urbano y los caudales de ríos considerables, la figura 4.1.17 muestra que en los meses de menor precipitación se observa un área total mayor de penachos detectado. La explicación de ésta

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, el hecho que perjudica la detección de los derrames de aguas contaminadas en la superficie marina y de otro lado aumenta la intensidad de los procesos dinámicos asociados

con mezcla y dilución de contaminantes en aguas costeras. La figura 4.1.18 tampoco nos da una clara relación entre las áreas de penachos detectados y precipitación mensual.

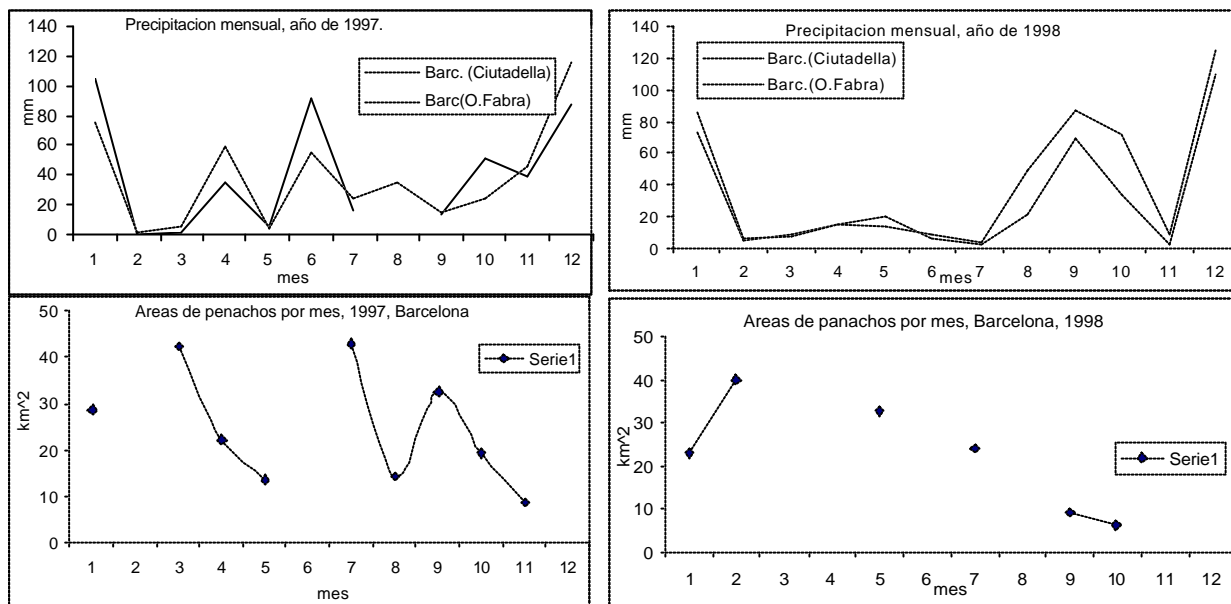


Figura 4.1.17. Precipitación mensual obtenida mediante las observaciones realizadas por estaciones meteorológicas de Ciutadella y O. Fabra (ambas de Barcelona) en los años 1997 y 1998 (arriba) el área total de los penachos detectados en cada mes del mismo período cerca de Barcelona (abajo).

Como muestra la figura 4.1.19, el número mayor de los penachos detectados en el litoral de Cataluña coincide con meses de menor caudal en 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 hidrometeorológicas 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. La velocidad media del viento, calculada a partir de las observaciones obtenidas de las estaciones meteorológicas del litoral de Cataluña en Ciutadella (Barcelona), Roses, Castellnou de Seana del período 1996-1998, y el número total mensual de los penachos detectados durante el mismo período no tienen una relación clara entre sí, según se muestra en la figura 4.1.20.

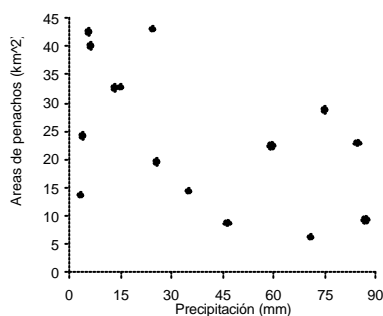


Figura 4.1.18. Dispersión de los valores pares de precipitación media mensual y las áreas medias mensuales de penachos cerca de Barcelona, años 1997 y 1998.

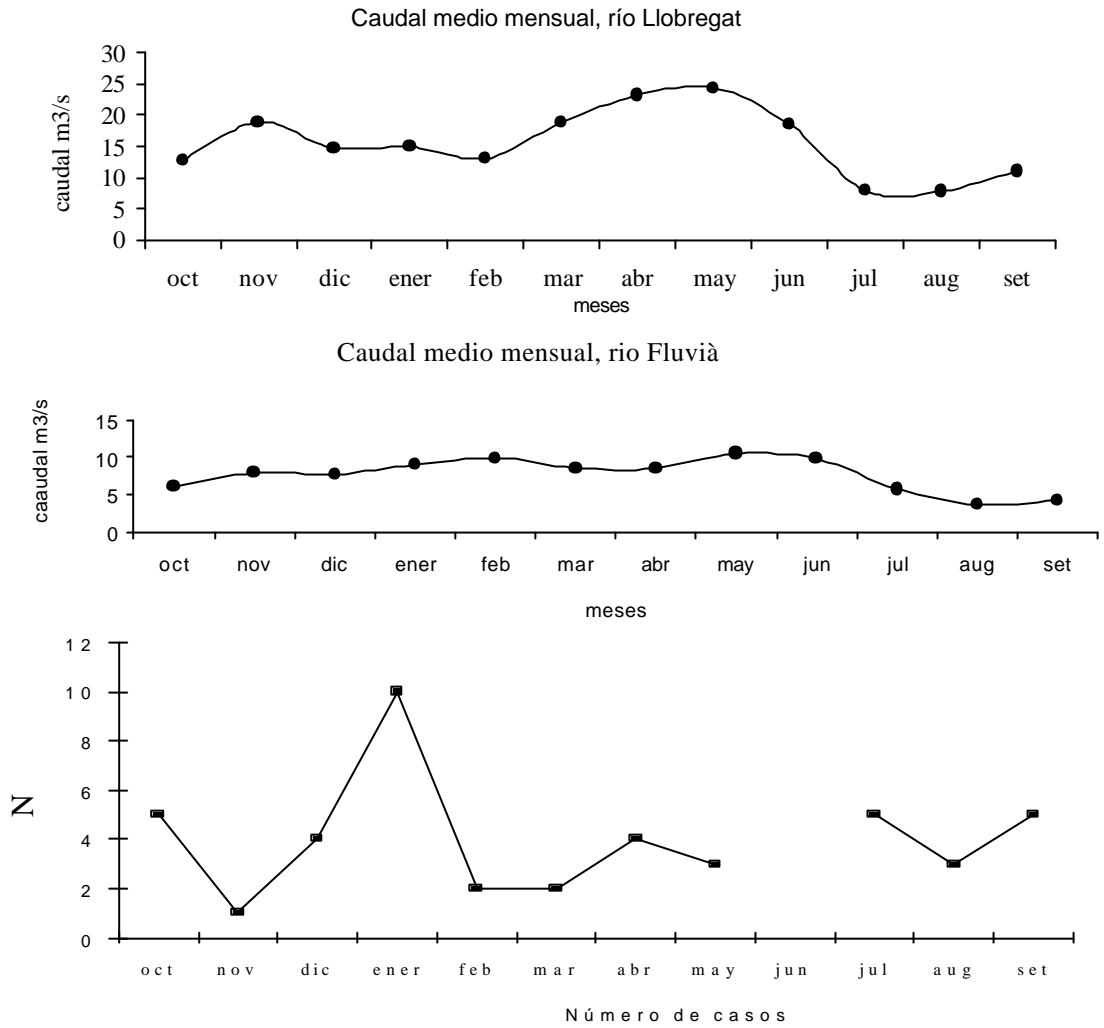


Figura 4.1.19. Caudales medio mensuales (1996-1998) de los ríos Llobregat y Fluvià y número N de los penachos detectados en el litoral de Cataluña (abajo) en los años de 1996 a 1998.

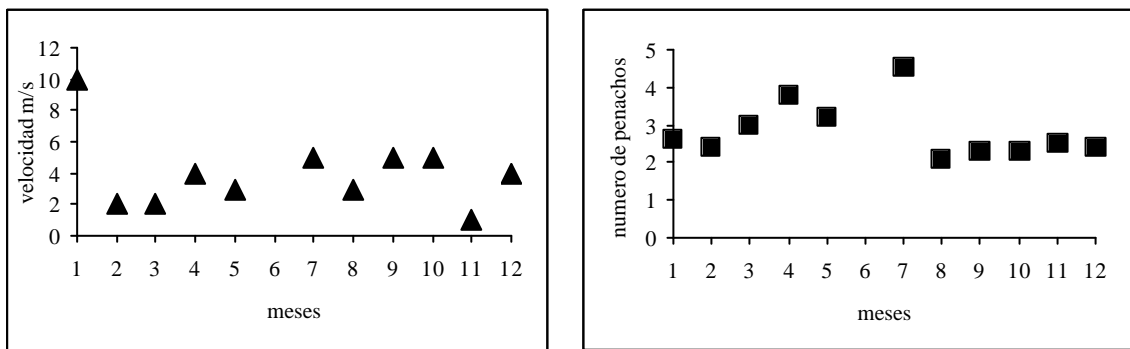


Figura 4.1.20. a) Velocidad media mensual del viento calculada mediante los datos de tres estaciones meteorológicas costeras durante el período de 1996 a 1998. b) Número medio mensual de los penachos detectados en el litoral de Cataluña.

Regresar al Índice

Seguir