

6. CONCLUSIÓN Y FUTUROS TRABAJOS

6.1. CONCLUSIONES Y REALIZACIONES

A pesar de que la frecuencia de captura de imágenes SAR ha sido bastante baja debido hasta la fecha a cuestiones técnicas (una imagen cada 35 días con los satélites ERS-1/2), las observaciones durante los años 1996 - 1998 han permitido obtener una visión general pero estadísticamente justificada sobre el estado del medio ambiente marino en el Mediterráneo Noroccidental, así como de otras zonas marítimas Europeas investigando tanto la polución litoral como en alta mar. También fue posible obtener datos cuantitativos sobre la compleja dinámica superficial de la zona estudiada, que puede ser útil para cuantificar la capacidad de difusión superficial del océano. En el futuro, aunque se mejorará muy notablemente con el nuevo satélite de la ESA ENVISAT, existirá una mayor posibilidad de aprovechar las ventajas de las imágenes SAR en estudios más fructíferos de la dinámica de la zona y en el desarrollo de sistemas automáticos de detección de las manchas en alta mar y de los buques que infringen las leyes establecidas, dando lugar a los castigos oportunos.

Contaminación marina

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 generales sobre el estado de la contaminación del área del Mediterráneo Noroccidental en los años 1996 - 1998:

En alta mar se observan claramente las rutas marítimas habituales de los petroleros debido a las manchas y estelas de petróleo, aceites y/o sustancias petroquímicas parecidas por sus propiedades tensioactivas que aparecen como vertidos oscuros en las imágenes del SAR. En las rutas marítimas cercanas a Marseille fueron detectados menos casos de derrames que cerca de Barcelona. Esto parece ser el resultado de que en las aguas españolas no existe un control tan riguroso de la contaminación marina, hecho que permite a los capitanes de los buques efectuar los deslastres y otras operaciones técnicas en mar abierto sin ninguna precaución. El área total de todos los vertidos detectados en dicho período es de 1.521 Km² y la masa total bajo la condición que una masa de crudo de 0.267 Tm ocupa un kilómetro cuadrado de la superficie marina, es de 407 Tm.

Una zona imaginaria equivalente a todos los derrames de productos petroquímicos estimada para todo el período 1996-1998 en el Mediterráneo Noroccidental ocupa un área de 16.780 Km². 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. Esto indica claramente que la contribución de estos pequeños derrames no es despreciable.

Los derrames pequeños “habituales” en alta mar no tienen menos importancia que la de los grandes accidentes, ya que su masa total vertida es incluso bastante mayor debido a la gran frecuencia de este tipo de contaminación marina ilegal desde los buques. La tabla 4.2.9 muestra que la masa total anual estimada de todas las manchas pequeñas en un año en aguas costeras de Europa es mucho mayor que la de los derrames de crudo provocados por grandes naufragios de petroleros tipo Erika (18.000 Tm), caso ocurrido en el 1999.

La distribución estadística de pequeños y grandes derrames de crudo en la superficie del mar se conforma a la ley de Zipf, es decir, el número de derrames depende de su rango. En efecto, podemos concluir que la mayor importancia en la contaminación del mar manifestada por su masa total tienen los pequeños habituales derrames incluso de tamaño de unos cuantos metros cuadrados. También podemos subrayar el papel de los derrames “invisibles” de tamaño medio que no entran en la estadística oficial y no llaman la atención de los medios de comunicación pública (un 36% de masa total de crudo o productos químicos asociados que posiblemente se vierten en el mar).

La contaminación del litoral se observa prácticamente en todo el período de observación en forma de penachos de aguas residuales generalmente procedentes de los ríos principales de la región. A veces también aparecen pequeños penachos desde las desembocaduras de los ríos Tordera y Besós y desde algunas ciudades portuarias e industriales 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 Costa Dourada – 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. 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 del mayor penacho detectado el día 6 de Diciembre de 1996 fue de 90 Km².

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 puede deberse a las condiciones meteorológicas que acompañan normalmente a las lluvias y a los frentes atmosféricos, es decir a los fuertes vientos y al oleaje, hecho que perjudica 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 solo 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.

Según los resultados del proyecto *Clean Seas* y nuestros estudios no se puede decir con certeza absoluta que el área del Mediterráneo Noroccidental está más contaminada que la del Mar del Norte y del Mar Báltico porque el estado de la superficie marina durante el tiempo de la obtención de las imágenes del SAR en estas tres zonas es distinto, lo que no permite hacer conclusiones comparativas exactas sin realizar un análisis más complejo de las condiciones hidrometeorológicas *in situ* en todas áreas.

Durante el trabajo presente fue elaborado un fichero que contiene los datos de más de 300 derrames y penachos detectados en los proyectos *Clean Seas*, *ERS-1/2 SAR Exploitation Study in Catalonia* y *Oil Watch*. El banco posee los datos del tiempo de detección de derrames, sus coordenadas geográficas, características topológicas y físicas, y puede ser utilizado en futuros estudios asociados, o como ejemplos para la validación de modelos numéricos.

Los medios modernos de análisis de imágenes aplicados, incluyendo el análisis multifractal, permiten distinguir los derrames detectados de carácter natural o artificial y junto con otras aplicaciones analíticas propuestas y las imágenes del SAR obtenidas de forma periódica, servir

como una herramienta práctica para las necesidades actuales de monitorización y seguimiento de los derrames en el mar y la detección de las fuentes de contaminación *in situ* tanto en alta mar como cerca de la costa.

Dinámica

La compleja dinámica regional de las aguas superficiales en el Mediterráneo Noroccidental se manifiesta en las imágenes SAR por medio de múltiples estructuras superficiales de origen natural que indican la presencia de vórtices y otras estructuras dinámicas en la superficie del mar cerca de Barcelona. El área con mayor concentración de estructuras dinámicas asociadas a los vórtices y a las cizalladuras, se encuentra en la zona marina al Este de Barcelona cerca del cañón submarino de Blanes. Otras áreas de relativamente alta frecuencia de detección de estructuras dinámicas están situadas cerca de las Islas Baleares y en el litoral de Tarragona.

La mayoría de los vórtices detectados tienen forma elíptica y ocupan un área menor de 100Km². Se observa una tendencia a la disminución de los tamaños de los remolinos desde el Nordeste hacia el Sudoeste, hecho que puede ser asociado a las inestabilidades generadas por los cañones submarinos, pero también al proceso de interacción entre la corriente Liguro-Provenzal y la turbulencia local generada por la plataforma costera.

La distribución espacial de los vórtices respecto a los ejes "*thalwegs*" de los cañones submarinos muestra una considerable dependencia entre los remolinos que se encuentran predominantemente al lado izquierdo de los ejes de cañones, vistos desde alta mar hacia la costa. Este fenómeno se considera como un resultado de los procesos de turbulencia bidimensional debido a la fuerte interacción entre la corriente costera predominante hacia el sudoeste y la influencia de la batimetría de cañones submarinos en la conservación de la vorticidad potencial.

El posible acoplamiento entre escalas asociadas a la frecuencia inercial, la marea (aunque pequeña) y el radio de deformación de Rossby dan lugar a flujos dominados por vórtices de diferentes escalas y nuestras observaciones son consistentes a los estudios de Rippeth, et al., (2002). Es interesante constatar que la dinámica de los vórtices superficiales suele estar en oposición de fase con la circulación local debajo de la termoclina.

6.2. FUTUROS TRABAJOS

Debido a la gran cantidad de información no fue posible presentar en este trabajo todos los resultados del análisis de la dinámica de la zona incluyendo el Golfo de León y las zonas de alta mar al Sur de la costa de Francia y al Norte de las Islas Baleares. El análisis de tal carácter aún con aplicación de los datos de las observaciones hidrográficas históricas *in situ* en toda la zona del Mediterráneo Noroccidental resta por hacer en un futuro. La realización del seguimiento de la dinámica marina superficial a mesoescala y el estudio estadístico de inestabilidades típicas permitirán calibrar modelos matemáticos de simulación de corrientes locales, que son una base fundamental para el desarrollo de previsiones, por ejemplo, de la velocidad y la dirección de deriva de las manchas de petróleo y de la contaminación por aguas fluviales.

Sería interesante y muy útil en sentido práctico y aplicado a las necesidades actuales de la sociedad implantar un Sistema de Información Georeferenciada SIG en base a los resultados de

nuestros estudios de contaminación y de la dinámica de aguas en el Mediterráneo Noroccidental incorporando los datos de estudios oceanográficos históricos de la zona. Tal sistema podría servir como una base preliminar de un Centro Virtual de Información Costera y del Mar de Cataluña, formar una parte de los medios informativos de la Secretaría de Medio Ambiente de Cataluña y servir para aplicaciones prácticas y académicas. También junto con una estructura adecuada ser una base de un Sistema Automático de Vigilancia de Contaminantes en alta mar y en el litoral.

El análisis multifractal permite distinguir distintos tipos de fenómenos hidrometeorológicos que se detectan en la superficie del mar. Mejorar las posibilidades matemáticas del software ImaCalc que fue utilizado en el presente trabajo y estudiar con más precisión y profundidad las posibilidades del método del análisis multifractal en fines oceanográficos es también una tarea para el futuro.

[Regresar al Índice](#)[Seguir](#)