

CONTENIDOS

Resumen

Índice de Figuras

Índice de Tablas

Capítulo I. Introducción y Objetivos **2**

- | | | |
|----|--|----|
| 1. | Antecedentes y Motivación | 3 |
| 2. | Objetivos y enfoque del trabajo de investigación | 5 |
| 3. | Material y Métodos | 9 |
| 4. | Organización del documento | 11 |

Capítulo II. La contaminación marina por hidrocarburos **14**

- | | | |
|-----|--|----|
| 1. | Aspectos generales de la contaminación marina | 15 |
| 1.1 | Tipos de contaminantes | 15 |
| 1.2 | Fuentes de contaminación por hidrocarburos | 17 |
| 2. | La producción y el transporte marítimo de hidrocarburos. | 26 |
| 2.1 | Consumo y transporte energético mundial | 26 |
| 2.2 | Organización del sector del transporte marítimo | 33 |
| 2.3 | Las Normativas y los Grandes incidentes marítimos | 37 |
| 2.4 | Conclusiones: evaluación de las actuaciones | 42 |
| 3. | Consecuencias socio-económicas y medioambientales | 45 |
| 3.1 | Afección al medio receptor | 46 |
| 3.2 | Evaluación de la Toxicidad | 51 |
| 3.3 | Consecuencias socio-económicas | 55 |
| 4. | Herramientas de Gestión en una crisis medioambiental | 57 |
| 4.1 | Marco de actuación de las crisis de contaminación marina | 57 |
| 4.2 | Seguimiento y previsión del transporte de contaminantes | 64 |
| 4.3 | Sistemas observacionales y Oceanografía Operacional | 70 |
| 5. | Conclusiones y Referencias del Capítulo | 78 |

Capítulo III. Comportamiento de los hidrocarburos en el medio marino **84**

- | | | |
|-----|--|-----|
| 1. | Estado del Arte en la comprensión de los fenómenos | 86 |
| 1.1 | Introducción de la física y química del problema | 86 |
| 1.2 | Evolución y Estado actual del conocimiento | 87 |
| 1.3 | Requisitos del modelado y su aplicación operacional | 89 |
| 2. | Propiedades de los hidrocarburos | 90 |
| 2.1 | Composición y características del petróleo y refinados | 90 |
| 2.2 | Los procesos de refinado | 99 |
| 2.3 | Caracterización de las propiedades físicas | 103 |
| 3. | Procesos de transporte y difusión | 109 |
| 3.1 | Fundamento teórico del transporte de contaminantes | 109 |
| 3.2 | La circulación oceánica | 117 |
| 3.3 | Transporte ADVECTIVO horizontal | 121 |
| 3.4 | Transporte DIFUSIVO horizontal | 134 |

3.5	Transporte y mezcla vertical	156
3.6	Conclusiones sobre los procesos de transporte	170
4.	Procesos fisico-químicos de envejecimiento	173
4.1	Evaporación	175
4.2	Emulsionado <i>agua-en-aceite</i>	183
4.3	Procesos secundarios y a largo plazo	190
4.4	Evolución de las propiedades reológicas	192
5.	Interacción entre transporte y envejecimiento del contaminante	196
5.1	Transporte de un contaminante no-conservativo	196
5.2	Implementación al modelado	197
Capítulo IV. Implementación operacional del modelado numérico		200
1.	Consideraciones previas sobre el modelado	201
1.1	Enfoque del modelado según la escala de resolución	201
1.2	Datos disponibles para implementar en el modelado	202
2.	Modelado de los procesos fisico-químicos	206
2.1	Evaporación	206
2.2	Emulsionado	208
2.3	Acoplamiento de los modelos transporte – envejecimiento	210
2.4	Validación de las expresiones utilizadas	211
3.	Aproximación y modelado a escala local	217
3.1	El enfoque euleriano aplicado a escala local	218
3.2	Modelos y métodos numéricos utilizados	221
3.3	Ejemplos de aplicación a zonas portuarias	229
4.	Aproximación y modelado a escala regional	239
4.1	Aplicación del modelado lagrangiano	239
4.2	Modelos y métodos numéricos utilizados	248
4.3	Ejemplos de aplicación en el Mar Catalano-Balear	255
5.	Comentarios y Conclusiones	276
Capítulo V. Conclusiones y Futuras Líneas de Trabajo		280
1.	Conclusiones generales	281
1.1	Aspectos generales sobre la contaminación por hidrocarburos	281
1.2	Modelado de los procesos de envejecimiento	282
1.3	Modelado acoplado transporte-envejecimiento	283
2.	Futuras Líneas de trabajo	286
2.1	Sobre el modelado numérico	286
2.2	Sobre los estudios experimentales	288
Bibliografía y Referencias		290
	Bibliografía	291
	Otras Referencias	304
	Publicaciones derivadas de la Tesis	304
	Web-grafía	305

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Fuentes de hidrocarburos vertidos al medio marino.....	18
Figura 2.2 Fuentes naturales y derrames durante la Extracción, Transporte y Consumo en los EEUU y en el mundo (Walter et al, 2003).....	19
Figura 2.3. Observaciones de derrames frente el litoral de Barcelona.....	23
Figura 2.4 Numero de accidentes ocurridos anualmente con más de 700 ton vertidas ((ITOPF, 2003).....	24
Figura 2.5. Consumo energético mundial por capita, en toe (BP, 2003).....	27
Figura 2.6 Principales países exportadores e importadores de productos petrolíferos.....	30
Figura 2.7 Balance mundial del comercio de productos petrolíferos, en Mt (BP, 2003).....	31
Figura 2.8 Accidentes más importantes en las principales rutas marítimas (www.itopf.com).....	33
Figura 2.9 Fase evaporada, dispersada y superficial de un vertido marino de hidrocarburos.....	46
Figura 2.10 Estuario afectado por la marea negra del Prestige.....	49
Figura 2.11 Alteración del medio: las tareas de limpieza.....	50
Figura 2.12 Concentración en HAP del fuel del <i>Prestige</i>	54
Figura 2.13 Ejemplos de actuaciones en alta mar [Fuentes: AZTI y le Cedre].....	58
Figura 2.14 Esquema de la Coordinación entre el Plan Nacional de Contingencias por Contaminación marina y los Planes Territoriales.....	61
Figura 2.15. Evaluación del peligro de contaminación marina accidental (CAMCAT, 2003).....	63
Figura 2.16 Barcos de limpieza del fuel del <i>Prestige</i> (izq.) y avistamientos de manchas.....	65
Figura 2.17 Boyas de deriva: de viento (izq.) y utilizada durante el <i>Prestige</i>	66
Figura 2.18 Mapa de posiciones de una boya de deriva utilizada durante la crisis del <i>Prestige</i> (17/12/2002) [Fuente: Sasemar].....	66
Figura 2.19 Imagen SAR del vertido del <i>Prestige</i> (17/11/2002) [Fuente: ESA].....	67
Figura 2.20 Parte de localización y previsión de la deriva de las manchas del <i>Prestige</i>	68
Figura 2.21 Estructura de un sistema de previsión marina.....	69
Figura 2.22. Validación de las previsiones con imágenes radar [Fuentes: Météo-France y ESA] ..	70
Figura 2.23 Metareas MPERSS de responsabilidad de Météo-France.....	73
Figura 2.24 Distribución de la información y acceso al servidor LAS en la Distribución Datos Oceanográficos DODS.....	74
Figura 2.25 Esquema semanal de la operativa de asimilación datos (MFSTEP, 2003).....	75
Figura 3.1. Caracterización mediante GC-MS de un petróleo crudo fresco (a), ligeramente (b) y muy biodegradado (c) (según Warton, 1999).....	93
Figura 3.2. Familias de HAP no ramificados.....	97
Figura 3.3. Procesos de refinado y productos obtenidos (IFP, 2003).....	102
Figura 3.4. Caracterización de las corrientes de gran y meso-escala [OSPAR, 2000].....	120
Figura 3.5. Velocidad del viento y tensión generada sobre la superficie del mar.....	123
Figura 3.6. Perfil vertical de velocidades debidas al viento (a partir de Lehr et al., 2000).....	125
Figura 3.7. Perfil vertical de Ekman de velocidades horizontales debidas al viento.....	128
Figura 3.8. Trayectorias de una boya de deriva utilizada durante la crisis del <i>Prestige</i> [www.le- cedre.fr].....	132
Figura 3.9. Deriva superficial de las manchas (U _o) por acción combinada del viento y corrientes.....	134
Figura 3.10. Perfil de concentraciones C(x,y,t) en relación a la desviación estándar σ	136
Figura 3.11. Evolución de la concentración para M=500 kg y 1 ton.....	138
Figura 3.12. Esparcimiento y coalescencia de un líquido.....	139
Figura 3.13. Esparcimiento y balance de fuerzas horizontales entre dos líquidos.....	140
Figura 3.14. Evolución temporal del radio de una mancha circular según Fay.....	143
Figura 3.15. Fases de esparcimiento de una mancha circular según Fay.....	145
Figura 3.16. Avistamiento de manchas del <i>Prestige</i>	147
Figura 3.17. Circulación y formación de la celdas de Langmuir.....	148
Figura 3.18. Elongación de las manchas por el gradiente de velocidades debidas al viento.....	149
Figura 3.19. Llegada de <i>galletas</i> del fuel oil del <i>Prestige</i> en Santander.....	151
Figura 3.20. Esparcimiento según las fórmulas analíticas de difusión pura, según Fay y Elliott... ..	154
Figura 3.21. Elipse de elongación de una mancha según la dirección del viento.....	155
Figura 3.22. Proceso de intrusión y dispersión vertical.....	158
Figura 3.23. Velocidad de flotabilidad [m/s] según densidad y diámetro de partícula.....	167

Figura 3.24. Vertidos en profundidad: accidente del pozo Ixtoc-I, México [Fuente: NOAA].....	168
Figura 3.25. Procesos de envejecimiento en el mar de los hidrocarburos (API, 1999).....	173
Figura 3.26. Influencia de los parámetros en la evaporación, respecto un caso de referencia.....	181
Figura 3.27. Fuel-oil del <i>Prestige</i> con tres grados diferentes de emulsionado:.....	184
Figura 3.28. Estabilidad y formación de la emulsión agua-en-aceite (a partir de Lee, 1999).....	185
Figura 3.29. Esquema de la transferencia de masa durante el envejecimiento	197
Figura 4.1. Tipos de experimentaciones realizadas en “Le Cedre” :	204
Figura 4.2. Ensayo del fuel del <i>Prestige</i> en el <i>Polludrome</i> : fresco (izq.) y envejecido	205
Figura 4.3. Resultados de la formulación analítica de evaporación para distintos productos	208
Figura 4.4. Curvas de evaporación, emulsionado y viscosidad con el tiempo, a 10 y 20°C.....	213
Figura 4.5. Comparación del emulsionado medido en el <i>Polludrome</i> y calculado	214
Figura 4.6. Coeficiente C5 temperatura-viscosidad de diversos productos.....	215
Figura 4.7. Validación de la formulación del incremento de viscosidad	216
Figura 4.8. Esquema de <i>TRIMODENA</i> aplicado a hidrocarburos.....	222
Figura 4.9. Paso de tiempo óptimo según velocidad y difusión del dominio.	226
Figura 4.10. Simulación de un proceso difusivo puro. Comparación del perfil de concentraciones con la distribución de Gauss.....	226
Figura 4.11. Coeficiente de difusión equivalente (IIº Fase de Fay)	227
Figura 4.12. Comparación difusión pura y esparcimiento mecánico (t1=6h).....	227
Figura 4.13. Comparación difusión pura y esparcimiento mecánico (t1=12h).....	228
Figura 4.14. Efecto de la difusión limitada en la distribución de concentraciones.....	229
Figura 4.15. Puerto de Bilbao: Vista aérea del dominio de estudio (sup.) y Vista general del abra exterior (inf.).....	230
Figura 4.16. Malla computacional y batimetría utilizada en el puerto de Bilbao.	231
Figura 4.17. Campo de velocidades [m/s] debido a un viento norte de 50 km/h.....	232
Figura 4.18. Campo de velocidades mareales [m/s]. Fase de marea saliente	233
Figura 4.19. Localización del pequeño de derrame Agosto 2000 [Fuente: AZTI].....	234
Figura 4.20. Distribución de la concentración a t = 1h, 3h y 10h.	235
Figura 4.21. Vista aérea de la zona portuaria de Pasajes [Fuente: AZTI]	236
Figura 4.22. Malla computacional hidrodinámica para el caso de Pasajes	236
Figura 4.23. Detalle de la malla computacional del modelo de transporte en Pasajes.	237
Figura 4.24. Detalle de la pág. web del Servidor: resultados del modelo de transporte en la entrada del Puerto Pasajes.....	238
Figura 4.25. Simulaciones en <i>hindcast</i> del derrame del Erika (http://www.meteorologie.eu.org/moathy/).....	249
Figura 4.26. Esquema del sistema de previsión MOTHY	249
Figura 4.27. Esquema del modelado hidrodinámico 2DH + 1DV.	250
Figura 4.28. Resultados de MOTHY acoplado al modelo de envejecimiento (según Comerma et al., 2002).	252
Figura 4.29. Simulaciones de la deriva de la carga del <i>Prestige</i> (Fuente: Météo-France).....	253
Figura 4.30. Batimetría del Mediterráneo Noroccidental (datos según DBDB-V Ver 4.2).	256
Figura 4.31. Dominio computacional de estudio	257
Figura 4.32. Energía cinética y potencial y velocidades promediadas [m/s] durante la fase de <i>spin-up</i>	260
Figura 4.33. Hidrodinámica obtenida tras la 1º fase de <i>spin-up</i> :	261
Figura 4.34. Perfil vertical de la velocidad (izq.) y de la turbulencia (der.) en dos puntos de calados distintos (a 46 y 100m.)	262
Figura 4.35. Variación del viento W10 [m/s] para el caso Test-2.....	263
Figura 4.36. Energía cinética y potencial y velocidades promediadas [m/s] en el caso Test-2.....	264
Figura 4.37. Campo de velocidades en superficie y a 50m (inf) [m/s] para t=48h (caso Test-2) ..	265
Figura 4.38. Campo de velocidades en superficie y a 50m (inf) [m/s] para t=96h (caso Test-2) ..	266
Figura 4.39. Perfil vertical de la velocidad (izq.) y de la turbulencia (der.) en dos puntos de calados distintos (a 46 y 100m.) para t=96h (Caso Test-2).....	267
Figura 4.40. Trayectorias seguidas por la mancha en superficie y por el volumen dispersado en la columna de agua (t=0-5días) (Test-1)	269
Figura 4.41. Evolución del porcentaje de partículas en cada capa (test-1)	270
Figura 4.42. Deriva de la mancha en superficie y en profundidad para t=0.5, 1.4, 2.1 y 3.2 días (Test-1).....	271

Figura 4.43. Trayectorias seguidas por la mancha en superficie y por el volumen dispersado en la columna de agua (t=0-5días) (Test-2)	272
Figura 4.44. Evolución del porcentaje de partículas en cada capa (Test-2)	273
Figura 4.45. Deriva de la mancha en superficie y en profundidad para t=0.5, 1.4, 2.1 y 3.2 días (Test-2).....	274

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de las fuentes de hidrocarburos al medio marino.....	18
Tabla 2.2. <i>Ranking</i> mundial de los vertidos más importantes (elaboración propia).....	24
Tabla 2.3. Balance del consumo energético mundial entre 1973 y 2001.....	29
Tabla 2.4. Balance del consumo y transporte mundial de petróleo y refinados.....	31
Tabla 2.5. Tipos de petroleros según tonelaje.....	35
Tabla 2.6. Normativas internacionales y grandes accidentes marítimos.....	37
Tabla 2.7. Calendarios internacionales de retirada del casco simple.....	43
Tabla 2.8. Grado de afectación según sensibilidad, vulnerabilidad y resiliencia de las especies y hábitat del medio.....	51
Tabla 3.1. Clasificación de los hidrocarburos alifáticos y aromáticos.....	91
Tabla 3.2. Composición de los fueles del <i>Prestige</i> , del <i>Erika</i> y del <i>Baltic Carrier</i>	95
Tabla 3.3. HAP's considerados más peligrosos (elaboración propia).....	96
Tabla 3.4. Transferencia de HAP's y compuestos volátiles del fuel del <i>Prestige</i> al agua de mar (a partir de IFP, 2003).....	98
Tabla 3.5. Producción habitual obtenida de las refinerías (Total, 1980).....	100
Tabla 3.6. Tratamientos de refinado y destilación.....	100
Tabla 3.7. Categorías de crudos y refinados.....	104
Tabla 3.8. Unidades de viscosidad dinámica y cinemática.....	105
Tabla 3.9. Comparación de la viscosidad petróleo y agua.....	105
Tabla 3.10. Valores característicos del proceso de transporte.....	114
Tabla 3.11. Ejemplos de profundidades de Ekman (a partir de Pond y Pickard, 1989).....	129
Tabla 3.12. Ejemplos de radios y periodos inerciales (a partir de Pond y Pickard, 1989).....	131
Tabla 3.13. Resultados del ejemplo de difusión pura.....	138
Tabla 3.14. Comparación valores de k_1 , k_2 y k_3 ajustados experimentalmente (según Flores, 1996; Yapa, 1994).....	142
Tabla 3.15. Valores típicos del esparcimiento mecánico.....	144
Tabla 3.16. Crecimiento de la extensión de la mancha.....	144
Tabla 3.17. Espesores y concentraciones mínimos por esparcimiento (a partir de NOAA, 1994).....	145
Tabla 3.18. Ejemplos de coeficientes K de esparcimiento [m^2/s].....	152
Tabla 3.19. Comparación del factor ajuste según diversos autores.....	153
Tabla 3.20. Ejemplo numérico de la dispersión según Delvigne (1993).....	165
Tabla 3.21. Rango de valores de la difusión turbulenta.....	172
Tabla 3.22. Principales procesos físico-químicos de transporte y envejecimiento de los hidrocarburos.....	174
Tabla 3.23. Factores que intervienen en el envejecimiento y su comprensión en el modelado....	175
Tabla 3.24. Ajuste de los parámetros de destilación (NOAA, 1994).....	179
Tabla 3.25. Evaluación de la estabilidad de las emulsiones y su evolución (según Fingas y Fieldhouse, 2001).....	187
Tabla 3.26. Valores típicos de los parámetros de ajuste de las formulaciones de envejecimiento.....	195
Tabla 4.1. Ajustes lineales de las curvas de destilación [NOAA, 1994].....	207
Tabla 4.2. Ejemplos de parámetros de destilación para diversos crudos.....	207
Tabla 4.3. Relación entre composición y <i>sensibilidad</i> a la temperatura (C5).....	215
Tabla 4.4. Parámetros de ajustes para diversos crudos.....	216
Tabla 4.5. Ejemplos numéricos de la dispersión vertical.....	245
Tabla 4.6. Calibración del término difusivo aleatorio según paso de tiempo y turbulencia.....	247
Tabla 4.7. Propuesta de distribución de partículas en MOTHY.....	251
Tabla 4.8. Distribución de partículas según tamaños (densidad $850kg/m^3$).....	258
Tabla 4.9. Distribución y profundidades de los niveles sigma.....	259
Tabla 4.10. Comparación de la turbulencia vertical durante Fase1 de spin-up y Fase2.....	268

CAPÍTULO I -----

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Se introduce, en este primer Capítulo, el trabajo de investigación llevado a cabo sobre el estudio y modelado del comportamiento de los hidrocarburos derramados en el medio marino, cual ha sido la motivación y en que marco se han desarrollado sus objetivos. Los diversos acontecimientos de contaminación marina ponen de manifiesto la necesidad de disponer de herramienta de previsión como soporte a la toma de decisiones y gestión de la crisis por contaminación marina. ¿Cuál debe ser el enfoque de los sistemas de previsión?, ¿sobre que escalas espacial y temporal de resolución pueden trabajar? Por otra parte, se describen los objetivos que se han perseguidos, el plan de trabajo desarrollado durante la elaboración de esta Tesis Doctoral y la organización del presente documento.

Capítulo I. Introducción y Objetivos

1. Antecedentes y Motivación	3
2. Objetivos y enfoque del trabajo de investigación	5
3. Material y Métodos	9
4. Organización del documento	11

1. Antecedentes y Motivación

La observación de la realidad : la contaminación marina por hidrocarburos

Mares y océanos están cada vez más sometidos a la presión del hombre. La contaminación es uno entre varios problemas que afectan al medio marino, de la cual somos todos responsables. El presente trabajo de investigación nace como respuesta a las necesidades de una sociedad afortunadamente cada vez más sensibilizada con este tipo de problemas medioambientales.

Los episodios de contaminación aguda asociados a las mareas negras como las producidas por el *Erika* o el *Prestige* son una pequeña parte del volumen total de hidrocarburos que llegan al mar anualmente. Realmente, a pesar de tener un importante efecto mediático, el transporte marítimo genera una pequeña parte de esta contaminación marina, al que debe sumarse todos aquellos aportes de tipo crónico, urbanos e industriales.

La contaminación por hidrocarburos tiene pues muchas facetas y muchos responsables. Mientras que las normativas internacionales relativas a la preservación del medio marino deben reforzarse, exigiendo mayores responsabilidades a los agentes implicados, la sociedad también debe ser consciente de sus obligaciones. Las mayores exigencias impuestas a los intermediarios de la producción, explotación y distribución del petróleo y sus derivados repercutirán tarde o temprano en los consumidores. Pero, ¿hasta donde está la sociedad dispuesta a pagar?

Para regular las fuentes de esta contaminación marina es necesario analizar globalmente la situación mundial, descifrando el conjunto de problemas asociados de tipo político, económico y social, y haciendo participar el conjunto de agentes implicados, desde la explotación del petróleo hasta el consumo de sus productos derivados. Desafortunadamente, la mayor sensibilización de la sociedad hacia los problemas medioambientales no siempre se refleja en avances de tipo tecnológico o normativo, puesto que existen muchas limitaciones por parte de grupos de presión políticos y económicos.

Herramientas para la evaluación de la calidad del agua

Paralelamente a esta problemática mundial, debemos plantearnos desde el mundo técnico-científico que herramientas son necesarias para afrontar la contaminación marina a escala local. Así, la evaluación de la calidad de aguas se presenta como una pieza clave en la gestión costera. En un país dependiente social y económicamente del mar y de sus costas, es necesario plantear diversas herramientas para monitorizar el estado del medio marino costero y preservar así su calidad.

Conjuntamente a las técnicas de muestreo, se han desarrollado en los últimos decenios herramientas de cálculo numérico para la evaluación de la calidad de aguas. A partir de la integración de los datos de tipo océano-meteorológico, los modelos numéricos nos permiten comprender mejor una situación presente así como hacer una previsión de su evolución.

La Previsión como herramienta en la toma de decisiones

Ante una situación de crisis, los responsables de su gestión necesitan disponer de herramientas de ayuda para la toma de decisiones. Entre otras cosas, es fundamental conocer la situación presente así como su futura evolución. De esta forma, la Previsión entra a formar parte de la toma de decisiones.

La Meteorología es uno de los campos más paradigmáticos de la Previsión. A lo largo del siglo XX y paralelamente a su desarrollo científico, la capacidad predictiva ha mejorado enormemente gracias a la introducción del cálculo computacional. Muchos de los objetivos científico-técnicos alcanzados en la Meteorología están siendo recogidos en otros campos como en la Oceanografía. Los sistemas observacionales conjuntamente con las herramientas de modelado se presentan como una herramienta fundamental de apoyo a la toma de decisiones.

A nivel internacional, existen diversos ejemplos en los que la incorporación de los sistemas operacionales de predicción en la gestión ha dado sus frutos, previendo situaciones de peligro o reduciendo las consecuencias de la crisis. Crisis medioambientales como las del *Prestige*, demuestran la necesidad de incorporar en nuestro país, y de forma internacionalmente coordinada, sistemas de predicción de este tipo.

La *operacionalidad* de estos sistemas se traduce en unos requisitos muy claros: dar una respuesta coordinada en el menor tiempo posible. Eso obliga a definir unos protocolos de transmisión de la información, la robustez y eficiencia de los modelos de cálculo, la incorporación de las observaciones, etc. En definitiva, este tipo de sistemas requieren una convergencia en los criterios técnicos y científicos de los diferentes usuarios y partes involucradas en su desarrollo.

Buena parte de estas herramientas de gestión y apoyo, su desarrollo y disponibilidad, deben definirse en el marco de los planes de contingencia: prever la crisis para mejorar la respuesta.

2. Objetivos y enfoque del trabajo de investigación

Enfoque y punto de partida

El trabajo de investigación que se expone a continuación se ha basado en el modelado numérico como herramienta para comprender, interpretar y reproducir el comportamiento de los hidrocarburos derramados en el medio marino. Ha sido necesario para ello comprender que procesos circulatorios tienen lugar en el mar que controlan el transporte y dispersión de los hidrocarburos. Por otro lado, la investigación se ha basado en comprender el envejecimiento de dichos compuestos una vez derramados en el medio marino, y como esto afecta a su dispersión.

El enfoque inicial del proyecto de investigación se centraba en estudiar los procesos anteriores en dominios de estudio reducidos como son los recintos portuarios. A esta escala local, el modelado se plantea como una herramienta para la evaluación de la calidad de aguas. Las condiciones del dominio están muy bien definidas y acotadas en el tiempo (reducida variabilidad de las condiciones en los contornos, forzamientos limitados, extensión acotada, etc.). Para los requisitos de este tipo de modelos no siendo restrictivos, se podía plantear utilizar una mayor resolución de los procesos que intervienen y pudiendo hacer una evaluación cuantitativa del transporte de contaminante (cálculo de las concentraciones del contaminante).

Evolución de las herramientas operacionales de previsión

Durante la crisis de contaminación provocada por el *Prestige* (Noviembre del 2002), los sistemas de previsión tuvieron un papel importante aunque no suficiente en la toma de decisiones. En gran medida, debido a esta crisis, se reforzó en nuestro país la idea de que la previsión debe ser una herramienta operacional al servicio de los responsables de la gestión. Dicho de otro modo, los modelos involucrados en tiempo de crisis deben ser robustos y sencillos. Así los modelos de previsión deben poder incorporar, en tiempo casi real, los ajustes derivados de las observaciones.

De esta forma, una serie de requisitos nuevos se plantearon al modelado de la deriva de contaminantes :

- la escala de resolución es mucho mayor, tanto espacial como temporalmente
- los procesos considerados en el modelado se reducen para simplificar el volumen de información a procesar
- el modelado de vertidos pasa a formar parte de un sistema de previsión más completo e interactivo, siendo el último elemento de la cadena de modelos
- el modelado debe ser capaz de incorporar datos reales medidos en tiempo real. Por ejemplo, las nuevas posiciones de las manchas observadas pueden servir para ajustar los parámetros libres del modelo

Objetivo principal: constitución de una herramienta numérica de previsión y análisis de contaminación por hidrocarburos

Ya sea para la evaluación de la calidad de aguas o como apoyo en la toma de decisiones para una situación de crisis, el modelado numérico de la deriva de contaminantes se presenta como una herramienta útil para la gestión medioambiental. Correspondientemente, clasificaremos la utilización del modelado de vertidos como herramienta de **análisis** o de **previsión**, respectivamente.

El objeto principal del presente trabajo de investigación es caracterizar los elementos necesarios para constituir un sistema de análisis/previsión de deriva de manchas de hidrocarburos, prestando una atención particular a su operabilidad, es decir a los requerimientos de funcionamiento en caso de crisis real de contaminación.

Para ello, esta Tesis Doctoral se ha centrado en el estudio y desarrollo de las herramientas numéricas necesarias para reproducir los principales fenómenos de transporte y transformación del contaminante tipo hidrocarburos en el medio marino. Por tanto, la investigación se ha centrado en los siguientes **objetivos principales**:

- Revisar el estado actual del conocimiento sobre el modelado de la física y química de los vertidos de hidrocarburos en el mar, identificando los principales procesos y forzamientos a tener en cuenta
- Implementar los aspectos anteriores al modelado numérico según dos niveles de resolución espacial y temporal, identificando las diferentes componentes necesarias de un sistema de previsión de deriva de manchas

Objetivos parciales : implementación al modelado

Los objetivos principales del trabajo de investigación se alcanzan a través de una serie de tareas u objetivos parciales que se han ido realizando de forma progresiva a lo largo de la Tesis. Estas labores pueden agruparse en tres grandes apartados: conocimiento de los procesos de degradación de los hidrocarburos, desarrollo e implementación del modelado numérico, validación y aplicación a casos prácticos.

Así, inicialmente las tareas que se plantearon fueron:

Sobre los procesos de envejecimiento / degradación de los hidrocarburos

- Identificar los principales procesos físico-químicos como la evaporación, el emulsionado (directo e inverso) o el esparcimiento mecánico. Caracterizar las cinéticas de las reacciones así como las variables que intervienen más importantes.
- Identificar la interacción entre los procesos, en particular los efectos limitantes o retardantes. Caracterizar de qué forma se ven modificadas las propiedades reológicas del contaminante.
- Evaluar el estado del arte sobre las principales formulaciones y modelos existentes de envejecimiento. Evaluar las bases de datos existentes sobre hidrocarburos y experimentaciones llevadas a cabo.

- Identificar como interviene la reología del contaminante en su transporte y dispersión. Evaluar los métodos para introducir esta interacción entre modelo de transporte y modelo de envejecimiento

Sobre los forzamientos (del vertido)

- Identificar los principales forzamientos que provocan el transporte y dispersión del vertido en el mar como son el viento, el oleaje o las corrientes marina. Caracterizar su importancia relativa, en particular la escala espacio-tiemporal en la que intervienen.
- Evaluar el estado del arte sobre la inclusión de dichos forzamientos en los modelos de circulación (hidrodinámicos) y de transporte del contaminante.

Sobre la implementación al modelado del transporte

- Identificar las posibles aproximaciones lagrangiana y euleriana al problema del transporte de contaminantes, según el nivel de resolución espacio/tiempo requerido. Identificar cuales son los mejores procesos reproducidos en cada una de las aproximaciones.
- Evaluar el estado del arte sobre los modelos de transporte de hidrocarburos, en cuanto a criterios numéricos (estabilidad, requisitos, etc.).
- Aplicar el(los) modelo(s) a diferentes casos prácticos según la escala del dominio de estudio.
- Plantear la inclusión de los forzamientos más importantes en el marco de sistemas operacionales de previsión, evaluando los requisitos a nivel computacional.

Sobre la implementación al modelado del envejecimiento

- Caracterizar las posibles formulaciones de degradación para su posible integración en el(los) modelo(s) de transporte.
- Evaluar los parámetros libres de las formulaciones mediante la calibración y/o validación a partir de datos experimentales disponibles.
- Plantear la inclusión del modelado del envejecimiento en el marco de los sistemas operacionales de previsión, evaluando los requisitos a nivel computacional y de datos iniciales del contaminante (base de datos).

Paralelamente a la consecución de estas actividades, otra serie de temas han sido abordados durante el desarrollo de la Tesis, debido a una serie de acontecimientos como la crisis del *Prestige* (2002), la implantación del Plan de Emergencias de Contaminación Accidental Marina de la *Generalitat de Catalunya* (CAMCAT, 2003) o el Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional (ESEOO, 2004).

Estos acontecimientos han promovido el profundizar en otros temas paralelos pero igualmente importantes, que han sido desarrollados en el presente trabajo:

- El estado actual del transporte marítimo de hidrocarburos como fuente evitable y/o accidental de contaminación marina y los marcos normativos para regular esta situación

- Las herramientas disponibles para la gestión de una crisis medioambiental en el marco de los Planes de Contingencias: establecimiento de sistemas de previsión operacionales, evaluación previa del riesgo de contaminación marina, definición de los protocolos de actuación en caso de emergencias por contaminación mediante las tareas de seguimiento y previsión

3. Material y Métodos

Plan de trabajo de la investigación

La investigación llevada a cabo a lo largo de la Tesis doctoral puede dividirse en tres grandes etapas, según se ha ido consolidando el conocimiento relativo al comportamiento de los hidrocarburos derramados al medio marino y según el tipo de requerimientos del modelado.

En un principio se abordaron aquellos fenómenos básicos de transporte y degradación del contaminante (2000-2001). El desarrollo del modelado se centró en dominios locales como son los recintos portuarios ($\sim 20 \text{ km}^2$), pudiendo utilizar resoluciones espaciales y temporales grandes (del orden de los 20m y 15min, respectivamente).

Inicialmente, la simulación de los procesos de transporte advectivo y de esparcimiento natural se abordó usando un modelo de transporte en elementos finitos de tipo euleriano (RECODE, Hermosilla, 1996), particularizado a 2 dimensiones, incorporando unas formulaciones químicas de tipo cuantitativo para la evaporación y el emulsionado. Posteriormente, para mejorar el modelo de transporte se adoptó otro modelo también desarrollado en el Laboratorio de Ingeniería Marítima (LIM/UPC) (SEASCAPE, German, 1999), optimizando los algoritmos de cálculo para su implementación en ordenadores personales. El modelado estaba enfocado a escalas de espacio/tiempo relativamente pequeñas, como el sistema desarrollado para el puerto de Bilbao (González, 2000).

En una segunda etapa (2001-2002), el trabajo se centró en la evaluación de los procesos de envejecimiento y de cómo se pueden incorporar a modelos de transporte. Se validaron las formulaciones físico-químicas mediante datos experimentales obtenidos en el instituto francés *le Cedre* para poder incorporar los cambios de la reología del producto a las ecuaciones de transporte. Se evaluó el modelo francés de previsión de deriva de manchas, modelo lagrangiano tridimensional en diferencias finitas, MOTHY (Daniel, 1996) del Servicio Meteorológico francés, Météo-France, participando en un proyecto para actualizar el sistema (Daniel et al., 2003). Coincidiendo con la crisis del *Prestige*, se pudo comprobar *de facto* los requerimientos operacionales de un sistema de previsión, teniendo la oportunidad de participar en el comité francés de seguimiento y previsión de la contaminación, en Brest (Francia).

En la tercera etapa (2003-2004), fueron evaluados otros modelos de circulación y de transporte de contaminantes, adoptando finalmente el sistema modular COHERENS (Luyten et al., 1999). Este nuevo enfoque del modelado surgió de la necesidad de ampliar la resolución espacial y temporal del modelado a dominios de tipo regional (resolución $\sim 10\text{km}$), dando más peso a los procesos de gran escala y destacando los forzamientos más importantes. Los nuevos requisitos responden a la necesidad de adaptarse a un modelado más robusto y eficiente, dentro del marco de la Oceanografía Operacional. A lo largo de este periodo se ha participado en varios proyectos de oceanografía operacional: el Medirreanean Forecasting System (MFSTEP, 2003) y el proyecto ESEOO (Fanjul et al., 2004).

En resumen, el modelado del transporte de contaminantes ha sido planteado a dos escalas distintas, estudiando para ello diferentes modelos de convección-difusión bajo dos aproximaciones distintas (euleriana y lagrangiana). Por otro lado, se han analizado los

principales procesos de envejecimiento que deben tenerse en cuenta en un sistema de previsión.

Referencias, Datos disponibles y Experimentación

El estudio y modelado del derrame de hidrocarburos en el mar ha progresado considerablemente en los últimos decenios, en relación al auge del transporte marítimo de hidrocarburos a escala mundial.

Actualmente son pocos los centros de experimentación de contaminantes en el medio marino, más específicamente de hidrocarburos. Estos productos, si bien son conocidos por la industria petrolífera y refinerías, solo son considerados como peligrosos o tóxicos cuando son derramados al medio marino. A pesar de eso, existen algunos centros destacados donde se evalúa el comportamiento (envejecimiento) de los hidrocarburos en el mar, enfocado generalmente a las tareas de lucha contra la contaminación. Entre ellos podemos destacar: el Cedre (Francia), OHMSET (EE.UU.), Sinteff (Noruega) o el Departamento de Medio Ambiente canadiense (ETCENTRE). Estos centros han ido generando datos experimentales que han servido posteriormente de apoyo a las diversas formulaciones del envejecimiento del petróleo y derivados.

Por otro lado, existen diversas fuentes bibliográficas específicas sobre el derrame de hidrocarburos en el medio marino, de las que destacamos la Conferencia Internacional de Derrames de Hidrocarburos (*IOSC*, auspiciado entre otras por el Instituto Norteamericano del Petróleo) y el *Spill Science and Technology Bulletin* (editado por Elsevier Sc.). Gran parte de las referencias utilizadas han sido obtenidas de estas dos publicaciones.

Finalmente, parte de los datos utilizados en la validación de las formulaciones de envejecimiento fueron obtenidos en el Cedre, a raíz de una estancia de formación.

4. Organización del documento

El presente documento pretende reflejar lo más fidedignamente posible el trabajo de investigación llevado a cabo durante la Tesis doctoral. El texto se organiza en tres grandes secciones: en una primera sección se desarrollan los aspectos más generales ligados a la contaminación marina; en la segunda se describe el estado actual del conocimiento relativo al modelado de la contaminación por hidrocarburos; finalmente se presenta su implementación al modelado numérico mediante aplicaciones y casos concretos.

En la primera Sección se introduce el trabajo de Tesis Doctoral (**Capítulo 1**), planteando los objetivos de investigación y sus aplicaciones al modelado numérico dentro del marco de la Oceanografía Operacional. Seguidamente nos adentramos en la problemática de la contaminación marina por hidrocarburos (**Capítulo 2**). Desde una visión de conjunto, distinguiremos las principales fuentes de contaminación por hidrocarburos, haciendo especial hincapié en el transporte marítimo. Así, se presenta la complejidad de la problemática, describiendo la situación actual del transporte marítimo de hidrocarburos y los marcos normativos europeos e internacionales que existen para afrontar el problema. Seguidamente se resume brevemente la consecuencias de la contaminación por hidrocarburos, sus aspectos medioambientales, económicos y sociales. Finalmente, veremos que herramientas de lucha y prevención existen: los planes de contingencia y los sistemas de previsión dentro del marco general de la Oceanografía Operacional.

En la segunda Sección (**Capítulo 3**) se describe el estado actual del conocimiento relativo al comportamiento de los hidrocarburos vertidos al medio marino, su envejecimiento y deriva. Para ello es necesario primeramente conocer con detalle las propiedades de estos contaminantes no conservativos: su composición y sus propiedades físicas que varían con el tiempo, interactuando con el medio ambiente.

Por otro lado, para comprender mejor el medio marino se desarrollan una serie de conceptos fundamentales sobre la dinámica del océano, sobre los agentes forzadores como el viento, y sobre cuales son las escalas de resolución espacial y temporal en el que todo ello tienen lugar. Todo ello particularizado al caso de los contaminantes no-conservativos como son los hidrocarburos (petróleo, refinados y productos residuales).

En la tercera y última Sección se aborda la implementación del modelado numérico de los procesos físicos descritos anteriormente, a dos niveles de resolución espacial distintas (**Capítulo 4**). Así, veremos que aproximación numérica es mejor según el proceso físico y la escala espacio/tiempo consideradas, mediante la utilización de modelos lagrangianos y eulerianos. Finalmente a modo de conclusión (**Capítulo 5**) se resumen los aspectos más relevantes desde el punto de vista del modelado numérico y de su implementación a los Sistemas de Previsión de la Oceanografía Operacional.

Por último, (**Capítulo 6**) se incluye al final del documento, las referencias citadas a lo largo del trabajo, así como los artículos y documentos más generales consultados (webgrafía, etc.).

CAPÍTULO II -----

INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA DE LA CONTAMINACIÓN MARINA

*Les siècles devant eux poussent, désespérées,
Les révolutions, monstrueuses marées,
Océans faits des pleurs de tout le genre humain.*

Victor Hugo , en *Les Contemplations*

El medio marino se encuentra cada vez más sometido a las presiones antrópicas. La contaminación marina es uno de los problemas más graves. Existen diversas fuentes de contaminación que aportan hidrocarburos y productos residuales del petróleo a los océanos. Entre ellas está el transporte marítimo, como usuario del medio marino pero también por la consecución de vertidos ilegales y derrames accidentales. ¿Cual es el marco normativo existente? ¿Cuales son las consecuencias más graves para el medio marino y para el ser humano? Finalmente se presentan en este apartado que herramientas disponemos para la gestión y lucha contra este tipo de contaminación.

Capítulo II. La contaminación marina por hidrocarburos

1. Aspectos generales de la contaminación marina	15
1.1 Tipos de contaminantes	15
1.2 Fuentes de contaminación por hidrocarburos	17
1.2.1 Aportaciones debidas al consumo	20
1.2.2 Contaminación asociada al transporte marítimo de hidrocarburos	21
2. La producción y el transporte marítimo de hidrocarburos.	26
2.1 Consumo y transporte energético mundial	26
2.1.1 Balance del comercio energético mundial	27
2.1.2 La producción y transporte de petróleo	30
2.1.3 Los corredores marítimos	32
2.2 Organización del sector del transporte marítimo	33
2.2.1 Tipos de buques petroleros	34
2.2.2 Banderas de conveniencia y Sociedades de Clasificación	36
2.3 Las Normativas y los Grandes incidentes marítimos	37
2.3.1 Consideraciones generales de la problemática internacional	38
2.3.2 Convenios internacionales sobre Responsabilidad Civil (CLC) y Fondos de Indemnizaciones (IOPC)	39
2.3.3 Normativa norteamericanas (OPA '90)	39
2.3.4 Evolución de las Normativas en la Unión Europea	40
2.4 Conclusiones: evaluación de las actuaciones	42
3. Consecuencias socio-económicas y medioambientales	45
3.1 Afección al medio receptor	46
3.2 Evaluación de la Toxicidad	51
3.3 Consecuencias socio-económicas	55
4. Herramientas de Gestión en una crisis medioambiental	57
4.1 Marco de actuación de las crisis de contaminación marina	57
4.1.1 La Prevención mediante Planes de Emergencia	59
4.2 Seguimiento y previsión del transporte de contaminantes	64
4.2.1 Localización y Seguimiento	64
4.2.2 La Previsión de la deriva	69
4.3 Sistemas observacionales y Oceanografía Operacional	70
4.3.1 Marco general de los sistemas observacionales	70
4.3.2 Sistemas de medida y Sistemas de modelado numérico	73
4.3.3 Proyectos en desarrollo: el MFSTEP y el ESEOO	76
5. Conclusiones y Referencias del Capítulo	78

1. Aspectos generales de la contaminación marina

En las últimas décadas, la contaminación marina ha suscitado una preocupación creciente en la sociedad, afortunadamente más sensibilizada con los problemas medioambientales. Mientras las normativas internacionales se han ido endureciendo, se siguen produciendo accidentes marítimos cercanos a las costas, que nos recuerdan que el mar no solo es un medio receptor de todos los residuos antrópicos, sino fuente y medio de vida de muchos seres vivos, entre ellos el ser humano. En efecto, puede ser que el ser humano no valore todavía la importancia que los océanos tienen sobre el planeta; los mares y océanos representan tres cuartas partes del *territorio*, utilizado por el hombre como base de múltiples actividades: industrias, pesquerías, transporte, ocio, etc.

Uno de los indicadores de la actividad antrópica es la contaminación del medio. Las sucesivas revoluciones industriales han sido acompañadas de un empeoramiento del medio natural, tanto por la creciente demanda de sus recursos (explotación energética, agrícola, forestal, etc.) como por la respuesta sobre él (contaminación, modificación del hábitat).

Los orígenes de esta contaminación son múltiples. Si bien los accidentes marítimos, a pesar de tener una relativa componente de fatalidad, suelen tener una mayor relevancia mediática, existen muchas otras fuentes de contaminación que deben ser reguladas y controladas. Cierto es que las costas cercanas a los corredores marítimos sufren una contaminación crónica asociada al intenso tráfico de buques, pero por otro lado los grandes centros urbanos e industriales deben esforzarse en mejorar la calidad de sus aguas litorales.

A escala planetaria, la acción directa del hombre sobre el conjunto de océanos y mares parece imperceptible. Estas grandes masas de agua parecen tener una inagotable capacidad de auto-regeneración. Sin embargo, queda cada día más clara la influencia que el hombre tiene sobre el medio y sobre el clima (WMO, 2003). Las consecuencias provocadas por estas alteraciones empiezan a observarse y a ser contraproducentes para el propio hombre; la mayor variabilidad del clima está ocasionando grandes pérdidas económicas y humanas.

Por otro lado, si nos fijamos en el crecimiento demográfico, existe una especial concentración en las franjas costeras. En ciertas regiones del planeta esto empieza a plantear problemas graves para las infraestructuras de abastecimiento, de habitabilidad. Plantear el desarrollo sostenible parece una utopía...

1.1 Tipos de contaminantes

Para comprender a qué nos referimos como “*contaminación marina*” podemos recordar aquella definición adoptada por las Naciones Unidas, más concretamente por el panel de expertos IMO, FAO, UNESCO, WMO, IAEA, UN/UNEP y expuesto en el Convenio Internacional UNCLOS de 1982:

“...Se entiende por contaminación la introducción por parte del hombre, de forma directa o indirecta, de sustancias o energía en el medio marino

(incluyendo estuarios), que provoquen efectos nocivos tales como daños a los recursos vivos y a los ecosistemas marinos, peligro para la salud humana, alteración de las actividades marítimas incluyendo la pesca, deterioro de la calidad del agua de mar para su utilización y recreo...”

Esta definición de contaminación incluye de forma sintética muchos conceptos asociados al uso y afección del medio marino: el océano es fuente y base de muchas actividades naturales y antrópicas. Por otro lado, a esta definición habría que incluir todos aquellos fenómenos naturales que alteran la capacidad del medio marino a mantener su equilibrio. De forma general, un contaminante es aquella sustancia que reduce la calidad del agua, pudiendo ser perjudicial o no para el medio y su biota.

A grandes rasgos, podemos distinguir los contaminantes según sean:

- de origen antrópico
 - sustancias química (metales pesados, organoclorados, etc.)
 - nutrientes (fertilizantes, residuos urbanos, piscifactorías)
 - organismos (transporte de especies invasoras / no-indígenas)
 - energía (plumas térmicas de centrales eléctricas)
- de origen natural
 - tóxica (plagas o algas tóxicas por aporte de nutrientes)
 - eutrofización (apoxia del medio)

Existen clasificaciones de los productos químicos sintéticos en función de su peligrosidad para el hombre y el medio natural, de su toxicidad potencial o por ejemplo de su persistencia. En la actualidad, la actividad del hombre se ha diversificado tanto que las aportaciones de residuos y contaminantes al medio marino son enormemente dispersas. Los grandes focos de contaminación se concentran en los centros productores, industriales o de mayor actividad urbana. Históricamente, las crisis de contaminación más graves (para el ser humano) se han producido tras el vertido de sustancias tóxicas, como metales pesados, desde emisarios o ríos con niveles de contaminación muy elevados.

La contaminación en el medio puede ser puntual, debida a un aporte masivo de un producto dado que afecte de forma aguda al medio y a su biota. Afortunadamente, la naturaleza tiene bastante capacidad de reaccionar y recuperarse de estos episodios puntuales. Por el contrario, puede existir una contaminación crónica, en la que el medio está continuamente sometida a la presión humana; el vertido prolongado de sustancias no pueden ser asimiladas por el medio y puede degenerar en situaciones graves, de pérdida de riqueza ecológica o de salud para el hombre.

De la concentración de actividades terrestres y marítimas en la zona costera podemos distinguir dos fuentes: aquellas aportaciones o derrames de origen terrestre (industrial, agrícola y urbana) o de las de origen marítimo (embarcaciones, instalaciones fijas portuarias, etc.).

Evaluación de la calidad del agua

Hoy en día existe una preocupación creciente sobre los problemas de contaminación de las aguas costeras, por razones estéticas y sanitarias. Ello se traduce en una mejor y continua evaluación de la calidad de aguas. A las técnicas de monitorización del medio se incorpora el modelado numérico como herramienta de previsión.

El empeoramiento de la calidad del medio marino puede ser producido por el aumento desmesurado de un producto natural o inocuo de origen antrópico (plumas térmicas, salmueras, etc.) o por la introducción de una sustancia dañina que afecte al medio y/o a los seres vivos.

Los efectos de un contaminante pueden ser directos (carácter tóxico) o indirectos, pudiendo desencadenar otros procesos graves para el medio; por ejemplo los excesivos aportes de nutrientes (fertilizantes, descargas pluviales, etc.) pueden provocar una eutrofización del medio que degenera en una anoxia (falta de oxígeno) por descomposición letal para muchos organismos marinos.

1.2 Fuentes de contaminación por hidrocarburos

El presente trabajo se ha centrado en la contaminación marina, de origen antrópico, por vertido de petróleo y productos derivados, que más genéricamente denominaremos *hidrocarburos* (productos crudos naturales, aceites, gasolinas u otros refinados). En cierta medida, y de forma injustamente exagerada, asociamos esta contaminación al transporte marítimo. Como veremos, existen muchas otras fuentes de contaminación que no están tan reguladas.

La contaminación por hidrocarburos puede clasificarse según dos conceptos básicos, según su origen y el tipo de aporte:

→ localización / origen :

- terrestre, debido a actividades humanas ligadas con el medio costero
- marítima, debido al transporte marítimo e instalaciones en mar abierto
- atmosférico, aportación de ciertos compuestos por las lluvias
- corteza terrestre, debido a las afloraciones en yacimientos naturales

→ tipo de incidencia :

- Accidental, puntual tanto en el espacio y en el tiempo, supuestamente inevitable, involuntario e imprevisible
- Operacional o como consecuencia directa del conjunto de actividades humanas que intervienen en el medio, con una cierta intencionalidad

Así, según estos dos conceptos, se clasifican el conjunto de fuentes de contaminación marina resumidos en la Tabla 2.1. Como veremos detalladamente, cada una de estas fuentes estará asociada a un tipo de contaminación, más o menos crónica y grave para el hombre y el medio natural.

Origen / Tipo	Accidental	Operacional	Natural
Terrestre	Roturas / accidentes: <ul style="list-style-type: none"> • Industrias • Refinerías • Oleoductos • Puertos 	Efluentes: <ul style="list-style-type: none"> • urbanos • industriales • agrícolas 	Afloramientos
Marino	Transporte marítimo Extracción off-shore	Puntuales: <ul style="list-style-type: none"> • <i>bunkering</i> / cargas • lavado sentinas Crónicos: <ul style="list-style-type: none"> • pérdidas aceites 	Afloramientos corteza terrestre
Atmosférico		Crónicos: <ul style="list-style-type: none"> • lavado por las lluvias en zonas urbanas 	

Tabla 2.1 Clasificación de las fuentes de hidrocarburos al medio marino

Es difícil evaluar con exactitud el volumen total de hidrocarburos que llegan a los océanos, pero según diversos estudios esta cifra oscilaría entre los 1.3 y 3.2 millones de toneladas anuales, habiendo descendido significativamente en las últimas décadas (Walker et al., 2003). Esta entrada en los océanos representaría cerca de un 0.05% de la producción de crudo anual.

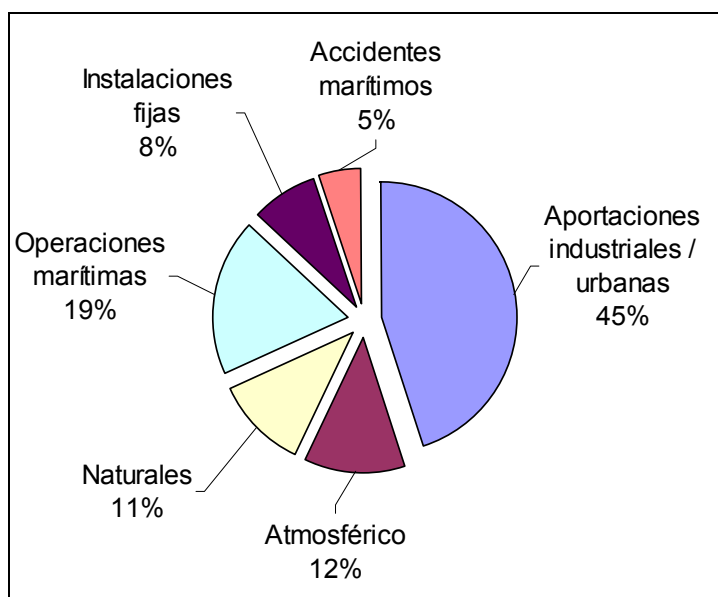


Figura 2.1 Fuentes de hidrocarburos vertidos al medio marino.

(década '90, elaboración propia)

En la Figura 2.1 se compara la aportación relativa de cada fuente (datos relativos a la década de los 90 obtenidos de varias fuentes). Como vemos, la fuente más importante de hidrocarburos es la derivada de las industrias y de la contaminación urbana: vertederos, aguas pluviales, escorrentías urbanas (*run-off*). Este volumen sumado al aporte atmosférico por lluvias suman más de la mitad del total de la contaminación marina por

hidrocarburos. El problema es más grave si tenemos en cuenta que estas dos fuentes de contaminación son de tipo crónico, que empeoran progresivamente el medio receptor.

Desde el punto de vista de la producción del petróleo, las aportaciones de hidrocarburos al medio marino pueden ocurrir durante las etapas de extracción, transporte (refinado y distribución) y consumo. A título de ejemplo, la Figura 2.2 compara la importancia de aportaciones en cada una de estas tres fases en los EEUU y en el resto de países del mundo (porcentaje sobre aportaciones de origen antrópico). Es interesante destacar, que los vertidos asociados al consumo son mucho mayores que los producidos durante el transporte, especialmente en aquellos países más desarrollados (y/o con legislaciones marítimas más estrictas como los EEUU).

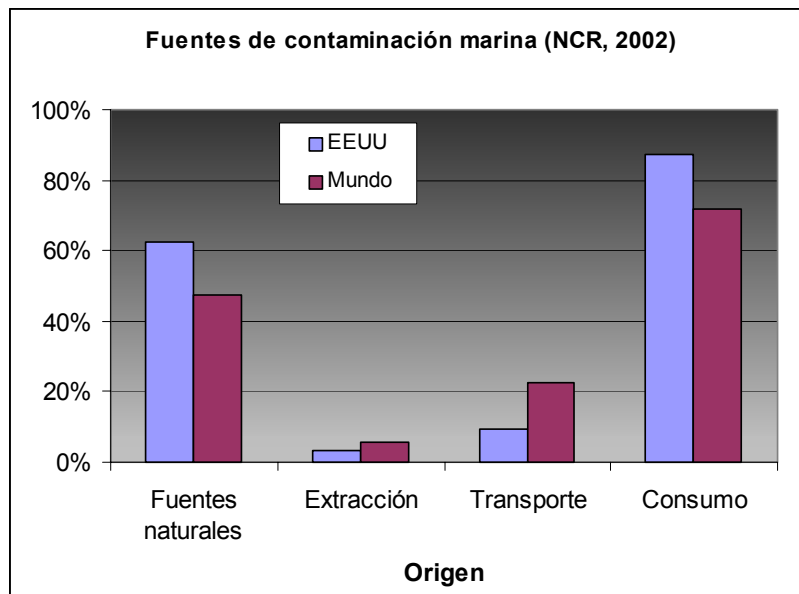


Figura 2.2 Fuentes naturales y derrames durante la Extracción, Transporte y Consumo en los EEUU y en el mundo (Walter et al, 2003)

Por otro lado, otra fuente importante de hidrocarburos es la que se produce naturalmente, a través de afloramientos en la corteza terrestre, próximo a yacimientos de petróleo. Según diversos autores, estas aportaciones podrían significar hasta el 45% de las aportaciones de hidrocarburos al mar (Walker et al., 2003). Esta aportación nos hace relativizar el concepto de producto contaminante y nos hace recordar que el petróleo (crudo) es un producto natural que se encuentra en grandes concentraciones en ciertos lugares de la tierra. De hecho, debido a su origen y formación naturales, existe una serie de organismos que conviven y se nutren del petróleo. De esta forma, en zonas próximas a yacimientos, podemos encontrar abundancia de organismos marinos habituados a concentraciones elevadas de hidrocarburos. A este proceso de degradación natural por microorganismos se le ha llamado *biodegradación*, o incluso *bioremediación*, cuando nos referimos a él como solución para reducir la contaminación.

Según la fuente de contaminación, llegarán al medio marino unos productos u otros, afectando de una forma u otra a los organismos que en él viven. Así, la presencia de un contaminante dado permite distinguir su origen: los compuestos atmosféricos o derivados pirogénicos provienen de la combustión incompleta típica de las urbes, mientras que los productos más naturales (y más fácilmente degradables) pueden provenir de afloramientos naturales.

Por otro lado, en aquellos lugares donde la presencia del hombre es ya muy marcada, es necesario establecer una concentración basal de los compuestos químicos para poder evaluar el efecto de una eventual contaminación.

1.2.1 Aportaciones debidas al consumo

Efluentes urbanos, industriales y agrícolas. Contaminación atmosférica

Gran parte de la entrada de hidrocarburos al medio marino proviene de las actividades antrópicas, ya sea por vía marítima (transporte marítimo, puertos, etc.) como por vía terrestre (escorrentías urbanas, etc.). Este tipo de aportaciones, debido a su carácter crónico y disperso es difícil de evaluar y controlar.

De forma general, por contaminación de origen terrestre se incluye todo el conjunto de vertidos urbanos, industriales y agrícolas que representan el porcentaje más importante del aporte total. Estos aportes son crónicos, muy localizados en ciertas zonas del litoral (emisarios y descargas de ríos) y pueden ser muy tóxicos a largo plazo, debido a la acumulación de las componentes más tóxicas en los organismos a lo largo de la cadena trófica.

Por otro lado, la contaminación atmosférica que se concentra en las ciudades y en los grandes ejes del transporte terrestre (nudos y autopistas urbanas) acaba parcialmente trasladándose al medio marino, por las lluvias y el consecuente arrastre de los compuestos disueltos originados de la combustión incompleta de combustibles fósiles.

En ciertos lugares del mundo, el medio marino queda condenado a niveles de contaminación crónicos que difícilmente podrán ser recuperados nunca. El control y planteamiento de posibles medidas correctoras de esta contaminación urbana e industrial al medio marino solo puede ser considerado de forma global, bajo los principios del Desarrollo Sostenible. Una aplicación directa de ello pasa por incluir la contaminación del litoral dentro de Planes de Gestión Integral de la Costa.

Instalaciones fijas marítimas

Los puertos son por antonomasia instalaciones fijas que generan contaminación marina, ya sea por las actividades rutinarias asociadas al elevado tráfico marítimo (aguas sucias, vertidos de aceites y grasas), o por pequeños derrames accidentales de tipo operacional (carga y descarga de graneles líquidos, *bunkering*, etc.). En algunos casos, parte del alcantarillado urbano es vertido en las dársenas portuarias.

Este tipo de contaminación está muy localizada en las aguas abrigadas del puerto y asociada a las instalaciones específicas, como son muelles o pantalanes para los petroleros. Afortunadamente, los puertos han ido mejorando mucho la calidad de sus aguas interiores. Típicamente, la cercanía a los centros urbanos (fachada marítima, playas urbanas, etc.) ha hecho aumentar los requisitos medioambientales de estas instalaciones.

Otras instalaciones fijas como plataformas de extracción *off-shore*, también pueden ser fuente de vertidos operacionales o accidentales importantes. Ese fue el caso, por ejemplo, de Itoxc, en la que las aguas producidas (expulsadas tras la perforación de un yacimiento) provocaron un gran derrame de petróleo al mar (Tabla 2.2).

Transporte marítimo

El transporte marítimo, como actividad que se desarrolla en el medio marino, provoca una contaminación de diversos tipos. Una parte importante de las mercancías mundiales son transportadas por vía marítima en grandes buques y cargueros. Como cualquier otro tipo de tráfico, se crea un impacto sobre el medio, siendo una fuente de contaminación de forma directa e indirecta.

Una intensidad elevada de tráfico marítimo tienen asociado lógicamente un mayor riesgo de accidentes. Todos los grandes buques (cargueros y petroleros) necesitan volúmenes importantes de combustible. Así, los depósitos de combustible pueden llegar a contener hasta 4000 toneladas de fueles pesados (*bunker fuel oil*), susceptibles de ser derramados accidentalmente por colisión, hundimiento o embarrancamiento.

Por otro lado, de forma directa las embarcaciones generan residuos propios (aguas sucias) y residuos de los fueles de combustión (*sludges*). En el caso particular de los petroleros, y como detallaremos en el siguiente apartado, existen toda una serie de operaciones de carga y descarga, limpiezas sentinas, etc. que generan una contaminación de hidrocarburos.

Al vertido ilegal al mar de las aguas de lastrado o procedentes de la limpieza de los tanques de los petroleros en alta mar, va asociada otro tipo de contaminación. Además de aportar productos contaminantes y/o tóxicos (hidrocarburos, detergentes, etc.) estas aguas pueden introducir especies invasivas en el medio marino. Esta contaminación crónica es más marcada en los corredores marítimos donde se concentra un importante tráfico de buques y petroleros (Mediterráneo, Canal de la Mancha, costas gallegas, etc.).

Si bien este tipo de vertidos son menos conocidos y más dilatados en el tiempo, a lo largo del año suponen una aportación importante de contaminantes al medio marino, provocando una acumulación de las componentes más tóxicas. El volumen total vertido en un año de forma crónica, puede ser comparable a ciertos vertidos accidentales puntuales, masivos y más conocidos como son las mareas negras. Esto queda reflejado en diversos estudios de vigilancia y seguimiento llevados a cabo en el mar Mediterráneo (Platonov, 2002).

Desde el punto de vista económico, esta contaminación crónica no tiene graves consecuencias a corto-medio plazo, pero si puede representar a largo plazo un problema medioambiental y para la salud humana muy grave.

1.2.2 Contaminación asociada al transporte marítimo de hidrocarburos

El transporte marítimo, y especialmente el destinado a los productos petrolíferos, tiene asociado una contaminación de tipo operacional producida por la repetición de actuaciones contaminantes. Si bien es cierto que la contaminación que se produce es relativamente discreta comparado con el volumen transportado (y respecto a las otras fuentes), lo reprochable es que se trata de operaciones intencionadas.

Por el intenso tráfico marítimo, este tipo de descargas voluntarias (o previsibles) viene siendo habitual a pesar de que existen normativas específicas sobre ello. De hecho, existen diversos proyectos internacionales específicos destinados a la vigilancia de los buques infractores.

Como *vertidos operacionales* de hidrocarburos contaminantes al mar tenemos:

Operaciones de des-lastrado

Para mantener la estabilidad en los trayectos en vacío, los petroleros necesitan cargar un lastre mediante agua del mar. Típicamente, esta carga temporal (entre un 30-40% de su carga máxima) se realizaba en los mismos tanques de carga del hidrocarburo. Una vez llegado a puerto para una nueva carga, el lastre de agua de mar, contaminado en parte por la anterior carga, era vertido directamente al mar. Estos vertidos podían suponer cerca de un 0.5% del volumen total inicial del producto transportado. En la actualidad, de acuerdo a las diversas normativas internacionales esto se viene regulando en gran medida mediante diversos métodos y requisitos técnicos de los buques:

- Retención a bordo de los propios residuos oleosos (técnica del “load-on-top”), sistemas de filtrado y separado del agua
- Introducción de los tanques de lastre limpio (clean ballast tank, CBT)
- Introducción de los tanques de lastre segregados (segregated ballast tank, SBT)

Operaciones de limpieza de los tanques

En ciertas ocasiones, cuando es necesario limpiar los tanques vacíos antes de una nueva carga (producto diferente al anterior), también se producían vertidos de las aguas oleaginosas, residuos de la limpieza. Hoy en día se imponen el lavado con la misma carga o producto crudo más solvente que la propia agua (lavado con petróleo).

Operaciones de vertidos de residuos oleosos propios

A lo largo de su vida útil, el buque acumula muchos residuos de tipo oleoso. Por otra parte, los fueles propios de combustión contienen bastantes impurezas se son separados por filtrado (*sludges*). Esta acumulación de residuos (aceites de máquinas, impurezas particuladas, carbón, etc.) debe almacenarse, tratarse a bordo y/o descargándose en las instalaciones portuarias de tratamiento. Sin embargo, por diversas razones técnicas, de costes o de insuficientes infraestructuras portuarias, estos residuos en ocasiones son vertidos en alta mar.

Operaciones de “bunkering”

De nuevo, para garantizar la estabilidad, los tanques de combustible propio del buque (*bunker*) suelen utilizarse como tanques de lastre, a medida que estos se consumen. Antes de reponer combustible, era práctica habitual el vertido al mar de esta agua contaminada, sucediendo lo mismo que durante el des-lastrado. Así, los petroleros, como otros grandes buques que pueden albergar hasta 3000-4000 toneladas de combustible propio, deben disponer de separadores de aguas oleosas para evitar el vertido contaminante.

En la Figura 2.3 en la que se incluyen dos imágenes SAR tomadas por el satélite ERS-2 tomadas cerca del litoral barcelonés (Platonov, 2002) se observan dos de los tipos de vertidos descritos. Por un lado, en ambas imágenes, los vertidos asociados al transporte marítimo (bandas negras alargadas siguiendo la ruta del petrolero) y por otro, en la imagen de la derecha, los vertidos urbanos por la descarga del río Llobregat, cerca del puerto de Barcelona.

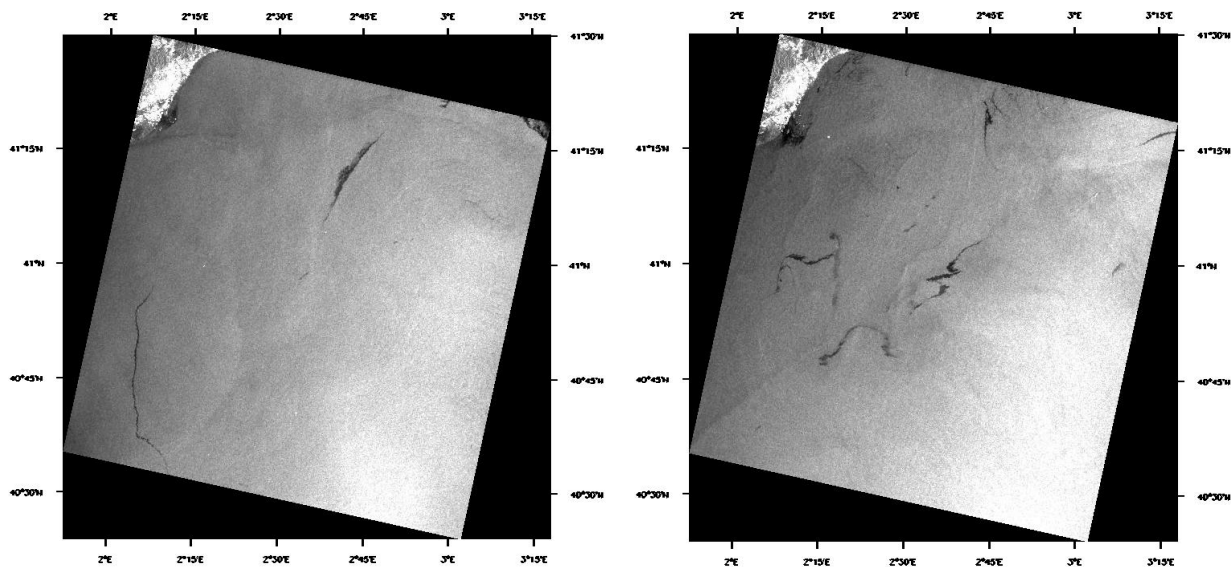


Figura 2.3. Observaciones de derrames frente el litoral de Barcelona.

Imágenes SAR/ERS-2 correspondientes al 05/07/98 y 28/09/97 (Platonov, 2002)

En estos casos de descargas marítimas ilegales, los técnicas de seguimiento y vigilancia ambiental son fundamentales para poder aplicar las leyes y normativas sobre la preservación del medio marino. En este sentido, diversos proyectos europeos han concentrado sus esfuerzos al desarrollo de estas técnicas, como el *Clean Seas Project* (Jolly et al., 2000) o el *Rapsodi* (JRC, 2000).

Para poder limitar este tipo de vertidos deliberados, es necesario dotar a los puertos receptores de infraestructuras para la correcta recepción de esta agua sucias, pudiendo separar el agua de mar de los residuos oleosos. Esto supone una inversión (en tiempo y dinero) no siempre asumido.

Derrames por accidentes marítimos

A pesar de que los (grandes) accidentes marítimos se han ido reduciendo en los últimos decenios (de 7 y 10 vertidos anuales, ver Figura 2.4), el impacto mediático de los derrames accidentales es mucho mayor que cualquier otro tipo de derrame/vertido marino de hidrocarburos. Sin embargo, el volumen derramado durante un gran accidente se asemeja mucho al conjunto de vertidos operacionales (sin incluir los aportes terrestres).

Según la organización internacional ITOFP (*International Tankers Owners Pollution Federation Ltd.*), el numero de accidentes ha ido disminuyendo, atribuible en parte a la existencia de nuevas normativas. Sin embargo, como se dice popularmente, las

estadísticas de la reducción del número de derrames anuales de nada sirven a los afectados por la contaminación...

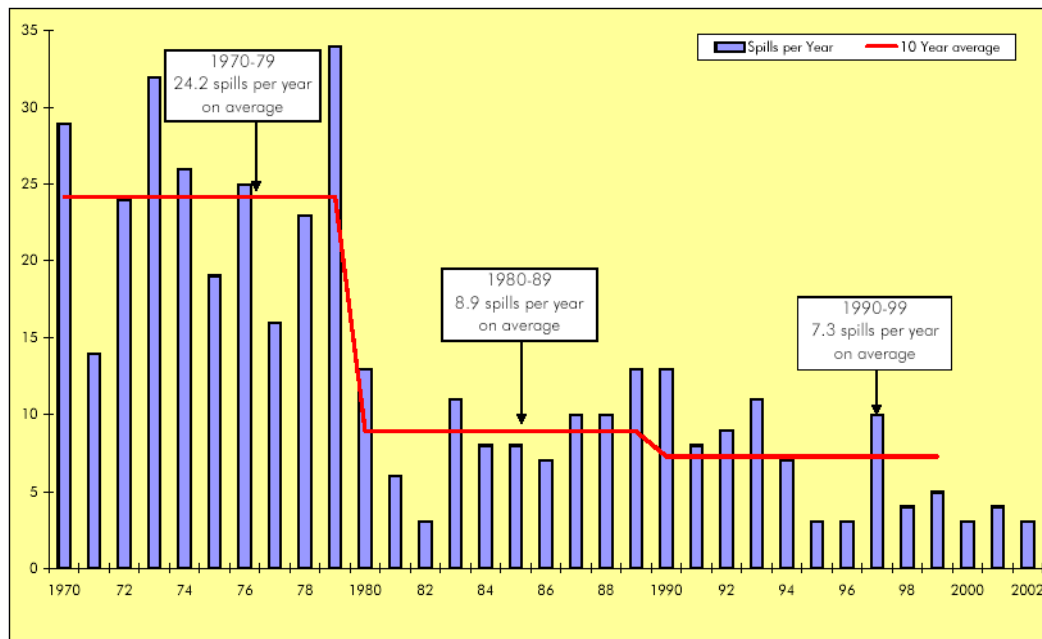


Figura 2.4 Numero de accidentes ocurridos anualmente con más de 700 ton vertidas ((ITOPF, 2003)

Buque	Año	Localización	Derrame (ton.)
Guerra del Golfo	1990	Golfo de Arabia	~ 1 millon
Ixtoc-I	1980	Golfo de México	~ 750,000
Atlantic Empress	1979	Tobago, West Indies	287,000
ABT Summer	1991	Angola (700 millas)	260,000
Amoco Cadiz	1978	Bretaña, Francia	223,000
Haven	1991	Genova, Italia	144,000
Torrey Canyon	1967	Islas Scilly, UK	119,000
Urquiola	1976	A Coruña, España	100,000
Hawaiian Patriot	1977	Honolulu (300 millas)	95,000
Independenta	1979	Bósforo, Turquía	95,000
Braer	1993	Islas Shetland, UK	85,000
Aegean Sea	1992	A Coruña, España	74,000
Sea Empress	1996	Milford Haven, UK	72,000
Metula	1974	Estrecho de Magallanes, Chile	50,000
Prestige	2003	Galicia, España	40,000
Exxon Valdez	1989	Alaska, USA	37,000
Erika	1999	Bretaña, Francia	14,000

Tabla 2.2. Ranking mundial de los vertidos más importantes (elaboración propia).

Como cabría esperar, el número de grandes accidentes (más de 700 toneladas derramadas) es relativamente bajo. Es curioso como en el ranking de los derrames más importantes (de hasta el millón de toneladas!) no figuran accidentes relacionados estrictamente con el transporte marítimo (Tabla 2.2).

Las causas de estos accidentes suelen estar asociados en gran parte a *errores humanos*, pero también a otros factores de tipo “*imprevisibles*” (condiciones meteorológicas, etc.). Sin embargo, debe concentrarse el esfuerzo, como veremos a continuación, en la constitución de normativas claras sobre la prevención y la seguridad marítima.

2. La producción y el transporte marítimo de hidrocarburos.

La demanda mundial de productos petrolíferos sigue un ritmo creciente como queda reflejado en la producción y distribución de crudos y sus refinados. El fenómeno de *globalización* mundial ha afectado tanto a la producción, por la mayor diversidad de centros productores, como al transporte marítimo, su principal vía de distribución.

Como hemos visto, las principales fuentes de contaminación marina por hidrocarburos se concentran en los centros consumidores, es decir cerca de las ciudades e industrias litorales, por vía fluvial y atmosférica. La contaminación asociada al transporte marítimo, más controlada internacionalmente en las últimas décadas, es relativamente menor, pero no por ello debe ser menospreciada. Si bien existe una preocupación internacional para reducir la contaminación operacional y accidental, existe todavía mucho camino para llegar a un consenso de todos los agentes implicados.

En el siguiente apartado pretenderemos responder a una serie de preguntas para entender mejor un sector económico tan importante y de trascendencia para el ser humano, que a su vez puede afectar a la integridad de su entorno: el medio marino.

- ¿Cómo se desarrolla la producción y el comercio marítimo de los hidrocarburos?
- ¿Cómo se organiza la flota mundial de petroleros?
- ¿Cuales son las principales medidas sobre contaminación marina?

En consonancia con la demanda de combustibles fósiles, la industria petrolífera también ha evolucionado mucho. El petróleo crudo es tratado y convertido en las refinerías en una serie de subproductos. Así, cada producto refinado obtenido tendrá un uso e interés económico distinto, yendo desde el combustible para la aviación hasta el asfalto para las carreteras. En el pasado, los procesos de destilación simple daban productos ligeros, destilados medios y residuos. Sin embargo, gracias a las técnicas cada vez más sofisticadas de *craqueado*, se pueden aprovechar productos residuales mucho más densos y viscosos.

La creciente demanda y globalización del transporte marítimo ha necesitado de un abaratamiento de los combustibles fósiles. Así, la industria petroquímica ha re-enfocado los procesos de tratamiento hacia aquellos productos considerados residuales, revalorizándolos. A su vez, la industria pesada y los grandes buques son capaces en la actualidad de tratar y utilizar fuel-oil cada vez más pesados.

2.1 Consumo y transporte energético mundial

La tendencia del consumo energético mundial no parece tener en cuenta las consecuencias ni a corto ni a largo plazo; no parece que exista un replanteamiento de los esquemas clásicos de explotación de los recursos mundiales de combustibles fósiles, parece que aún queda tiempo hasta el agotamiento de las existencias.

Debido a las políticas energéticas de las grandes superpotencias, veremos como se constituye un mapa de transferencias entre centros productores y centros explotadores, estructurado fundamentalmente mediante grandes rutas marítimas.

2.1.1 Balance del comercio energético mundial

En consonancia con el crecimiento de la población mundial, el consumo energético mundial no cesa de crecer. Del mapa mundial de consumo energético por regiones (Figura 2.5) destacan claramente los países del “primer mundo” de aquellas regiones en desarrollo.

El crecimiento anual del mercado energético, situado alrededor del 2%, se encuentra paradójicamente estancado en los últimos años debido a la complicada situación económica de los países más desarrollados. Pero por otro lado, países como China muestran un asombroso crecimiento en la demanda energética muy superior, cerca del 20%, especialmente en materias primas como el carbón.

La diferencia de localización entre los grandes centros productores de energía y los grandes consumidores provoca un intercambio energético mundial (Figura 2.7). En la actualidad nos encontramos en que existe una enorme dispersión de la oferta, de las fuentes de suministro energético. Es la llamada globalización del mercado mundial. Evidentemente eso también se refleja en el transporte marítimo.

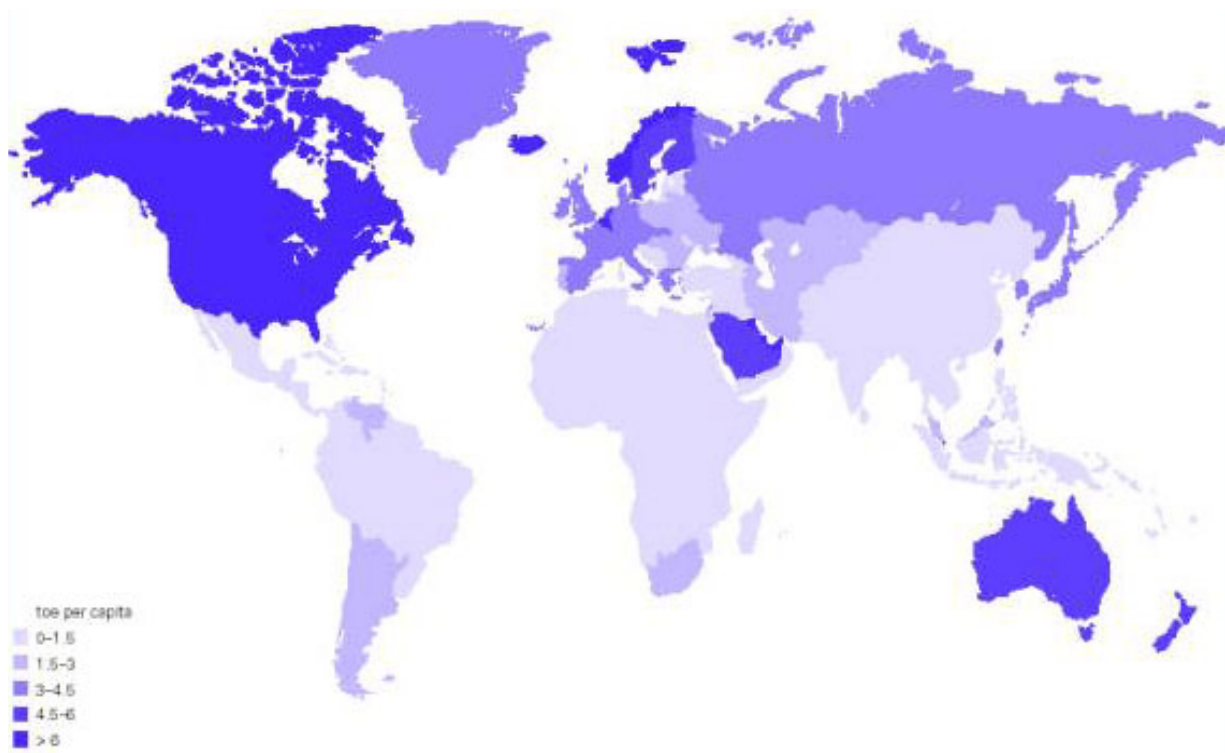


Figura 2.5. Consumo energético mundial por capita, en toe (BP, 2003)

Utilizada como indicador del consumo energético, una tonelada equivalente de petróleo (**toe**) se corresponde aproximadamente a:

- Energía calorífica: 10 millones de kilocalorías
- Electricidad: 11.63 GWh
- Combustibles fósiles: 1.02 toneladas crudo iraní
1.15 gas de refinería
0.5 carbón

Es interesante analizar con más detalle como se estructura la producción energética mundial. En la Tabla 2.3 se resume la evolución entre 1973 y 2001 de diferentes parámetros del consumo energético. Los datos han sido obtenidos en parte del informe de la Agencia Internacional de la Energía (IEA, 2003); el crecimiento medio anual se indica de forma orientativa ya que en ciertos casos la tendencia ha sufrido variaciones más complejas (crisis petroleras, efectos del 11 de septiembre 2001, etc.).

Se consideran como fuente de energía primaria aquellas que se encuentran en la naturaleza (renovable o no) que será utilizada como fuente de energía secundaria (electricidad, combustibles de motores, etc.):

- Productos petrolíferos (crudos, derivados, gas, etc.)
- Carbón
- Gas natural
- Combustible renovables (madera, biomasa, etc.)
- Nuclear, Hidroeléctrica
- Otras (solar, eólica)

Los productos petrolíferos representan la principal fuente de energía primaria como combustible fósiles, utilizada principalmente en el sector del transporte (como combustible motor). Como indicativo, la producción de productos petrolíferos pasó de unos 300 millones de toneladas antes de la 2ª Guerra Mundial a los más de 3000 millones en la actualidad.

Sin embargo, en el sector de la producción eléctrica, el petróleo ha perdido su influencia: la energía eléctrica nuclear ha aumentado enormemente, concentrándose sorprendentemente en las regiones en desarrollo.

En paralelo al crecimiento económico y/o energético, la emisión de CO₂, a la que se asocia a los problemas climáticos del efecto invernadero, también ha aumentado entorno a un 1-2% anual.

Capítulo II. La contaminación marina por hidrocarburos
La producción y el transporte marítimo de hidrocarburos.

		1973	2001	Crecimiento medio anual
Fuentes de energía primaria				
Total (Mtoe)		6034	10029	2.4%
Productos(%):	Petrolíferos	45.1	35	-0.8%
	Carbón	24.8	23.3	-0.2%
	Gas natural	16.2	21.2	1.1%
	Combustibles renovables	11.1	10.9	-0.1%
	Nuclear	0.9	6.9	23.8%
Producción eléctrica mundial				
	Total (TWh)	6117	15476	5.5%
Productos(%):	Carbón	38.3	38.7	0.0%
	Petróleo y derivados	24.7	7.5	-2.5%
	Gas	12.1	18.3	1.8%
	Nuclear	3.3	16.6	14.4%
	Hidroeléctrico	21	16.6	-0.7%
Consumo petróleo y refinados				
	Total (Mt)	2142	3008	1.4%
Sectores (%):	Transporte	42.2	57	1.3%
	Industria	26.2	19.7	-0.9%
	Otros (agricultura)	25.2	17.1	-1.1%
	No-energético	6.4	6.2	-0.1%
Producción y refinado del crudo				
	Total (Mt)	2860	3548	0.9%
Productos(%):	Fueles residuales	33.8	17.7	-1.7%
	Destilados medios	26	32.1	0.8%
	Gasolinas	21	24.2	0.5%
Emisión CO2 por combustibles				
	Total (Mt)	15700	23683	1.8%
Combustibles(%):	Petróleo	50.7	42	-0.6%
	Gas	14.4	20	1.4%
	Carbón	34.9	38	0.3%

Tabla 2.3. Balance del consumo energético mundial entre 1973 y 2001.

(según IEA, 2003)

2.1.2 La producción y transporte de petróleo

La producción y consumo mundial de crudos del petróleo ronda los 3500 millones de toneladas anuales, aumentando anualmente entre 1-2%. Con casi 600 millones de toneladas, Europa es el principal importador de petróleo del mundo, seguido de los EEUU y de Japón (ver Figura 2.6). Así, cerca de la mitad de la producción en refinerías se concentra entre Europa y EEUU.

Con relación a los principales países exportadores, un 50% de los productos petrolíferos provienen de Oriente Medio. La diferencia de la localización entre centros exportadores e importadores se refleja en las grandes transferencias mundiales, realizadas fundamentalmente vía marítima (Figura 2.7).

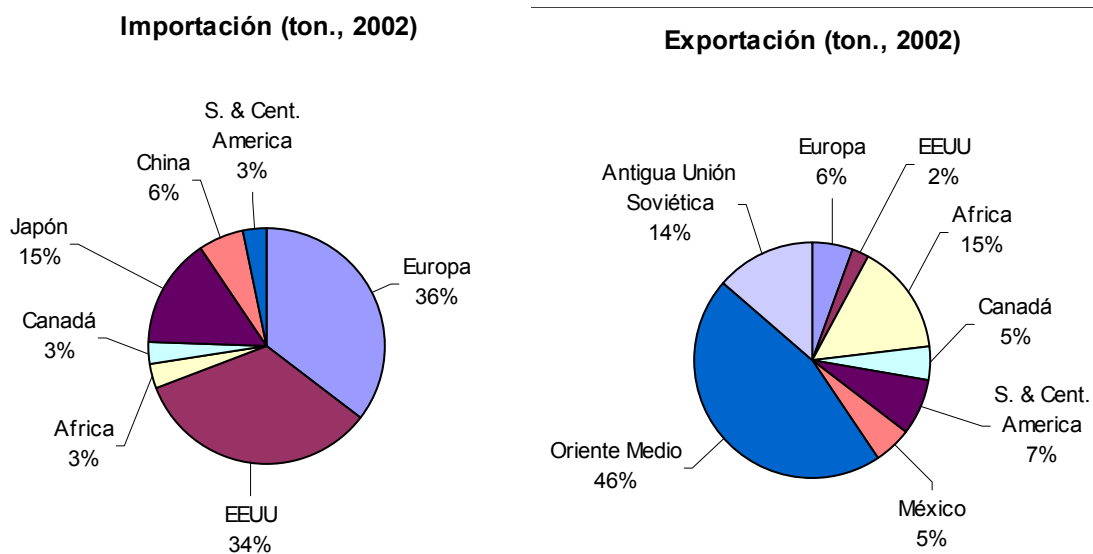


Figura 2.6 Principales países exportadores e importadores de productos petrolíferos
(a partir de BP, 2003)

De los aproximadamente 430 Mt de petróleo crudo transportados anualmente por vía marítima hacia puertos europeos (Tabla 2.4), cerca de la mitad fueron transportadas por el Mediterráneo mediante petroleros de tipo medio, denominados *Suezmax* o *Africamax* (Tabla 2.5) según la ruta utilizada.

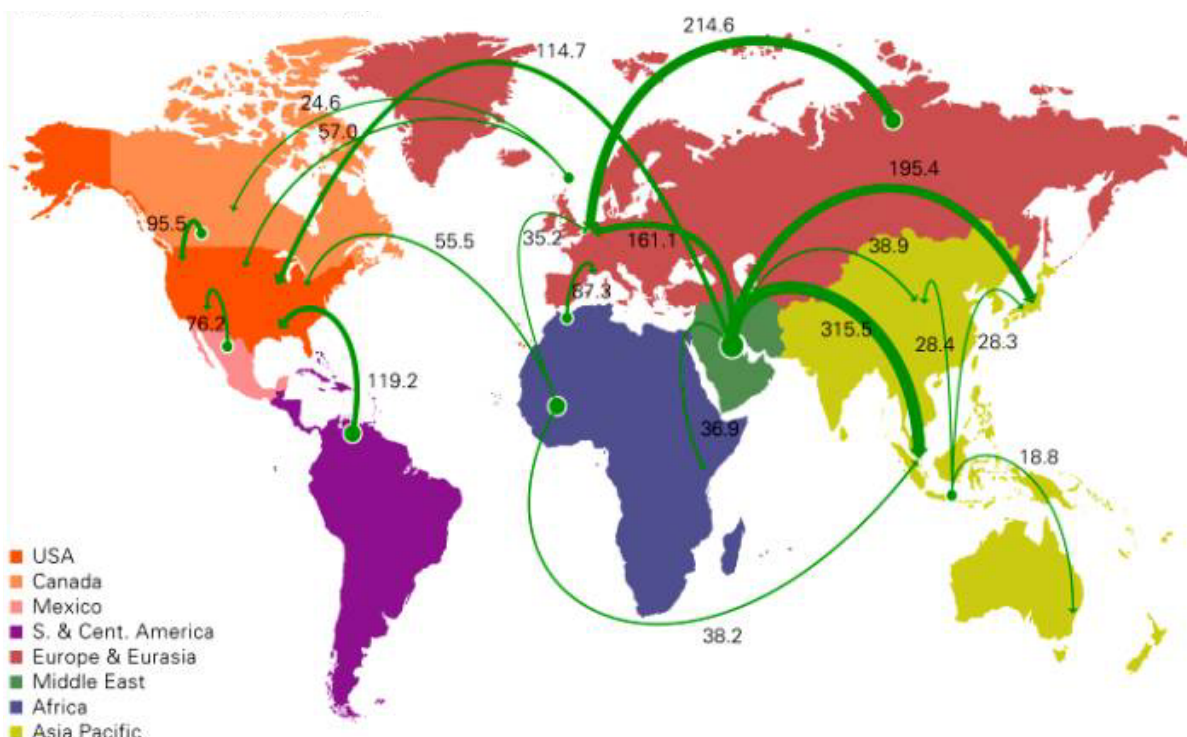


Figura 2.7 Balance mundial del comercio de productos petrolíferos, en Mt (BP, 2003)

Cifras anuales (2001)	Volumen (Mt)	Porcentaje
Petróleo Crudo	3500	100%
Refinados (fueles pesados)	600	17%
Transportados vía marítima	2129	61%
(% el transporte marítimo total)		37%
crudos	1650	78%
refinados	479	22%
Transportados a Europa vía marítima	577	27%
crudos	427	74%
refinados	150	26%

Tabla 2.4. Balance del consumo y transporte mundial de petróleo y refinados
(elaboración propia)

El principal producto transportado es el petróleo crudo, de mayor valor económico, seguido del resto de productos derivados, concretamente de fueles y otros productos pesados. Normalmente, la flota destinada a los productos más valiosos se encuentra en mejores condiciones y es de mayores dimensiones que la destinada a los productos residuales.

La globalización del transporte marítimo y el endurecimiento de la competitividad del mercado han tenido una seria consecuencia sobre las condiciones del transporte. Esta

competitividad se traduce en una búsqueda constante de la reducción de los gastos para aumentar los beneficios. Los buques recorren cada vez distancias mayores (aumento del factor millas x tpm) y para ello tienen que ser capaces de abastecerse en cualquier lugar del mundo. Así, las exigencias sobre el tipo de combustible se han reducido.

Esto ha llevado a la industria petroquímica a proponer productos de combustible marítimos – *bunkers* – de bajo coste, obtenidos a partir de productos refinados residuales muy pesados. Los motores han evolucionado para adaptarse a estos productos tan densos y viscosos. La capacidad de los depósitos de combustible de los grandes buques se sitúa en torno a las 4000 toneladas, pudiendo consumir entre 50 y 150 toneladas por día.

Técnicas como el mezclado con productos más ligeros o el craqueado catalítico (*cracking*) permiten obtener actualmente fueles mucho más pesados pero válidos para la combustión (HFO o *heavy fuel oil*, Orimulsion, etc.). Esto implica una modificación de los *centros* de combustión (hornos, centrales y motores) pero también afecta al ciclo transporte-almacenamiento: los fueles pesados deben calentarse previamente a su distribución y consumo. Así, normalmente los productos más pesados son transportados en calientes para facilitar su descarga en puerto. (*)

Nota (*): ese es uno de los motivos por los cuales la carga del *Prestige* tardó tanto en enfriarse hasta alcanzar la temperatura del agua.

2.1.3 Los corredores marítimos

Por razones geográficas y/o estratégicas, en ciertas zonas del planeta se concentra un elevado tráfico marítimo. Típicamente en los estrechos o canales de paso se establecen corredores marítimos, ordenando el tráfico en un sentido y otro, también llamado *Dispositivo de Separación de Tráfico* (DST). Así, los buques circulan paralelos a la costa, a una cierta distancia para preservar el sistema costero cercano.

La concentración del tráfico en estos corredores es inevitable. Desafortunadamente, esto queda reflejado en el medio marino no solo por la acumulación histórica de accidentes marítimos sino también por la contaminación crónica causada por el paso de buques: gases de combustión, vertidos continuados de residuos, acumulación de componentes tóxicas de las pinturas anti-incrustantes (TBT), etc. Para hacerse una idea de la magnitud del tráfico, por el DST de Finisterre circulan en media más de 110 buques diarios, 34 de ellos cargados con mercancías peligrosas.

A nivel del transporte marítimo mundial, el petróleo y sus derivados representa la mercancía principal: un 37% del tonelaje total transportado. Como hemos visto anteriormente, de estas mercaderías, cerca de un 80% es petróleo crudo transportado fundamentalmente en petroleros de grandes dimensiones.

En la Figura 2.8 se refleja como se concentran en las grandes rutas del transporte marítimo algunos de los accidentes históricos más importantes.

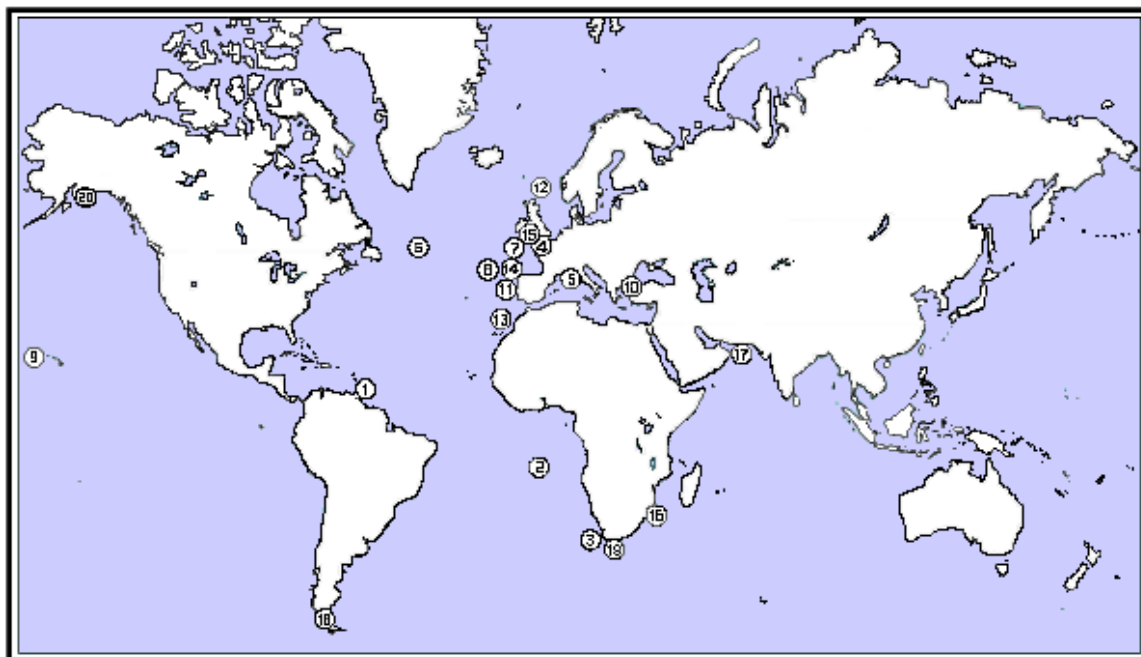


Figura 2.8 Accidentes más importantes en las principales rutas marítimas (www.itopf.com)

1. Atlantic Empress
2. ABT Summer
3. Castillo de Bellver
4. Amoco Cadiz
5. Haven
6. Odyssey P.
7. Torrey Canyon
8. Urquiola
9. Hawaiian Patriot
10. Independenta
11. Jakob Maersk
12. Braer
13. Khark
14. Aegean
15. Sea Empress
16. Katina Sea
17. Assmi
18. Metula
19. Wafra
20. Exxon Valdez

El tráfico marítimo se ve articulado en parte por el establecimiento de las Zonas de Exclusión Económica (ZEE). En estas áreas o franjas marítimas los Estados Ribereños establecen sus derechos soberanos para la explotación de los recursos económicos del mar, del fondo marino y del subsuelo. Así, en este espacio marítimo propio de 200 millas mar adentro se concentra la pesca (*), la protección del medio ambiente marino o la investigación científica.

El hecho de alejar de la costa las rutas de los buques, especialmente en un DST como el de Finisterre (cuyas condiciones océano-meteorológicas suelen ser desfavorables), puede ser contraproducente puesto que la reordenación del tráfico marítimo puede complicar la maniobrabilidad de los buques así como el acceso de los equipos de salvamento en una situación de peligro.

* Nota: si bien el concepto de zona de exclusión parte de anteriores Conferencia del Derecho Internacional del Mar, fueron los EEUU los que en 1977, y de forma unilateral, fijaron en 200 millas náuticas la ampliación de su zona de pesca, permitiendo faenar en este área sólo a ciertas naciones tras negociaciones directas (y recíprocas).

2.2 Organización del sector del transporte marítimo

La globalización del comercio y la creciente demanda en combustibles fósiles ha provocado poco a poco una modificación del mercado del transporte marítimo.

Para entender el porqué de los accidentes marítimos debemos analizar como está estructurando el transporte marítimo; cuales son las causas principales de lo que parece ser una degradación del sector, referente a la seguridad, a las condiciones laborales, y el

porqué de la (mala) percepción por parte de la sociedad de este sector. Por otra parte detallaremos que papel juegan las organizaciones internacionales en materia de normativas y reglamentaciones técnicas.

El armador, propietario del buque, está facultado para registrar las acciones de dicho buques. Hoy en día, y debido en parte a la globalización, el sector marítimo está cada vez más atomizado: abundan los pequeños armadores que tienen un único barco, de tipo pequeño o mediano y generalmente obsoleto (buques denominados *sub-estándar*) que alquilan sus servicios al mejor postor. El armador está representado en cada puerto por el consignatario y descarga toda la responsabilidad del devenir del buque al capitán.

El fletador, quien contrata el buque para transportar una determinada mercancía no está vinculado al estado del buque (a sus requisitos técnicos). De hecho, el propietario de la carga puede cambiar a lo largo del trayecto. El capitán, figura crucial en el buque, suele ser injustamente acusado de responsabilidades en caso de derrames accidentales de la carga.

Anteriormente, las grandes compañías petrolíferas disponían de sus propios buques, siendo armadores y fletadores a la vez. Por la evolución del mercado (fraccionamiento de los costes y de responsabilidades) esto ya no es así: se han diversificado los agentes intermediarios, resultando muy difícil establecer una línea clara propietario / responsable de la carga y del buque. Por otro lado, el abanderamiento “*de conveniencia*” suele utilizarse como método para reducir los requerimientos técnicos y laborales a bordo.

Como muestra, solo tenemos que comparar la evolución de las crisis de derrames de petroleros más célebres: el *Exxon Valdez* pertenecía a la compañía Exxon-Oil (1989), el *Erika* pertenecía a Total-Fina (1999), ambas señaladas como responsables finales de la catástrofe. Sin embargo no ha sucedido lo mismo con el *Prestige* (2002).

Es curioso comprobar como han evolucionado históricamente los accidentes marítimos: antaño, los naufragios cerca de la costa entregaban en forma de ofrenda, parte de la carga del buque (tesoros, víveres, etc.) a los ribereños. Hoy en día, exceptuando raras excepciones (*), es difícil imaginar un incidente marítimo que no conlleve una contaminación del medio marino...

Nota (*): es curiosa la anécdota de arribadas de patos y otros juguetes de goma después de once años derivando en el mar, cruzando varios estrechos y océanos: <http://www.mindfully.org/Plastic/Ocean/Rubber-Duckies-Plastic31jul03.htm>

2.2.1 Tipos de buques petroleros

Los petroleros – también llamados buque/tanque (B/T), *tankers* en inglés – están diseñados para poder transportar a granel productos petrolíferos u otros cargamentos líquidos inflamables. Como ya vimos los petroleros constituyen, en tonelaje, el porcentaje más importante del conjunto de la flota mundial.

La capacidad de un buque puede expresarse según su *Tonelaje de Peso Muerto* (TPM), que incluye la medida en peso de su capacidad de carga (del *cargo*) más un tonelaje propio del buque (consumibles, etc.) que suele rondar entre las 4.000 y las 6.000 toneladas. De esta forma, las TPM de un barco nos da una buena aproximación de su capacidad de carga.

Dicho esto, los buques-petroleros son los de mayor capacidad de la flota mundial: los *superpetroleros* (ULCC o VLCC) pueden llegar a transportar hasta 300.000 y 400.000 TPM (Tabla 2.5). La capacidad de estos buques ha ido aumentando en las últimas

décadas en conjunción al desarrollo de las infraestructuras portuarias para poder albergar petroleros de más de 400 metros de eslora.

Generalmente, los grandes petroleros suelen transportar petróleo crudo mientras que los productos refinados, en especial aquellos de menor interés económico son transportado en una flota “atomizada” de pequeños buques (de entre 5.000 y 50.000 TPM).

Tipo de buque	Toneladas peso muerto (TMP)
ULCC (<i>Ultra large crude carrier</i>)	> 300.000
VLCC (<i>Very large crude carrier</i>)	150.000 – 300.000
<i>Suezmax</i>	100.000 – 150.000
<i>Aframax</i>	50.000 – 100.000
<i>Coastal tanker</i>	< 50.000

Tabla 2.5. Tipos de petroleros según tonelaje

El siguiente parámetro importante del diseño de los petroleros es la configuración y disposición de los tanques de lastre respecto a los tanques de carga. Según estos tanques de lastre limpio (*clean ballast tank*, CBT) protegen o no parte de la carga, se distinguen tres tipologías:

- buques de casco único (sin protección de la carga)
- doble costado o doble fondo: lastres situados en los laterales de la carga o bajo ella, respectivamente
- doble casco, en doble L o en U (separación total de la carga)

Esta disposición de los tanques de lastrado tiene consecuencias de cara a la estabilidad, seguridad y en el volumen máximo de carga transportada.

En la actualidad, aproximadamente la mitad de los petroleros ya tienen la configuración de doble casco, cuya construcción exclusiva fue obligatoria a partir de 1996 según lo establecido por la Organización Marítima Internacional (OMI) en 1992. En otro tipo de buques, el uso del doble casco está más extendido, en especial para el transporte de sustancias químicas tóxicas.

Los petroleros fabricados antes de 1996 de casco único son objeto de especial atención por parte de la normativa internacional. En particular, el Convenio internacional **MARPOL 73/78** para la Prevención de la Contaminación Marina por Buques, auspiciado por la OMI, clasifica en los Anejos 13F y 13G a los buques petroleros de casco único según la configuración de sus tanques de lastre y su TPM:

- Categoría 1 (*pre-MARPOL*):
 - petroleros de crudo, fueles y aceites pesados > 20.000 TPM
 - petroleros de refinados > 30.000 TPM
 - sin tanques de lastre separados (alrededor de la carga) (construidos generalmente antes de 1982)
- Categoría 2 (*MARPOL*):
 - petroleros de crudo, fueles y aceites pesados > 20.000 TPM
 - petroleros de refinados > 30.000 TPM

- con tanques de lastre separados (alrededor de la carga)
(construidos generalmente entre 1982 y 1996)
- Categoría 3 :
 - petroleros de capacidades inferiores (5.000 - 20.000 TPM)
(buques destinados al tráfico regional)

Sin embargo, la eliminación progresiva de los buques más antiguos de la Categoría 1 es abordada de forma distinta en las diferentes normativas marítimas.

Por otro lado, el siguiente hecho a destacar del conjunto de la flota mundial es el aumento de la edad media de los buques petroleros: entre 1995 y 2000, la edad media ha pasado de 16.7 a 18.3 años, mientras que la media de edad del resto de la flota (buques contenedores, graneles sólidos, etc.) ronda los 14 años (UNCTAD, 2002; Zamora, 2003). Esta tendencia al envejecimiento de la flota es preocupante, sabiendo que la fase de obsolescencia se sitúa a partir de los 20 años:

- el 34% de la flota mundial tiene más de 20 años
- más del 50% de los buques petroleros naufragados entre 1989 y 1998 tenían entre 20 y 24 años. En particular, el *Erika* y el *Prestige* tenían 25 y 26 años respectivamente cuando se hundieron.

En efecto, el envejecimiento-obsolescencia de los buques se apunta como una de las causas de los accidentes marítimos. Pero siendo más rigurosos es el abandono, el desgaste excesivo de la estructura, en definitiva, la falta de mantenimiento los que llevan al colapso del barco. Por ellos, es necesario garantizar su calidad mediante inspecciones regulares del estado del buque.

Un fenómeno complejo, todavía en estudio, es el fenómeno de fatiga de los materiales del barco: la reiterada acumulación de esfuerzos y tensiones en las chapas reducen su capacidad de resistencia, pudiendo llegar a colapsar muy por debajo de su resistencia inicial.

Estructuralmente, hay dos orígenes de fatiga: por efectos mecánicos (oleaje, golpes de mar, balanceo del buque) o por efectos de cambios térmicos (calentamiento / enfriamiento de la carga en el caso del trasvase de fueles pesados) (*). A todo ello, hay que añadir la inevitable corrosión de toda estructura metálica marina.

2.2.2 Banderas de conveniencia y Sociedades de Clasificación

El abanderamiento de los buques se ha desvirtuado en los últimos decenios. Tradicionalmente, la bandera del buque constituía una señal de identidad, vinculada al país donde se ejercía el control económico de la actividad del buque. Sin embargo, desde hace tiempo, ese vínculo ha desaparecido completamente debido a las banderas de conveniencia. En la actualidad, más de la mitad de la flota mundial está registrada en

* **Nota Prestige:** el informe técnico de la propia sociedad que clasificó el *Prestige*, la *American Bureau of Shipping*, describe que en las operaciones de reparación en China se soldaron una serie de planchas nuevas. Es sabido que en las estructuras metálicas, las soldaduras *fragilizan* las zonas de unión, ya que se concentran tensiones residuales que aceleran los procesos de corrosión y debilitamiento de la chapa. Tras la reparación, el *Prestige* efectuó labores de *lightering*, es decir fue usado como buque-pontona de abastecimiento, acumulando probablemente fatiga tanto térmica como mecánica. Todos estos factores podrían ser causantes de la avería inicial (13/11/02).

estos países de “registro abierto”, liderados por Panamá, Liberia, Malta, Bahamas o Chipre.

Los países “Banderas de Conveniencia” ofrecen al armador del buque unas condiciones de explotación muy cómodas. En un principio, la bandera de conveniencia no tiene porqué ser sinónimo de mala calidad. Sin embargo, estos países suelen ser paraísos fiscales, con fuertes exenciones tributarias que permiten reducir costes administrativos (registro, mantenimiento, impuestos, etc.). Típicamente, estas banderas de conveniencia se asocian a países sin una administración marítima robusta y responsable. De esta forma, el explotador del buque acaba reduciendo indirectamente la seguridad integral del buque.

De la misma forma, la permisividad se refleja en el plano laboral: el personal a bordo suele tener unas condiciones laborales muy precarias, mal formado y de distintas nacionalidades.

Las Sociedades de Clasificación son entidades privadas encargadas de la revisión técnica de los buques. De esta forma, certifican la aplicación de las normativas de seguridad promovida por los convenios internacionales, tarea reservada teóricamente a la Administración Marítima del Pabellón del buque. Así, en el caso de las banderas de conveniencia, la responsabilidad del control efectivo del estado del buque recae sobre las Sociedades de Clasificación.

La crisis del hundimiento y contaminación del *Prestige* es una buena muestra de la globalización: el barco fue fabricado en Japón (1976), reparado en China (2001), abanderado en Bahamas, certificado en EEUU por la *American Bureau of Shipping*, con carga rusa, con tripulación filipina, con capitán griego, zarpó de Rusia en dirección a Singapur, solicitó auxilio por emergencia frente las costas españolas, hundiéndose en aguas internacionales, afectando y contaminando entre otros países, a Portugal, España y Francia.

2.3 Las Normativas y los Grandes incidentes marítimos

Los avances en cuanto a seguridad, normativas e innovación tecnológica suelen estar ligados a grandes incidentes. A raíz de los accidentes marítimos más tristemente famosos se han establecido normativas internacionales como se resume en la siguiente Tabla 2.6.

Normativa / Año	Accidente	Institución promotora	Objetivo
SOLAS, 1914	<i>Titanic</i> , 1912	Internacional	Seguridad de la vida humana en el mar
MARPOL, 1973	<i>Torrey Canyon</i> , 1967	Internacional - OMI	Prevención de la contaminación desde embarcaciones
OPA, 1990	<i>Exxon Valdez</i> , 1989	E.E.U.U.	<i>Tolerancia cero</i> , restricciones tráfico marítimo
Paquetes Erika-I y II (2000)	<i>Erika</i> , 1999	Unión Europea	Restricciones tráfico de petroleros

Tabla 2.6. Normativas internacionales y grandes accidentes marítimos

A lo largo del tiempo (y según se suceden nuevos accidentes), estos convenios se han ido completando con nuevos Anejos y modificando a través de diversos Protocolos.

En el plano normativo, existen dos grandes líneas de trabajo: el garantizar la seguridad marítima (condiciones sobre la navegación, sobre el personal embarcado, sobre la recepción en los puertos, etc.) y la prevención de la contaminación marina (medidas preventivas, seguridad de la carga, etc.). En este sentido, los buques pueden ser fuente de contaminación por vertidos propios voluntarios (sentinas, aguas residuales, residuos, etc.) o por derrame involuntario de su carga.

2.3.1 Consideraciones generales de la problemática internacional

A nivel mundial, es la Organización Marítima Internacional (OMI), dependiente de la ONU, la encargada de elaborar los convenios marítimos internacionales. Sin embargo, no se establecen sanciones ni coacciones para los posibles infractores. Cada país o Estado ha reaccionado de forma distinta, velando más o menos por la aplicación de las normativas internacionales.

El Convenio internacional MARPOL 73/78 constituye una combinación de dos tratados anteriores de 1973 y de 1978, complementado con toda una serie de Protocolos específicos. Este convenio, en vigor desde 1983, nació de la necesidad de establecer un acuerdo internacional para imponer restricciones a la contaminación del mar, de la tierra y del aire imputables a los buques. En sus diferentes anexos se abarca todos los aspectos técnicos de la contaminación procedente de los buques: contaminación por hidrocarburos (Anexo-I), por sustancias nocivas líquidas (A-II) y por contenedores o paquetes (A-III), por las aguas sucias de los propios buques (A-IV) y por sus residuos sólidos (A-V) y en prevención de la contaminación atmosférica (A-VI). Entre otras disposiciones, MARPOL 73/78 hace toda una serie de consideraciones sobre los tanques de lastre y del lavado de dichos tanques.

Lamentablemente, la relativa sencilla implementación de soluciones técnicas choca con toda una serie de problemas e intereses de tipo político-económico. La presión de las compañías navieras y petroleras suele complicar las decisiones de tipo socio-político.

En toda reglamentación marítima se definen unos parámetros de clasificación centrados en los aspectos técnicos del buque (edad, tipología, tonelaje, etc.) pero también tienen en cuenta el tipo y volumen de la carga transportada (toxicidad, peligrosidad, etc.). Como ejemplo reciente, a raíz de la catástrofe del *Prestige* la U.E. plantea la prohibición de transportar productos pesados residuales en un cierto tipo de buques.

Las normativas deben reglar los problemas más frecuentes encontrados a lo largo de la historia de los accidentes marítimos: cuáles son las causas / más típicas de los accidentes? Errores humanos, defectos técnicos, inclemencias o situaciones oceano-meteorológicas extremas? Los factores “impredecibles” son siempre relativos; las catástrofes suelen producirse tras una acumulación de problemas y defectos, combinándose riesgo y vulnerabilidad.

Por otro lado, ante un incidente será la gestión de la situación que debería reducir la catástrofe, controlarla. Es imposible predecir las catástrofes (especialmente de origen antrópico), por tanto habrá que estar preparados para su gestión.

Uno de los caballos de batalla de las normativas es el calendario de aplicación de las propuestas técnicas, de su implementación efectiva. Si bien las propuestas son parecidas en muchas normativas, la divergencia en las fechas de implementación provoca desajustes y desigualdades a nivel mundial. En particular, el endurecimiento de las

normas norte-americanas sobre transporte marítimo (impuestas de forma unilateral) ha provocado en el último decenio una relocalización del (peor) tráfico marítimo hacia otras aguas, en particular hacia agua europeas.

2.3.2 Convenios internacionales sobre Responsabilidad Civil (CLC) y Fondos de Indemnizaciones (IOPC)

El objetivo del Convenio internacional sobre Responsabilidad Civil (CLC, 1969 y Protocolo-enmienda del 1992) rige la responsabilidad de los propietarios de los buques antes los daños ocasionados por una posible contaminación por hidrocarburos. Así, mediante el establecimiento de un sistema de seguro de responsabilidad obligatorio se garantiza la adecuada indemnización a las víctimas afectadas por la contaminación marina debidos a accidentes marítimos que involucren únicamente buques tanques (petroleros) y sus cargas. El responsable civil de esos daños es el propietario del buque, que tiene derecho a limitar su responsabilidad.

Este techo de responsabilidad ha ido aumentando con el tiempo y la cobertura territorial se ha extendido hasta la zona económica exclusiva (ZEE) de cada Estado Miembro. El apartado de la indemnización por daños causados al medio ambiente se ajusta a los gastos de restauración / limpieza del medio contaminado.

Existen sin embargo dos puntos débiles del Convenio relativos a la ratificación o aplicación del mismo. Por un lado, el Protocolo de 1992 se estableció de tal forma que no fuera necesaria la ratificación de los EEUU para entrar en vigor en 1996. Como segundo país importador de petróleo, los EEUU fijaron en su legislación de 1990, de forma unilateral y al margen del Convenio internacional un sistema de responsabilidad civil ilimitada. Por otro lado, más grave si cabe es la posibilidad por parte de los Estados firmantes del Protocolo a permitir la expedición de certificados de buques matriculados en Estados no firmantes de dicho Protocolo-92, rebajando así sus límites de responsabilidad.

En vistas de este nuevo Convenio de Responsabilidad Civil, que por un lado resultaba gravoso para las compañías propietarias de los buques y por otro no cubría suficientemente las indemnizaciones de los accidente mayores, se estableció un Convenio para la constitución de unos *Fondos Internacionales de Indemnización de Daños debidos a la Contaminación por Hidrocarburos* (1971, enmendado por el Protocolo de 1992). Estos fondos FIDAC 71/92 (o *IOPC Fund* en inglés) eleva el límite a unos 182 millones de dólares (Nota: en la actualidad, se está ratificando un nuevo techo de cerca de 280 millones de dólares). Este fondo está constituido por las propias compañías petrolíferas de los Estados signatarios como contribución a la preservación del medio.

2.3.3 Normativa norteamericanas (OPA '90)

El accidente del petrolero Exxon Valdez y su posterior derrame en las costas de Alaska en 1989 provocaron una reacción sin precedentes en los EE.UU. A raíz de este accidente, el gobierno norte-americano estableció la *Oil Pollution Act* (OPA 1990) que supuso un hito en las normativas internacionales sobre contaminación marina. Por un lado afronta diversos problemas del transporte marítimo de combustibles, legislando sobre diversos aspectos tanto de responsabilidad civil de los armadores como sobre tipología de los buques. En parte, esta legislación roza los límites del Derecho Marítimo Internacional,

imponiendo restricciones unilaterales que, en un mundo globalizado, afectan al conjunto del transporte marítimo.

El objetivo de la OPA fue impulsar y mejorar la capacidad nacional para prevenir y responder a los vertidos de petróleo, a partir de tres grandes líneas de actuación:

- Disposiciones legales (*Provisions*):
 - responsabilidad en la contaminación, en particular de las obligaciones del culpable de la contaminación (*responsible party*)
 - ampliación de la capacidad de actuación de los gobiernos federales
 - movilización de fondos y recursos para la respuesta
- Fondo de Compensaciones (*Oil Spill Liability Trust Fund*) de hasta 1000 millones de dólares, que se superponen a las indemnizaciones obtenidas de los responsables de una posible contaminación
- Plan Nacional de Contingencia de la contaminación por hidrocarburos y sustancias peligrosas (el *NCP*) : actualización de los requisitos hacia la industria y los gobiernos:
 - el Gobierno Federal debe coordinar la respuesta pública o privada en ciertas situaciones de contaminación
 - cada *Área* (federal, estatal y local) deberá establecer un Plan de Contingencias específico y detallado para el Área en cuestión, , estableciendo los recursos necesarios para la lucha contra la contaminación
 - cada empresa u operador que desarrolle actividades que puedan suponer un riesgo para el medio ambiente deben preparar sus propios Planes de coordinación de la Actuación
- Regulación de las penalizaciones: el gobierno Federal refuerza su autoridad para la vigilancia del incumplimiento de las disposiciones

Así, la OPA prevé toda una serie de instrumentos de seguimiento-policía y de planificación de las crisis de contaminación en las zonas costeras. En la estructura del Comando Unificado, órgano responsable de la gestión de una crisis, participan los representantes del Estado Federal afectado, los asesores expertos (*U.S. Coast Guard* y/o la NOAA) y el responsable del incidente que asume en parte los costes de limpieza y restauración. Información más detallada se puede consultar en:

<http://www.epa.gov/oilspill/opaover.htm> .

En definitiva, e independientemente de ciertas actuaciones criticadas a nivel internacional, los EE.UU. no han conocido desde entonces (1990) ningún otro gran caso de derrame de hidrocarburos en sus aguas.

2.3.4 Evolución de las Normativas en la Unión Europea

La Unión Europea, como respuesta al accidente y vertido del *Erika* a finales del 1999 dispuso una serie de propuestas legislativas, conocidas como los *Paquetes Erika-I* y *Erika-II*. Este conjunto de propuestas, elaboradas por la Dirección General de Transportes y Energía (DGTE) de la Comisión Europea, se centran en los problemas de inspección y seguridad aplicables a los buques del tráfico marítimo europeo.

Las propuestas del primer bloque (marzo 2000) son principalmente refuerzos de prácticas ya existentes, presentadas a modo de declaración de intenciones y posicionamiento de la DGTE frente a la crisis del *Erika*. En el segundo bloque (diciembre

2000) se plantean más detalladamente propuestas de tipo más concreto y aplicado. Tras la crisis del *Prestige* (todavía de actualidad), la Comisión ha intentado acelerar todos los procesos abiertos años anteriores tras el *Erika*.

Propuestas del primer paquete, marzo 2000:

- Modificación de la Directiva 95/21 sobre el *Port State Control*, orientado a **mejorar los procedimientos de inspección** de aquellos buques atracados en puertos comunitarios. Esto pretende reforzar las prácticas ya establecidas por el Memorando de París (1982) sobre las inspecciones anuales por parte del Estado rector del puerto a un 25% mínimo de los buques no europeos atracados en sus aguas. Sin embargo, este porcentaje de revisión es considerado en el conjunto de puertos nacionales, y no sobre cada puerto individualmente.
- Modificación de la Directiva 94/57 sobre las Sociedades de Clasificación, dirigida a endurecer los **requisitos de calidad** que son exigidas a aquellas Sociedades que actúen en la Unión Europea.
- Una propuesta de Reglamento sobre la aceleración de la implantación del **doblo casco** en los buques.

Estas propuestas, aprobadas en diciembre 2001, son de aplicación a aquellos buques de pabellón europeo y a los que hagan escala en algún puerto comunitario. Lamentablemente, esto no supone ninguna restricción ni control al tráfico en aguas cercanas al litoral europeo. Así, muchos buques “proscritos” sub-estándares que por condiciones de seguridad, navegabilidad o por el tipo de carga que transportan no cumplen las normativas europeas y que han sido incluidos en las listas negras del MOU (*Memorandum of Undersanting* de París) siguen surcando aguas comunitarias.

Tras el hundimiento del *Erika*, la Comisión propone un calendario de retirada de los buques de casco único más *adelantado* a las normativas internacionales pero finalmente no es adoptado por el Parlamento Europeo (*).

Propuestas del segundo paquete, diciembre 2000:

- Puesta en marcha de un **sistema comunitario de información** y control sobre el tráfico marítimo (Directiva 2002/59/CE). El objetivo de dicho sistema es facilitar a las autoridades europeas costeras todo tipo de información del estado, ruta o expediente de aquellos buques que estén en aguas comunitarias. Se aplicarían ciertas medidas como el uso obligatorio de las controvertidas cajas negras (VDR, *Voyage Data Recorder*) o el intercambio y transparencia de información entre estados relativa a buques peligrosos y/o con antecedentes. Finalmente se insta a los estados miembros a definir puertos o lugares de refugio para buques en dificultades.
- Establecimiento de una Administración marítima comunitaria, para el seguimiento y control del correcto cumplimiento de la legislación en materia de seguridad. La reglamentación de esta **Agencia Europea de Seguridad Marítima (EMSA)** contemplaría la creación de un cuerpo propio de vigilancia, de auditoria e inspección.

* Así, según el calendario inicial propuesto y dadas las características del *Prestige*, el buque no hubiera podido acceder a ningún puerto europeo desde la fecha de aplicación del Reglamento (septiembre 2002), un mes antes de su hundimiento...

- Creación de un **fondo europeo de compensación** de los daños causados por contaminación. Este fondo COPE (*Compensation for Oil Pollution in Europe*) sería complementario a los ya existentes, el CLC (*Civil Liability Convention*) y el IOPC (*International Oil Pollution Compensation Fund*, 1971-1992), desplazando el actual techo de 200 a los 1000 millones de euros.

Las dos primeras medidas fueron aprobadas en junio 2002 por el Parlamento; sin embargo, la creación de los Fondos COPE sigue bloqueados.

Tras la catástrofe del *Prestige*, la Comisión Europea reaccionó a principios de diciembre 2002 anticipando (desbloqueando) la aprobación y puesta en marcha de dicha agencia. Desde un punto de vista legislativo, los problemas ya han sido abordados, sin embargo el proceso de aprobación y aplicación de las leyes es largo, recayendo la responsabilidad en cada Estado miembro.

2.4 Conclusiones: evaluación de las actuaciones

Distorsión de las normativas y su aplicación

La continua redacción y actualización de las normativas marítimas internacionales sobre seguridad y prevención de la contaminación se ven difícilmente reflejadas en la práctica. El problema fundamental reside en la falta a nivel internacional de un control efectivo de la aplicación de la legislación mediante una agencia de *policía marítima*. Así, ante un caso de contaminación, las sanciones penales (la responsabilidad civil) deben ampliarse, involucrando a los diferentes agentes, no solo al armador pero también al propietario de la carga o a la sociedad de clasificación.

Por otro lado, se da la situación paradójica de aquellos países desarrollados que, ratificando los convenios internacionales, aprueban las prácticas de las banderas de conveniencia, ligadas a los países menos desarrollados.

Las aplicaciones unilaterales de normativas *regionales* muy restrictivas, como el caso de la *Oil Pollution Act* (OPA, 1990) en los EEUU, desencadenan una alteración internacional del sector del transporte marítimo. No resuelven el problema sino lo trasladan de una región del mundo a otra. Las acciones a tomar deben enmarcarse en un contexto mundial, haciendo participar a todos los agentes implicados (astilleros, armadores / fletadores y administraciones públicas), pero también desarrollando una verdadera relación de cooperación “Norte/Sur”.

Finalmente, la acumulación de normativas para el transporte marítimo asfixia en ciertas circunstancias el desarrollo de un sector afectado por la globalización. Si por un lado se imponen medidas (costosas) de gestión de los residuos oleosos a bordo para su posterior descarga en puerto, es necesario por otro lado promover el desarrollo de las infraestructuras para su correcta recepción en puerto. En el caso español, pocos son los puertos que disponen de estas instalaciones de recepción de residuos que cumplan los requisitos MARPOL.

Implantación del doble casco

La introducción del doble casco en el diseño de los buques es una medida correctora de *urgencia*. Si bien los EEUU, en su draconiana OPA '90 hacen obligatorio el uso del doble casco para transitar por aguas norteamericanas, la seguridad no se ve realmente mejorada. Eso ha provocado una reacción en cadena sobre el resto de normativas mundiales.

El doble casco asegura una mejor protección de la carga frente colisiones pero no garantiza la seguridad integral del buque. De hecho, ciertos problemas como la estabilidad o los controles de corrosión interna se ven agravados. De las estadísticas de grandes vertidos, las causas principales de los accidentales son atribuidas a errores humanos. Por lo tanto, la solución del control y prevención de los vertidos pasa por introducir mejoras en la seguridad y en la gestión de las operaciones.

Por otra parte, la introducción del doble casco es considerada por ciertos expertos como un agravio en el diseño y construcción de los petroleros: se complica y encarece alrededor de un 20% su ejecución, reduciendo además el volumen de carga transportada. Existen diseños alternativos interesantes, que introducen tanques de lastre laterales a distintas alturas, como el de cubierta intermedia o el *Columbi Egg* que buscan reducir las limitaciones del doble casco “puro y duro”.

	OPA '90		OMI / MARPOL '92		EU 2000/2003	
	Edad	Fecha	Edad	Fecha	Edad	Fecha
Petroleros casco único		2005 (23 años)	Todos	2015	Todos	2015
< 10.000 TPM	Todos	2015				
Fuel pesado					Todos	2003
Categoría 1 (<i>preMarpol</i>)	Todas	2010	25	2007	26	2007
> 20.000 TPM crudo > 30.000 TPM refinados > sin lastres segregados					(*) 23	(*) 2005
Categoría 2 (<i>Marpol</i>)	30	2010	30	2026	26	2015
> 20.000 TPM crudo > 30.000 TPM refinados > con lastre segregado					(*) 28	(*) 2010
Categoría 3		Id		Id	30	2015
< 20.000 TPM					(*) 28	

(*) Nota: Propuestas iniciales de la Comisión tras el *Erika*, retomadas tras el *Prestige*.

Tabla 2.7. Calendarios internacionales de retirada del casco simple.

En la Tabla 2.7 se resumen los plazos de la retirada de circulación de los buques mono-casco según sus características y normativas. Como vemos, no existe una imposición

única ni uniforme de fechas de retiradas del casco simple. Las medidas unilaterales adoptadas por los EE.UU con la OPA, obligaron a la OMI a acelerar la eliminación del casco simple. Posteriormente, la Unión Europea (tras el *Erika*) insistió a la OMI para volver a modificar las susodichas fechas, pero sin llegar a un acuerdo claro: finalmente el Parlamento Europeo rebajó las restricciones propuestas inicialmente por la Comisión. Tras el *Prestige*, de nuevo la Comisión propone acelerar la retirada.

Puertos de refugio

Si bien existe en el ámbito europeo una preocupación sobre el establecimiento de puertos o zonas de refugio contemplada en la Directiva 2002/59/CE, la decisión última pasa a través de cada estado miembro. Así, en los planes de emergencia nacionales deberían contemplarse puertos o zonas naturales habilitadas para dar refugio a buques en peligro, ya sea por el estado de la mar o por avería interna. Estas zonas deben disponer de recursos suficientes para dar respuesta a buques averiados, posibles fuentes de contaminación (sistemas de compensación, materiales de contención contaminación, tratamiento residuos, etc.).

La localización de una zona de estas características no resulta una decisión fácil puesto que suele entrar en conflicto con otros usos del litoral; en particular estas zonas de sacrificio no son bien aceptadas por comunidades de pescadores o mariscadores.

Por otro lado, la decisión (y responsabilidad) de albergar un barco en auxilio dentro de un puerto no puede partir de la propia Autoridad Portuaria sino de una Administración superior, regional o estatal. Esto vendrá ligado, entre otros, a la disponibilidad de recursos localizados en ese puerto. De hecho, con arreglo al Derecho internacional, los Estados no están obligados a dar refugio a los buques en situación de emergencia (*).

Planes de Contingencia

En definitiva, la complicada situación del transporte marítimo no parece tener una solución fácil ni definitiva. Existen muchos intereses de tipo económico y político en el transporte marítimo, especialmente de un producto tan *energéticamente* valioso como es el petróleo, sujeto a su vez a un mercado muy cambiante.

Visto este panorama de intereses cruzados, los Estados Ribereños deben preocuparse de proteger sus costas. Independientemente a la implantación de normativas relativas a seguridad y prevención marítima, deben establecerse herramientas de planificación y mecanismos de protección de la integridad del litoral, tanto ciudadanos como bienes. Como veremos, esto pasa por desarrollar herramientas de monitorización dentro del marco de los planes de contingencia por contaminación marina.

* Nota: al *Erika* y al *Prestige* se les denegó el resguardo a los puertos de Saint-Nazare y A Coruña respectivamente. Esta decisión fue muy criticada por ciertos colectivos y debe analizarse desde una perspectiva global: deben existir unos recursos previos para poder garantizar el control de la crisis.

3. Consecuencias socio-económicas y medioambientales

Las consecuencias del vertido de un contaminante en el medio marino pueden ser muy diversas, función de las circunstancias del vertido (época del año, tipo, lugar y volumen vertido), del medio afectado (mar abierto, costa, rías) y de cómo se responde a ese evento (recuperación del producto, tareas de limpieza, etc.).

La contaminación de tipo crónica o asociada al conjunto de actividades “operacionales” en el mar pueden tener a largo plazo consecuencias graves para la salud humana y para el medio ambiente, típicamente difíciles de evaluar. En la actualidad, existen muchas zonas en el mundo donde la presión de la actividad industrial y urbana sobre el medio ha provocado un empobrecimiento de su riqueza.

Por otro lado, la contaminación puntual o masiva producida por un derrame accidental suele tener a corto-medio plazo unas consecuencias fundamentalmente económicas, y por tanto sociales, que en ciertas ocasiones han sido muy graves. Sin embargo, desde el punto de vista de la afectación medioambiental, la contaminación crónica suele ser más grave a largo plazo. De hecho, la simple existencia de compuestos tóxicos en un producto derramado no se deriva en un efecto directo grave sobre las personas o los organismos.

En los siguientes apartados se emplearán los términos siguientes que vale la pena aclarar:

- *Contaminante* : sustancia *no beneficiosa* que puede ser incorporada por un ser vivo o que se encuentra anormalmente en el medio (por tipo o cantidad)
- *Contaminación* : Alteración antrópica del medio natural por aportación de un contaminante
- *Tóxico*: compuesto químico que incorporado a un organismo resulta perjudicial para su desarrollo
- *Genotóxico* : propiedad de un compuesto químico de modificar la estructura genética (ADN)
- *Mutagénico* : capacidad de inducir mutaciones genéticas
- *Teratogenicidad* : propiedad de un compuesto químico de causar malformaciones en el feto en desarrollo
- *Bioacumulación* : acumulación de un compuesto tóxico por parte de un organismo por ingesta prolongada de forma directa o indirecta
- *Biomagnificación* : aumento de la concentración de un compuesto tóxico a lo largo de la cadena trófica por bioacumulación
- *Biodisponibilidad* : capacidad de una sustancia de ser absorbida en los tejidos del organismo. Utilizado como indicador de la entrada de un compuesto (tóxico) en la cadena trófica y ser susceptible de bioacumularse
- *Xenobiótico* : compuesto químico no relacionado con el ser vivo (endogénico)
- *Toxina* : Compuesto biogénico tóxico, generado por el propio organismo

La afección al *medio receptor* puede dividirse en consecuencias directas, derivadas del propio contaminante y en efectos indirectos, a largo plazo, provocados por la reacción posterior del *medio* (alteraciones ecosistema, crisis sectores económicos, etc.).

La toxicidad de un producto no es más que una de las posibles tipos de afecciones que puede producir un contaminante, en particular sobre los seres vivos. Sorprendentemente, en la actualidad se tiende a clasificar los productos petrolíferos como mercancías peligrosas cuando se trata en la mayoría de casos de productos naturales, de mucha menor re-actividad química y toxicidad que muchos otros productos químicos que se transportan por mar.

3.1 Afección al medio receptor

Formación de las mareas negras

Cuando se produce en el mar el derrame de un volumen importante de algún producto petrolífero se suele formar lo que se denomina comúnmente una *marea negra*: el contaminante vertido, generalmente menos denso que el agua de mar es transportado largas distancias según las corrientes oceánicas. Tarde o temprano, de una forma u otra, la contaminación llega al litoral. Sin embargo, existen otras dos componentes del vertido menos aparentes pero igualmente dañinas o peligrosas para el medio marino (Figura 2.9):

- **Fracción volátil en la atmósfera:** las componentes ligeras del hidrocarburo se volatilizan, formando en los primeros instantes una nube generalmente muy tóxica pero que se dispersa rápidamente a la atmósfera.
- **Mancha en superficie:** la mayoría del producto queda flotando en la superficie del mar, pudiendo tener un espesor de varios centímetros a pocos micrómetros. Esta parte será la más expuesta a los agentes exteriores (oleaje, viento, insolación, etc.) y la que se desplaza más rápidamente.
- **Dispersión en la columna de agua:** parte del producto queda dispersado verticalmente en forma particulada, pudiéndose mezclar con otras partículas y de sedimentos. Este volumen dispersado puede afectar más directamente a los organismos que viven en la columna de agua, o incluso en el fondo marino, en caso de precipitar.

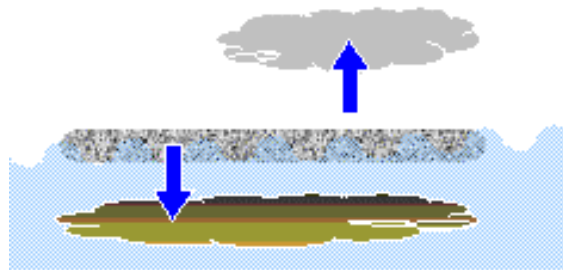


Figura 2.9 Fase evaporada, dispersada y superficial de un vertido marino de hidrocarburos

Los productos petrolíferos y los hidrocarburos en general derramados en el medio marino envejecen a lo largo del tiempo: pierden las fracciones más ligeras, se vuelven más

viscosos, se ven alterados por la fotooxidación y son parcialmente degradados por microorganismos.

Por tanto, la afectación de la contaminación por un derrame de hidrocarburos será distinta según la componente que consideremos y según el tiempo que transcurrió tras el derrame.

Evaluación de los efectos sobre el medio

Las consecuencias de un derrame importante de hidrocarburos sobre el medio ambiente marino pueden clasificarse fundamentalmente según su *impacto directo*, a corto plazo y relacionado con la toxicidad del contaminante, y según sus *efectos indirectos* sobre el conjunto del medio físico y su biota.

Entre los **efectos directos** de un contaminante sobre los organismos marinos se encuentran:

Efectos letales tóxicos:

El contaminante se considera de ***toxicidad letal*** cuando resulta tóxico a niveles letales de forma inmediata o prolongada debido a la ingestión y/o exposición de sus componentes más tóxicas; típicamente entrarían en esta categoría a los hidrocarburos aromáticos solubles y algunos compuestos heterocíclicos (ver Capítulo siguiente “Propiedades”). Así, la ***toxicidad aguda*** o inmediata, causa la muerte de los organismos por fallos “básicos” del sistema.

Efectos subletales

De la misma forma, se define como ***toxicidad crónica*** o subletal aquella que no produce la muerte directa de los organismos pero sí que altera su desarrollo normal debida a una exposición prolongada a concentraciones relativamente bajas del contaminante. Los efectos subletales se manifiestan sobre los organismos en alteraciones de tipo fisiológico, de comportamiento o de tipo reproductivo. En ciertas especies, buena parte de la mortandad es indirecta, debida a la disminución de la capacidad de supervivencia del organismo por un debilitamiento o fallo en sus defensas contra el medio u otros organismos (parásitos, depredadores, etc.).

Como efectos de tipo fisiológico se encuentran las modificaciones del metabolismo del organismo (consumo de oxígeno en mamíferos marinos, disminución de la fotosíntesis), los efectos mutagénicos, las pérdidas de la capacidad quimiosensora para alimentarse, identificarse o aparearse. Así, ciertos organismos pueden perder su capacidad de supervivencia en el medio. Por otro lado, puede haber una alteración en la capacidad de reproducción (menores nacimientos, pérdida de fecundidad, desarrollos menores, etc.).

Efectos físico-mecánicos

Independientemente de la toxicidad propiamente dicha, los hidrocarburos y aquellos productos derivados particularmente viscosos pueden afectar mecánicamente a ciertos seres vivos (fijación en la piel, obturación fosas nasales o branquias, etc.).

Entre ellos, destacamos los problemas de alimentación y/o respiración de los organismos filtradores (moluscos, etc.) y de los peces (muerte por asfixia). Por otro lado, los mamíferos marinos pueden asfixiarse por taponamiento de sus vías respiratorias al salir a la superficie del mar cubierta de fuel.

De la misma forma, la adherencia (o tintado) por hidrocarburos del plumaje de las aves y del pelo en ciertos mamíferos les puede provocar problemas de aislamiento térmico, entrando en hipotermia. Incluso la pérdida o disminución de la capacidad olfativa puede impedir el reconocimiento de los cachorros por parte de los padres, descuidando su alimentación.

En ciertos casos, como durante la crisis del *Erika*, la mortandad de aves fue espectacular debido al “petroleado” de aves migratorias que se encontraban anidando (en migración) durante el accidente y vertido del fuel pesado.

La marea negra puede afectar al fitoplacton por el simple efecto físico de cobertura superficial del mar a la penetración de los rayos del sol (limitando la fotosíntesis), modificando el intercambio gaseoso atmósfera-mar.

Por otro lado, el contaminante puede provocar unos **efectos indirectos** sobre el medio natural, alterando las funciones y estructuras de las comunidades biológicas así como de las características geomorfológicas del medio físico:

Bioacumulación

Aquellas especies que no son capaces de metabolizar o eliminar los compuestos tóxicos que ingieren, van acumulándolo en sus organismos. Típicamente los moluscos y otras especies filtradoras son utilizadas como bioindicadores para conocer la acumulación de un contaminante en la biota (metales pesados, etc.). Estos organismos contaminados, al ser devorados por sus predadores, provocan el ascenso del contaminante y un aumento de la toxicidad en la cadena trófica – la *biomagnificación*. El factor de bioacumulación de ciertos compuestos puede llegar a ser entre 50 y 400 veces la concentración de base en el agua (Albaiges y Bayona, 2004).

Alteración de las relaciones entre especies (cadena trófica, etc.)

La mortandad masiva de una especie o productor primario afectará a la cadena comprometiendo la supervivencia de sus predadores; de la misma forma, la desaparición de una especie depredadora provocará una proliferación descontrolada de la especie primaria.

Por otro lado, en los casos de contaminación del medio, pueden aparecer especies oportunistas que desplacen aquellas especies más afectadas o desaparecidas.

Desarrollo de enfermedades y parasitismos

Una de las causas indirectas de mortandad es la pérdida o reducción de la capacidad de defensa de ciertas especies por el compuesto tóxico: los organismos ahora más indefensos están más expuestos a la proliferación de enfermedades y parásitos.

Modificaciones del medio físico y del hábitat natural

Al derramarse petróleo, se altera de forma directa las características geomorfológicas del medio físico, debido por ejemplo a la impermeabilización de las rocas, la penetración en arenales, humedales o estuarios como (Figura 2.10).

Las tareas de limpieza deben acompañarse de una restauración posterior del medio para reponer sus características iniciales. Lamentablemente, las actuaciones sobre el medio pueden provocar consecuencias más graves que las generadas por el propio contaminante: retirada excesiva de arena, abertura de caminos de acceso o acondicionamiento inapropiado de las zonas temporales de almacenamiento (ver Figura 2.11).

La recuperación del medio físico se conseguirá mediante una planificación de las tareas de limpieza (durante la llegada del contaminante) y de restauración (pasado la crisis). En estas tareas deben tenerse en cuenta la contaminación *secundaria*, derivada de las labores de limpieza y almacenamiento de los residuos. En ciertas ocasiones, es preferible la opción de “no-actuación” para no empeorar el medio afectado (i.e. lugares de difícil acceso).

Tras el vertido, es fundamental realizar una monitorización del medio afectado. El diagnóstico de su afectación incluye una descripción del medio físico, una evaluación de las especies y organismos afectados junto con una descripción de su vulnerabilidad (Font et al., 2003). Por otro lado, la monitorización debe incluir el seguimiento de su recuperación para una futura evaluación crítica de las técnicas de limpieza empleadas. Esto queda muy bien descrito en el conjunto de fichas-protocolos de evaluación del estado del medio, por ejemplo elaboradas por el Cedre (www.le-cedre.fr) o por la NOAA (2001).



Figura 2.10 Estuario afectado por la marea negra del Prestige

[Fuente: la Voz de Galicia]



Figura 2.11 Alteración del medio: las tareas de limpieza

[Fuente: la Voz de Galicia]

Indicadores de sensibilidad medioambiental

De cara a la prevención y para una mejor gestión durante una crisis de contaminación es importante conocer la sensibilidad del medio y de las especies que ahí viven. Así, previamente se deben elaborar mapas de sensibilidad, estableciendo índices de vulnerabilidad de cada especie y para cada tipo de hábitat del territorio. Así, se generan una fichas detalladas del posible impacto, según hábitat afectado y según el tipo de contaminante.

Por ejemplo, la Agencia del Aire y Océano norte-americana dispone de una serie de atlas costeros donde se describe la sensibilidad del medio costero, según un Índice de Sensibilidad medioambiental (NOAA, 2001).

El concepto de Índice de sensibilidad se basa en la descripción del hábitat y de sus comunidades que la habitan (Tabla 2.8):

- La *vulnerabilidad* del hábitat tiene en cuenta la facilidad de penetración del contaminante en el medio así como su persistencia en él. De esta forma, aquellos hábitats reservados, inaccesibles, sin una agitación natural serán los más vulnerables.
- La *sensibilidad* de una especie o comunidad biológica hará referencia a su alteración frente una agresión externa. Así, las especies más sensibles serán aquellas más afectadas por los compuestos tóxicos del contaminante, aquellas que tengan tasas menores de reproducción (nacimientos de pocos individuos) o especies con poca o nula movilidad.
- La *resiliencia* indicará la capacidad de una comunidad a recuperarse de la mortandad provocada por una catástrofe o evento contaminante.

ALTA Vulnerabilidad → Hábitat	ALTA Sensibilidad → Especies	ALTA Resiliencia → Comunidades	MAYOR afectación
Marismas	Aves marinas (pescadoras) Corales duros	Arrecifes Coralinos	Arrecifes, marismas Habitats de aves y mamíferos marinos
Mar helado	Mamíferos marinos	Marismas	Estuarios Zonas árticas
Playa de gravas	Zooplankton	Zona rocosa	Playas de gravas Zonas sub-mareales abrigadas
Playas arenosas Arrecifes coralinos	Moluscos bivalvos	Playas arenosas	Playa arenosas Zonas sub-mareales expuestas
Rocas / acantilados Mar abierto (pelágico)	Peces adultos	Plancton	Acantilados expuestos Mar abierto
Baja Vulnerabilidad	Baja Sensibilidad	Baja Resiliencia	Menor afectación

Tabla 2.8. Grado de afectación según sensibilidad, vulnerabilidad y resiliencia de las especies y hábitat del medio

El grado de afectación dependerá fundamentalmente del tipo de especie: aquellas de vida larga o de lenta reproducción (mamíferos, aves, etc.) se verán más afectadas que las de crecimiento rápido como el plankton. Por otro lado, aquellas especies que detectan rápidamente algún compuesto nocivo disuelto en el medio y pueden migrar a zonas no contaminadas estarán menos expuestas al producto (pulpo, peces de profundidades, etc.). En resumen podemos dividir la afectación en tres grados:

Grado afectación	Hábitat
Alto	Zona costera (rocas / playas) y en superficie: Almeja, berberecho Mejillón (semilla) Percebe
Medio	Plataforma continental: Cigala Merluza Rape
Bajo	Pelágico (en columna de agua) Caballa Sardina

3.2 Evaluación de la Toxicidad

Nos interesaremos a continuación en la evaluación de la toxicidad por hidrocarburos, concentrándonos en los efectos sobre el ser humano. Así, el concepto de toxicidad irá muy estrechamente relacionado con la evaluación de la seguridad alimentaria de los productos del mar afectados por un derrame de hidrocarburos.

La toxicidad asociada a un compuesto químico depende de muchos factores; en particular del grado y tipo de exposición (aguda o crónica), de la vía de transmisión sobre

el individuo afectado y de su accesibilidad a los organismos afectados (biodisponibilidad).

En el caso de derrames marinos de hidrocarburos, la toxicidad es siempre el centro de muchas controversias en la información pública, no siempre realizada de forma rigurosa. Existen dos ámbitos de riesgo potencial, el de las personas involucradas a las tareas de limpieza y el de los organismos marinos expuestos al producto derramado.

Tras una marea negra, hay diversas vías de exposición a los compuestos más tóxicos para el hombre (Braer, 2003):

- *Por vía respiratoria*: las fracciones volátiles del hidrocarburo pueden ser tóxicas / muy tóxicas por inhalación. Sin embargo, esta fracción suele ser pequeña en fueles y petróleo pesados. Durante las tareas de limpieza (en las embarcaciones o en las playas), la exposición puede ser prolongada. Por ello se recomienda siempre turnos cortos de trabajo. En el caso de la limpieza mediante agua caliente a presión pueden existir cantidades significativas de compuestos inhalados (a través de material particulado o aerosoles). Por ello es necesario en estos casos utilizar mascarillas protectoras.
- *Por vía digestiva*: descartando la ingestión accidental directa, la única fuente sería a través de la cadena alimentaria, agravado en el caso de existir bioacumulación de los compuestos tóxicos. Estas componentes no persisten demasiado en el organismo, reteniéndose básicamente en los órganos ricos en grasas. Por ello, una de las recomendaciones hacia el personal de limpieza es la reducción de la ingesta de productos grasos (lacteos, etc.).
- *Por vía cutánea*: es la principal vía de exposición, pudiendo provocar irritaciones importantes. Los compuestos más referenciados son el naftaleno, el antraceno y el benzo(a)pireno, este último considerado como probablemente cancerígeno (mutagénico o reactivo tras el metabolismo).

Toxicidad de los hidrocarburos policíclicos aromáticos

Como se describe en el siguiente **Capítulo III** (“Propiedades de los Hidrocarburos”), existe toda una serie de compuestos orgánicos volátiles en el petróleo y refinados, formados por anillos bencénicos: son los llamados hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Según su peso y estructura molecular se comportarán de una forma u otra en el medio (reactividad con otros compuestos, solubilidad, volatibilidad, etc.).

Si bien hay varios compuestos considerados como cancerígenos (ver Capítulo III), no existen demasiados estudios en humanos sobre los efectos a la exposición crónica (no aguda) de algún compuesto PAH aislado o en combinación. Ciertos compuestos orgánicos volátiles han sido catalogados internacionalmente como “cancerígenos probables en el hombre” (según el Centro Internacional de Investigación contra el Cáncer, el CIRC y la Agencia Medioambiental Norteamericana, la EPA). Entre ellos se destaca como más peligroso el *benzo(a)pireno*, conocido en parte por estar presente en el humo del tabaco.

Toxicidad por ingestión de alimentos

La principal preocupación en la evaluación de la toxicidad se concentra en la ingestión de productos para el consumo humano con concentraciones medias o altas de HAP, como pescado, moluscos o crustáceos contaminados. Si bien tras un vertido accidental de hidrocarburos al mar hay una alerta generalizada sobre las consecuencias que tendrá en los productos del mar, el ser humano ingiere cantidades (más) notorias de HAP a través de otros alimentos manufacturados.

Desde el punto de vista de la identificación toxicológica, se han establecido unos valores guía en concentraciones de ciertos compuestos HAP's más representativos en los productos de la mar destinados al consumo humano. En concreto, la Agencia de Protección Medioambiental norte-americana (EPA) establece 16 HAP (Figura 2.12), de las cuales la Agencia Española de Seguridad Alimentaria (AESA) considera los siguientes indicadores:

- Benzo(a)antraceno
- Benzo(b)fluorantreno
- Benzo(k)fluorantreno
- Benzo(a)pireno
- Dibezo(a,h)antraceno
- Indeno(1,2,3-c,d)pireno

De esta forma, la AESA establece que en los moluscos, crustáceos y cefalópodos, la suma de concentraciones de los 6 anteriores HAP no sobrepasen los 200µg / kg de peso seco (o ppb). Para el pescado, este valor guía se reduce a 20 µg/kg sobre peso seco.

El porcentaje de estos compuestos sobre el total de las muestras es siempre muy inferior al conjunto de hidrocarburos identificables en las muestras (representan menos del 1% sobre el total, IPF, 2003). Sin embargo, por bioacumulación, las concentraciones pueden aumenten de 2 a 3 ordenes de magnitud.

Cabe destacar que las proporciones en HAP en los alimentos susceptibles de ser contaminados por el derrame de algún producto petrolífero pueden ser del mismo orden que las aportaciones por el propio tratamiento de cocción (ahumado, brasas, etc.). Es decir, un derrame de hidrocarburos no tienen porque implicar para el consumidor un riesgo grave de intoxicación.

Composés	Composés	Concentration (µg/g HC) PRESTIGE
Naphtalene	N	282
C1-Naphtalene	N1	1640
C2-Naphtalene	N2	2816
C3-Naphtalene	N3	2652
Dibenzothiophene	D	92
C1-Dibenzothiophene	D1	270
C2-Dibenzothiophene	D2	502
C3-Dibenzothiophene	D3	459
Biphenyl	B	68
Acenaphthylene	ANY	19
Acenaphthene	ANA	81
Fluorene	F	102
Anthracene	A	43
Phenanthrene	P	245
C1-Phenanthrenes / Anthracènes	P1	941
C2-Phenanthrenes / Anthracènes	P2	1160
C3-Phenanthrenes / Anthracènes	P3	844
Fluoranthene	FL	17
Pyrene	PY	85
C1-Fluoranthènes / Pyrènes	FL1	261
C2-Fluoranthènes / Pyrènes	FL2	328
C3-Fluoranthènes / Pyrènes	FL3	261
Chrysene	C	90
C1-Chrysenes	C1	252
C2-Chrysenes	C2	244
C3-Chrysenes	C3	251
Benz[a]anthracene	BAA	49
Benzo[b+k]fluoranthene	B(B+K)F	20
Benzo[e]pyrene	BEP	43
Benzo[a]pyrene	BAP	35
Perylene	PE	15
Indeno(1,2,3-cd)pyrene	IN	6
Benzo(g,h,i)perylene	BPE	21
Dibenz(a,h)anthracene	DBA	8

Nota: En verde, los 16 compuestos HAP considerados por la EPA

Figura 2.12 Concentración en HAP del fuel del *Prestige*

(www.le-cedre.fr)

En la Figura 2.12 se muestran las concentraciones en hidrocarburos poli-aromáticos en el fuel oil del *Prestige* (datos de *le Cedre*), expresadas en ppm.

Presencia de HAP en el medio

De forma general, la acumulación de HAP en el medio natural es un indicativo de la actividad humana. Si bien existe una aportación natural de ciertos compuestos (por incendios forestales, yacimientos naturales, etc.) la gran mayoría provienen de las actividades humanas. De hecho, las concentraciones relativas en distintos compuestos HAP son indicativos del origen de la contaminación (Albaigés et al., 2000).

Así, se pueden distinguir los compuestos petrogénicos de los pirogénicos (provenientes de la combustión):

- los compuestos petrogénicos tienen una mayor concentración en compuestos de 2-3 ciclos y en derivados alquiles. Son más volátiles y biodisponibles.
- los compuestos pirogénicos tienen mayor abundancia de compuestos HAP de 4-6 anillos, habiendo desaparecidos los derivados alquiles (solo quedan los *parientes*). Son menos bioasimilables.

La metabolización o degradación por organismos de los HAP se ve acelerada bajo condiciones aeróbicas. De esta forma, en los fondos marinos donde haya poco oxígeno, gran parte de los HAP permanecerán inalterados; allí será frecuente encontrar concentraciones más altas (especialmente aquellos compuestos menos biodegradables). De la monitorización de ciertas playas contaminadas se ha observado que no existe evolución en la composición (en proporción) de los compuestos HAP más pesados (con más de 3 ciclos).

Por otro lado, el uso de agentes dispersantes suele aumentar la incorporación de los productos contaminantes en la cadena trófica. Por ello, su uso está restringido a zonas alejadas de la costa, con suficiente profundidad, para garantizar la dispersión en el medio, siempre y cuando no comprometa piscifactorías u otros cultivos marinos.

3.3 Consecuencias socio-económicas

La contaminación marina puede tener efectos devastadores sobre el medio marino y costero. Sin embargo, las mareas negras se caracterizan especialmente por su impacto social y económico. En el litoral se concentran muchas actividades económicas, empezando por el turismo y la pesca. Tras la crisis del *Prestige*, se han publicado diversos estudios sobre las consecuencias de la contaminación (González Laxe et al., 2003; SFLR, 2004).

De hecho, estas han sido las principales actividades afectadas en las recientes mareas negras en el litoral atlántico (*Erika* y *Prestige*), alterando buena parte de los recursos económicos de las zonas de Bretaña y Galicia, respectivamente. Incluso pasado un año del hundimiento del *Prestige*, aún siguen llegando bolas de alquitrán a las playas vascas.

Tanto en Bretaña como en Galicia, los productos del mar más afectados por la contaminación (Tabla 2.8) son precisamente los de mayor interés económico: (moluscos, percebes, etc.). Su rentabilidad económica depende en buena medida de la imagen de calidad de cara a un consumidor más “especializado”, que en el caso del percebe se puede identificar a un *producto de lujo*. Esto hace que se ponga en peligro este sector del marisqueo tan específico, un de los más importantes en Europa, eje principal de la economía de regiones como Galicia.

Durante la crisis del *Prestige*, los sectores económicos afectados fueron, de mayor a menor, el marisqueo, la pesca extractiva y la acuicultura (más protegida en las rías). No hay que olvidar que la pesca no solo tiene una faceta económica sino también social y cultural, muy arraigada en las sociedades costeras como las del Norte de España.

Por otro lado, en torno a las actividades puramente pesqueras se estructuran todo un conjunto de sectores que también se ven afectados: cofradías, industrias del congelado, conserveras, hostelería y restauración y otros servicios; a grosso modo, de cada pescador

se generan otros tres puestos de trabajo. De hecho, el sector pesquero gallego representa cerca del 40% del total de la actividad nacional: más de la mitad de la producción de moluscos provienen de Galicia, cerca del 50% de la flota pesquera es gallega (Varela et al., 2004).

La decisión del cierre de caladeros es siempre controvertida: se entremezclan intereses como el establecimiento de las subvenciones de los afectados, los criterios de seguridad alimentaria (forma de demostrar la calidad de los productos recolectados), e intereses políticos y sociales (alteración precios del mercado, desconfianza del consumidor, finalización de las subvenciones). Por otro lado, el cierre de caladeros tiene la ventaja de permitir la recuperación de ciertas especies normalmente sobre-explotadas, tanto en número de individuos como en tamaños (desarrollo más completo).

4. Herramientas de Gestión en una crisis medioambiental

En las pasadas situaciones de crisis de contaminación de vertidos marinos (*Exxon Valdez*, *Erika*, *Prestige*, etc.) se demostró la necesidad de disponer de mecanismos de lucha contra la contaminación de forma previamente organizada antes del incidente. Este conjunto de Protocolos de actuación se definen en los denominados Planes de Contingencias, haciendo intervenir diversas Administraciones en función de la magnitud del incidente.

Por otro lado, ante una situación de emergencia, es necesario movilizar una serie de recursos, tanto materiales (equipos des-contaminación, barreras, etc.) como humanos (voluntarios, asesores, etc.). En los casos de contaminación marina, veremos como los sistemas de monitorización y previsión son una pieza fundamental para la correcta gestión de la crisis: conocer el estado actual y prever su evolución para movilizar los recursos.

4.1 Marco de actuación de las crisis de contaminación marina

En base a las normativas ya existente sobre lucha contra la contaminación marina, las actuaciones en una crisis deben enmarcarse en un sistema de prevención y respuesta a las situaciones de emergencia. Para ellos, es necesario establecer una red de centros regionales para la coordinación de las operaciones de lucha contra la contaminación en el ámbito geográfico afectado. El objetivo es mantener un nivel de vigilancia y control suficientemente intenso para optimizar la eficiencia de los medios de eliminación y limpieza del contaminante. Idealmente, esta operativa debería apoyarse de una red medidas y predicción del estado océano-meteorológico, que actualmente en España es un recurso inexistente.

Las autoridades y agentes responsables de la lucha necesitan disponer de un plan de emergencia (o de contingencias) en el que se definan el conjunto de operaciones y protocolos para controlar la crisis y minimizar las consecuencias de la catástrofe. Los recursos materiales y humanos para la lucha contra la contaminación deben estar inventariados, disponibles y operativos. Por otro lado, deben estar implementadas toda una serie de técnicas y medios para el seguimiento y previsión de la contaminación.

En este sentido, la Oceanografía Operacional juega un papel fundamental en la gestión de la información del estado del medio (atmósfera y océano) así como de su previsión a corto, medio y largo plazo. Esto se consigue como veremos más adelante, enlazando los sistemas observacionales (redes de medidas oceano-meteorológicas) con los sistemas de previsión (mediante modelado numérico).

La Prevención ante crisis de contaminación marina se consigue con una mejor evaluación del riesgo, contempladas en parte en los Planes de Contingencias. La mejora en la respuesta pasa por una organización clara de las actuaciones así como una evaluación continua de las técnicas y medio de respuesta.

En España, la Ley 27/1992 del 24 de Noviembre, de Puertos del Estado y de la Marina Mercante (Cap. III), crea en su artículo 89 la Sociedad Estatal de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR), Entidad de Derecho Público encargada de prestar entre otros el servicio de prevención y lucha contra la contaminación del medio marino. Por otro lado,

como detallaremos existe un Plan de Contingencias Nacional por Contaminación Marina que regula la redacción de los distintos Planes Territoriales de las distintas regiones.

Actuaciones en la lucha contra la contaminación

De los sucesivos derrames accidentales de petroleros, se ha ido generando un conocimiento de los métodos y técnicas de lucha contra la contaminación. A medida que nuevos productos petrolíferos han ido apareciendo (fueles pesados, Orimulsion, etc.), ha sido necesario conocer que efectos tienen por su posible derrame en el medio marino.

La lucha contra la contaminación se organiza según los ámbitos de actuación:

- *en mar abierto*: los buques anti-contaminación están equipados con bombas y skimmers que permiten la recuperación de cantidades importantes del derrame
- *en zonas costeras*: multitud de embarcaciones pueden participar a las tareas de contención y recuperación de las manchas que se acercan al litoral
- *limpieza de costa*: disposición de barrera de contención (en playas, puertos, etc.) y limpieza de playas una vez que la marea negra llega al litoral
- recuperación zonas afectadas



Figura 2.13 Ejemplos de actuaciones en alta mar [Fuentes: AZTI y le Cedre]

En los últimos años, ha habido un cambio de tendencia: las técnicas de recuperación del vertido en alta mar (equipos de limpieza, localización de manchas, buques anti-contaminación, etc.) han permitido concentrar las actuaciones antes de que la contaminación llegue al litoral. Comparando por ejemplo los casos *gemelos* del *Erika* y del *Prestige*, se pasaron de recoger en alta mar de un 10% a un 30-40%. Es decir que mientras que antes se consideraba un ámbito de actuación poco fructífero, en el caso del *Prestige* se concentraron los esfuerzos en la recuperación en alta mar.

En el caso de un vertido masivo es necesario organizar las actuaciones para la lucha contra la contaminación en diferentes etapas, siendo crucial la observación y seguimiento de las manchas, previendo la llegada del contaminante a costa. El producto vertido multiplica su volumen al emulsionarse con el agua marina, al incorporar sedimentos y otros flotantes del mar, pero sobretodo al mezclarse con la arena del litoral. Así, el volumen de contaminante a recoger en tierra suele ser de 5 a 10 veces el volumen del producto inicialmente vertido. Por tanto, es crucial recuperar el producto en alta mar.

Las tareas de limpieza deben definirse en función del medio afectado, dosificando el esfuerzo según su valor mediambiental, económico y social. La limpieza se acompaña de tareas de recuperación del medio, evaluando que técnicas han sido efectivas y no perjudiciales.

Además, no puede olvidarse el almacenamiento y posterior tratamiento de los residuos, bajo peligro de generar una contaminación secundaria, derivada de las tareas de limpieza.

4.1.1 La Prevención mediante Planes de Emergencia

Frente un caso de crisis medioambiental como el ocurrido con el *Erika* o el *Prestige*, es fundamental la coordinación de todos los agentes participantes en las tareas de lucha contra la contaminación. Así, la gestión y el flujo de información son piezas claves en esta coordinación.

Una situación de crisis necesita la puesta en marcha de unos protocolos de actuación, de forma clara y efectiva. La organización de estas actuaciones debe estar establecida en los correspondientes planes de emergencia o de contingencia. Esto requiere un planteamiento “operacional” del conjunto de actuaciones, una automatización lista y preparada ante cualquier evento.

El planteamiento operacional debe tener en cuenta la diversidad de factores que definan la situación de emergencia. En el caso de la contaminación producida por la marea negra, un factor clave es la escala espacial y temporal de la crisis. Así lo ha demostrado, por ejemplo, la crisis del *Prestige* que se ha extendido a varios países (desde Portugal hasta Reino Unido) durante meses y meses. La gestión de los recursos (buques anticontaminación, barreras de contención, movilización de personal) debe responder a esta variabilidad.

Dentro de los Planes de Contingencias se incluye el desarrollo y/o establecimiento de sistemas de localización, seguimiento y previsión de la contaminación, apoyo fundamental a la toma de decisiones. Típicamente el modelado numérico aportará un complemento de información del estado actual de la crisis haciendo una previsión a corto/medio plazo. La simplicidad de los resultados de los modelos, su representación, debe estar enfocada a la interpretación directa de los mismos.

Marco normativo de los documentos de planificación

Bajo los auspicios del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP), se establecieron en Barcelona en 1975-1976, en el marco del Plan de Acción del Mediterráneo (MAP) una serie de convenios ratificados por los 18 países consignatarios:

- El *Convenio de Barcelona*, para la Protección del Mar Mediterráneo contra la contaminación, en particular aquella producida por derrames de hidrocarburos
- El *Protocolo de Vertidos*: protocolo para la Prevención del Mar Mediterráneo de vertidos desde embarcaciones y aeronaves
- El *Protocolo de Emergencias*: protocolo para la Cooperación en situaciones de emergencia para la lucha contra la contaminación por hidrocarburos y otras sustancias peligrosas

El **Convenio de Barcelona** aporta el marco legal de cooperación entre regiones y Estados costeros del Mediterráneo para la prevención y la lucha contra la contaminación marina, en pro de la protección del medio ambiente marino. En este convenio se consideraban varias fuentes contaminantes, como la proveniente del derrame por accidentes, desde instalaciones de tierra o desde mar (estaciones *offshore*) o del vertido ilegal de embarcaciones.

En la actualidad, esta “Convención para la Protección del Medio Marino y las Regiones Costeras del Mediterráneo” está siendo actualizado, en particular para incluir los conceptos presentados en la Conferencia de Río de 1992 como son desarrollo sostenible, principio de contaminador-pagador o la gestión integral costera.

En el **Protocolo de Emergencias**, cada Estado signatario se comprometen a definir y mantener sus propios planes de emergencias así como los recursos disponibles para combatir una contaminación marina, monitorizar su evolución y establecer sistemas de información / notificación pertinentes. Se sientan las bases para la asistencia mutua entre estados en caso de crisis.

A raíz del Protocolo, se estableció en Malta el Centro Regional de Respuesta de Emergencia contra Contaminación Marina para el mar Mediterráneo. Se centró inicialmente en la contaminación por hidrocarburos (ROCC) abarcando posteriormente otros productos peligrosos. En 1989, el centro se denominaría finalmente REMPEC. Los objetivos de este centro, administrado por la Organización Marítima Internacional (OMI) son:

- Facilitar la cooperación entre estados miembros costeros en caso de un accidente mayor en el Mediterráneo
- Asistencia y asesoramiento en el desarrollo de las capacidades propias de respuesta de cada estado solicitante
- Marco de intercambio de información y experiencia en diversos campos (científico-técnico, financiero y legal)

El Plan Nacional de Contingencias por Contaminación Marina

Según lo establecido en la Ley 27/1992, de Puertos del Estado y de la Marina Mercante, la Autoridad Marítima encargada de la lucha contra la contaminación en las aguas del Estado es La Dirección General de la Marina Mercante.

De esta competencia nace el *Plan Nacional de Contingencias por Contaminación Marina Accidental* en el que se establecen una serie de recomendaciones sobre la organización operativa y procedimientos generales a seguir en caso del derrame de un contaminante en el medio marino. También se establecen los criterios para la elaboración de los *Planes Interiores* (portuarios) y los *Planes Territoriales* (por Autonomías) y bajo que circunstancias se activan dichos planes. Asimismo, el *Plan Nacional* sienta las bases de la respuesta ante una crisis por contaminación, definiendo los esquemas directivos y operativos de lucha contra la contaminación.

El Plan distingue las operaciones marítimas de las operaciones terrestres, definiéndose respectivamente un Coordinador de Operaciones Marítimas y otro de Operaciones terrestres (“Respuesta en Costa”), este último designado por la(s) Comunidad(es) Autónoma(s) afectada(s) (ver esquema Figura 2.14). El conjunto de

operaciones está dirigido por el Organismo Rector, que es asesorado por el Consejo de Dirección formado por las autoridades y empresas locales que intervienen en la respuesta y por un Comité Técnico Asesor.

En caso de crisis, el Centro de Operaciones se localizará en el Centro de Coordinación Regional (o Nacional) de Salvamento Marítimo y Lucha contra la Contaminación (CRCS-LCC o CNCS-LCC respectivamente), de la Sociedad de Salvamento y Seguridad Marítima (SASEMAR), cubriendo la zona afectada por la contaminación.

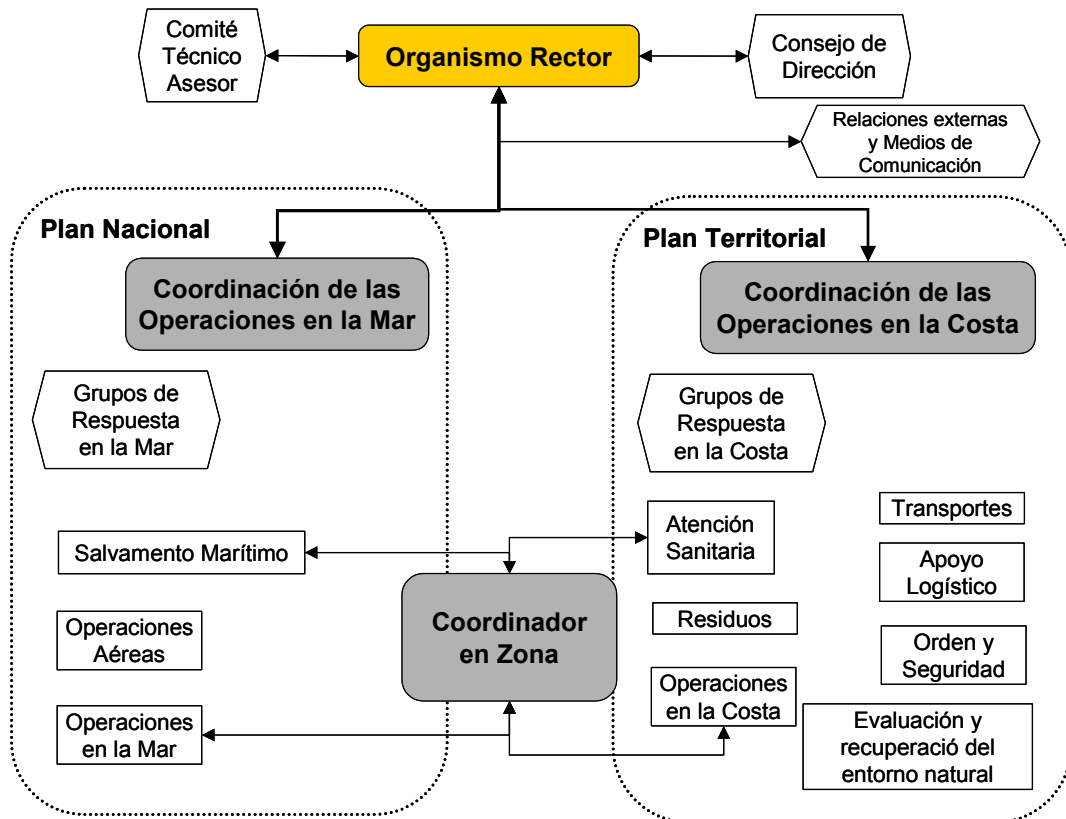


Figura 2.14 Esquema de la Coordinación entre el Plan Nacional de Contingencias por Contaminación marina y los Planes Territoriales

Dentro del apartado de Procedimientos Operativos, se definen la operaciones a seguir:

- Información inicial sobre el suceso, mediante un modelo unificado de “Informe sobre Contaminación Marina” (formulario *POLREP*)
- Acciones inmediatas a emprender por el CNCS-LCC, constitución de la Dirección de Operaciones
- Evaluación de la situación y establecimiento de un “Plan Operativo” en el que se establece el seguimiento y previsión de la deriva de la contaminación, sistemas de comunicación entre grupos de respuesta, procedimientos para la limpieza, etc.
- Elaboración diarios (cada 12h) de “Partes de Operaciones” y comunicación exterior a través del Gabinete de Relaciones Públicas

Finalmente el propio Plan contempla la revisión y entrenamiento de los diferentes procedimientos mediante ejercicios anuales o semestrales.

El Plan de Emergencias de Cataluña (CAMCAT)

El *Parlament de Catalunya* aprobó en febrero del 2003 la elaboración del *Plan Especial de Emergencias por Contaminación Accidental de las Aguas Marinas* (CAMCAT), que responde a los llamados Planes Territoriales según se establece en el Plan Nacional. Dicho plan pretende “*establecer las actuaciones necesarias para evitar que se produzcan en las costas catalanas siniestros parecidos al causado por el Prestige y luchar contra sus consecuencias en caso de producirse.*”

El CAMCAT se articula en diversos marcos normativos y legales, fundamentalmente sobre Protección Civil (tanto estatal como catalana) y de competencias sobre la costa (*Estatut d'Autonomia* y *Ley de Costas*). Este Plan Especial se define de forma análoga a otros planes como el INFOCAT (sobre incendios) o el SISMICAT (sobre sismos). Sin embargo, el caso de la contaminación marina puede tener una serie de particularidades:

- Contaminación por materias peligrosas: afectación al medio y/o a la salud humana
- Tiempo de respuesta corto, previsión de las consecuencias
- Alcance importante, espacial como temporalmente. Afectación sociedad (movilización voluntariado)
- Movilización de recursos y posible reposición (agotamiento)

De forma análoga como se lleva a cabo en otros países (por ejemplo en los EE.UU.), en caso de crisis se constituye un Comité de expertos científico-técnico que prestan apoyo al Consejo Asesor, encargado a su vez de formar juntamente con el Director del Plan, el Comité de Emergencias que dará respuesta a la crisis.

Los objetivos básicos que persigue el CAMCAT son pues definir y coordinar las actuaciones de los diferentes agentes involucrados (administraciones, instituciones y privados) en caso de contaminación marina accidental (CAMCAT, 2003). Más concretamente:

- Potenciar los medios de lucha contra la contaminación marina accidental. Facilitar y agilizar la movilización de los recursos disponibles (incluyendo los de titularidad privados, disponibles en caso de emergencia).
- Establecer la coordinación adecuada de las operaciones necesarias, estableciendo los procedimientos de comunicación entre los diversos organismos implicados en la respuesta.
- Establecer un marco de colaboración para la lucha contra la contaminación, mediante convenios y acuerdos adecuados.
- Promover la formación oportuna de personal especializado y facilitar la realización de ejercicios y simulacros, mediante planes específicos.

Para ello, en el CAMCAT se plantean los siguientes temas:

- 1.) Evaluación del Riesgo: evaluación del peligro de contaminación por vía terrestre o marina (Figura 2.15) y evaluación de la vulnerabilidad del medio litoral (recursos económicos, aspectos sociales y medioambientales)
- 2.) Definición de la Organización y Funciones en la lucha contra la contaminación
- 3.) Operatividad:
 - a. Criterios de activación
 - b. Actuaciones y Protección a la población y al medio ambiente
 - c. Coordinación con el Plan Estatal y organizaciones locales

- 4.) Medios y Recursos existentes y necesarios en caso de crisis
- 5.) Implantación del Plan
 - a. Planes de Actuación
 - b. Información y difusión
 - c. Plan de requerimientos (recursos)
 - d. Zonificación del territorio (respuesta ajustada a las particularidades de cada sitio)

El alcance territorial del plan se concentra en las aguas costeras catalanas (12 millas) pero puede extenderse bajo petición del Plan Nacional o ante amenaza inminente. Por otro lado, del Estudio de Riesgo del Plan se deduce que todos los municipios catalanes del litoral están obligados a la elaboración de un Plan de Actuación propio en función de la evaluación del riesgo correspondiente.

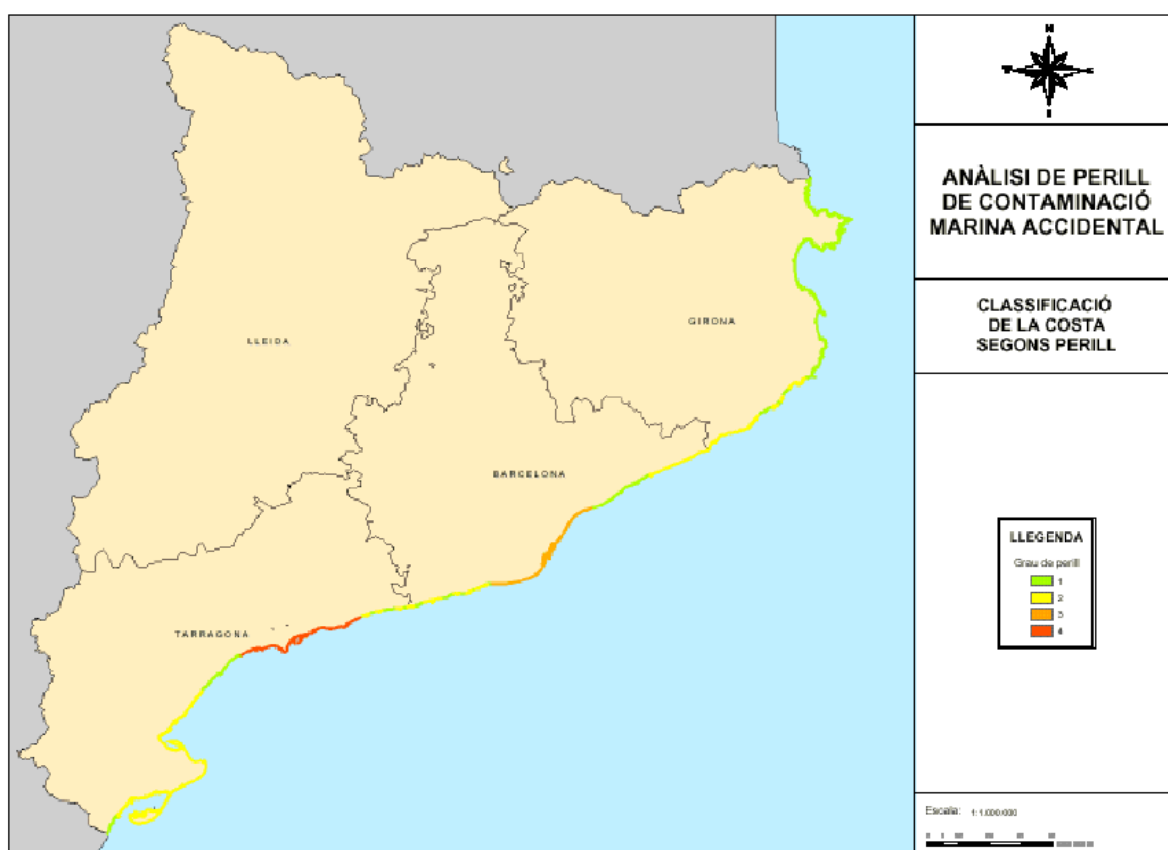


Figura 2.15. Evaluación del peligro de contaminación marina accidental (CAMCAT, 2003)

El Plan establece diferentes niveles de activación (pre-alerta o alerta) en función del tipo de situación y emergencia a cubrir (CAMCAT, 2003):

- **Pre-alerta:** por un accidente de un buque o instalación marítima situada más allá de las 12 millas costeras que suponga peligro de contaminación, por un vertido de origen terrestre que pueda ser resuelto internamente por la propia instalación, o por el vertido de un emisario o río de sustancias contaminantes

- **Alerta:** si el accidente se produce a más de 12 millas (o si hay riesgo que se produzca a menos de 12 millas), si el derrame procedió de una instalación a menos de 12 millas, o si un emisario o río vertió contaminante sin afectación al litoral
- **Emergencia:** en caso de producirse un vertido importante, independientemente del origen, activándose a su vez dos fases:
 - **Emergencia 1:** si la afectación puede ser localizada y/o en una zona de moderada vulnerabilidad
 - **Emergencia 2:** si la afectación puede ser extensa y/o en una zona de elevada vulnerabilidad

Por otro lado, dentro de la Implantación del Plan se contemplan una serie de convenios entre la *Generalitat de Catalunya* e instituciones responsables de ciertos aspectos para un caso de crisis de contaminación. En particular, se prevé el establecimiento de un sistema operacional de seguimiento y previsión de la contaminación marina para dar respuesta a una eventual crisis.

4.2 Seguimiento y previsión del transporte de contaminantes

En la gestión de una crisis es necesario conocer el estado actual de la situación y realizar una previsión de su evolución. En el caso particular de la contaminación accidental marina, será necesario en un primer momento localizar la contaminación (las manchas de petróleo), realizar su seguimiento y prever el alcance futuro.

La evolución tanto espacial como temporal de una contaminación masiva influirá en la toma de decisiones, haciendo participar poco a poco más agentes (local, regional, estatal o incluso internacional).

4.2.1 Localización y Seguimiento

A lo largo de la crisis es necesario conocer en todo momento la situación de las manchas de petróleo en alta mar (las mayores concentraciones del contaminante), ya sea para recuperarlo mediante embarcaciones especializadas (buques anticontaminación) como para seguir su pista antes de llegar a tierra. En función de las circunstancias del vertido y del volumen derramado, se forman multitud de manchas, pudiendo alcanzar kilómetros cuadrados de extensión. En cuestión de horas o días el vertido se fracciona, complicando las tareas de seguimiento.

Para realizar el seguimiento y localización de dichas manchas existen diversas técnicas que son complementarias:

Observación directa

Seguimiento directo mediante buques, embarcaciones menores y helicópteros. Si bien es fácil reconocer las manchas de fuel o petróleo desde el mar, resulta más difícil desde el aire, pudiéndose confundir con otro tipo de producto o incluso fenómeno (*bloom* de algas, zonas de convergencia, etc.). Incluso en malas condiciones meteorológicas resulta imposible realizar vuelos de reconocimiento.



Figura 2.16 Barcos de limpieza del fuel del *Prestige* (izq.) y avistamientos de manchas

[Fuentes: AZTI, Servicio de Aduanas Francesas]

Boyas de deriva

Cada vez más, se utilizan boyas o baliza de deriva para realizar el seguimiento específico de un grupo de manchas. Este seguimiento se realiza en tiempo casi-real, retransmitiendo su posición e incluso ciertas características del medio marino vía satélite (ARGOS) o vía radiofrecuencia (balizas o PTR).

Existen diferentes tipos de boyas, más o menos sofisticadas, pudiendo incluir lastres (para favorecer la deriva por corrientes profundas) o una especie de vela para se arrastradas exclusivamente solo por el viento como vemos en la foto de la izquierda de la Figura 2.17; en la foto de la derecha vemos como se le incluyó a una boya utilizada durante la crisis del *Prestige* unos tableros para que quedará realmente anclada a la masa viscosa e impenetrable de las manchas emulsionadas de fuel oil.

La representación de las posiciones sucesivas de estas boyas es de mucha utilidad en el proceso de calibrado de los distintos modelos de circulación y previsión de deriva de las manchas. Como ejemplo, en la Figura 2.18 se ilustra un mapa de las posiciones de una de la boyas utilizada durante la crisis del *Prestige* para realizar un seguimiento de las corrientes superficiales en la posición de hundimiento del petrolero.

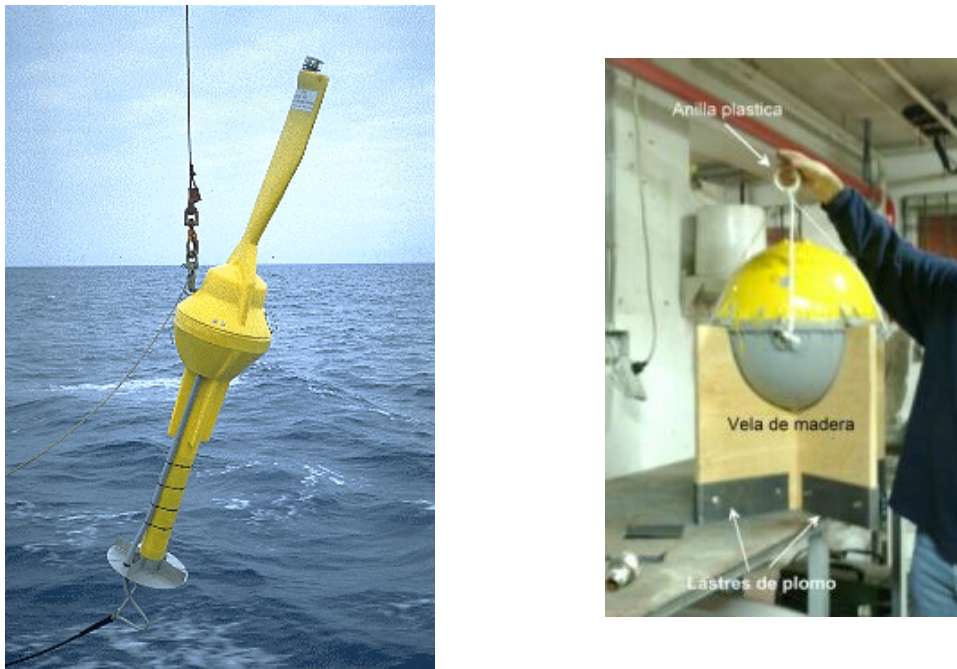


Figura 2.17 Boyas de deriva: de viento (izq.) y utilizada durante el *Prestige*
[Fuente: Météo-France, ICM]

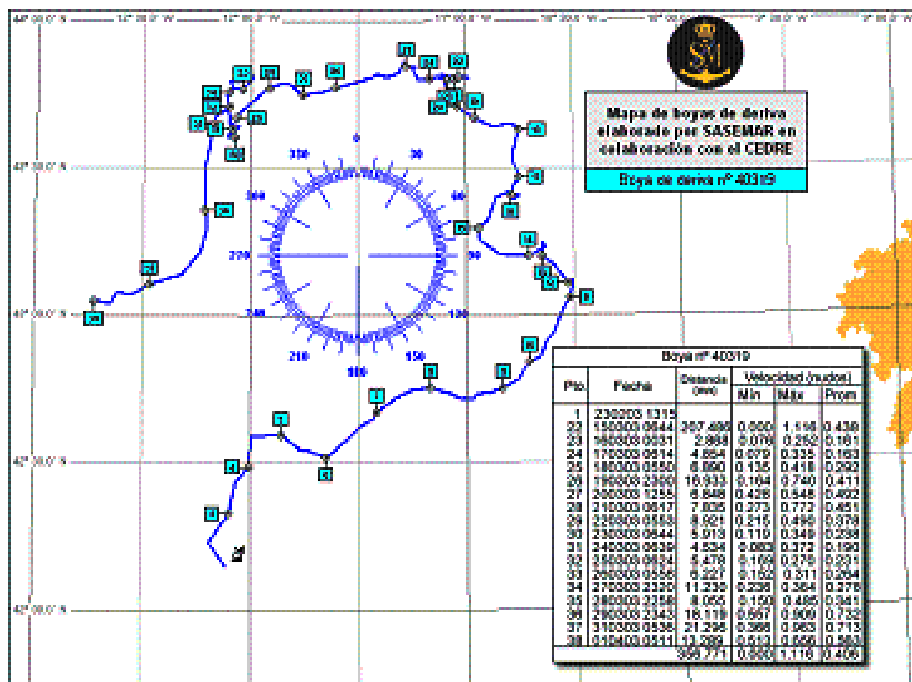


Figura 2.18 Mapa de posiciones de una boya de deriva utilizada durante la crisis del *Prestige* (17/12/2002) [Fuente: Sasemar]

La información que se puede extraer del seguimiento de estas boyas permite calibrar en el modelado de circulación la influencia relativa del viento sobre la deriva total del objeto o manchas flotantes (*Capítulo 3*).

Imágenes satélite

Para el caso de los hidrocarburos se puede utilizar el seguimiento vía satélite mediante el uso de imágenes radar de apertura sintética (SAR). Estas *imágenes* son independientes de la cobertura del cielo pero en cambio necesitan unas ciertas condiciones meteorológicas para que sean efectivas. La información que aportan es relevante cuando el viento (oleaje) dominante en la zona de estudio está comprendido en un determinado rango.

Las imágenes radar indican la rugosidad (a nivel de oleaje) de la superficie del mar; ante la presencia de petróleo u alguna sustancia en la superficie del mar, esta se alisa, creando zonas de sombra (no rugosas). Por tanto, si existe petróleo flotando en el mar, queda representado en las imágenes como zonas oscuras.

El problema o clave de la cuestión reside en el tratamiento de la información captada por el satélite: en cierta manera debe ajustarse la *tonalidad* de la respuesta recibida, lo que dará una mayor o menor oscuridad a la imagen. Así y bajo ciertas circunstancias (según estado del mar, turbulencia del medio, presencia de otros contaminantes flotantes) se pueden confundir zonas oscuras con petróleo derramado que realmente no existe (*falsos positivos*).

Este tipo de imágenes suele ser de muchísima ayuda en el caso de tener que cubrir grandes extensiones (caso del *Prestige*, ver Figura 2.19) o para la identificación de vertidos operacionales ilegales (Figura 2.3). Sin embargo, no siempre existe una buena cobertura suficiente de satélites sobre la zona afectada (zonas de paso de los satélites preestablecidas, tiempo de paso excesivo entre dos tomas, etc.). Esto hace que sea difícil programar el uso operativo de estas herramientas.

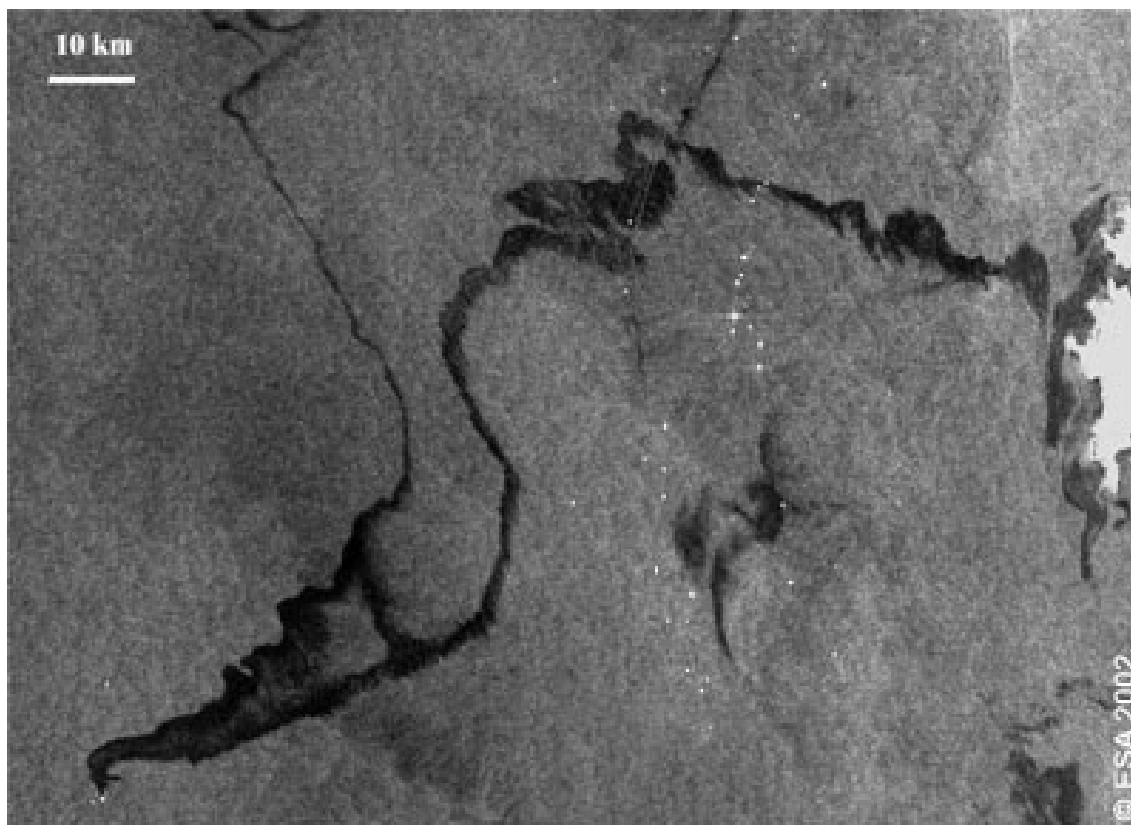


Figura 2.19 Imagen SAR del vertido del *Prestige* (17/11/2002) [Fuente: ESA]

De todas formas, estas imágenes nos aportan mucha información útil en tiempo de crisis. Por ejemplo, en la anterior Figura 2.19 podemos comprobar la magnitud del derrame (estela desdoblada), apreciar el intenso tráfico marítimo en el dispositivo DST (puntos brillantes) e incluso distinguir las estelas claras de otros buques cuando cruzaron la mancha (finas líneas claras en el tercio superior de la mancha).

Para la calibración de este tipo de imágenes pueden emplearse mediciones-comprobaciones *in situ*, para garantizar la existencia de manchas en la superficie, descartando así falsos positivos. Para ello, es fundamental relacionar y enlazar con el resto de fuentes *presenciales* de información anteriormente descritas.

Otra alternativa es el uso de imágenes de radiómetro de muy alta frecuencia (AVHRR de la NOAA), donde las diferencias de temperatura entre las manchas en superficie y el agua permiten igualmente un seguimiento de la contaminación (Dervillé y Jouvenot, 1994).

Partes de observación

Las manchas localizadas son reportadas cada día en los mapas de síntesis a fin de realizar su seguimiento y/o recuperación en el mar. La futura posición de dichas manchas se prevé para anticipar las tareas de rastreo, por ejemplo estableciéndose los planes de vuelo de los aviones.

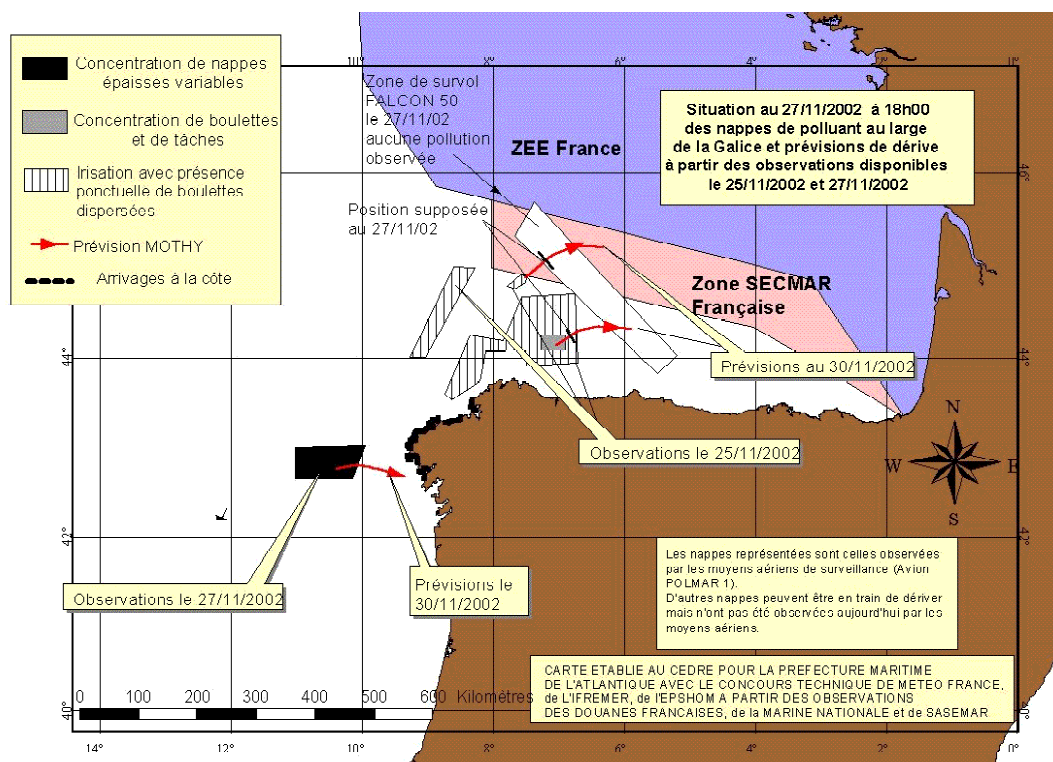


Figura 2.20 Parte de localización y previsión de la deriva de las manchas del *Prestige*

www.le-cedre.fr

Así, en los partes diarios de los equipos de seguimiento, se incluyen las posiciones de las manchas observadas, los equipos y embarcaciones de limpieza movilizados, los partes meteorológicos y la previsión de deriva de dichas manchas (Figura 2.20).

En el caso francés, *el Cedre* es el instituto encargado de gestionar y centralizar este tipo de información, generando diariamente informes de la situación.

4.2.2 La Previsión de la deriva

Como veremos en los siguientes apartados, en la actualidad existen organismos encargados de suministrar partes y previsiones océano-meteorológicas en caso de situaciones de emergencia en el mar. En ciertos países, esta información de apoyo suele ser suministrada por los Servicios Meteorológicos.

Para poder prever la deriva de un contaminante en el mar es necesario enlazar datos disponibles de la situación actual con diversos modelos de previsión (Figura 2.21):

- meteorológica (vientos, temperatura y presión atmosférica)
- oceanográfica (corrientes, propagación del oleaje)
- deriva del contaminante (transporte por las corrientes, viento y oleaje)
- envejecimiento del contaminante (evaporación, etc.)

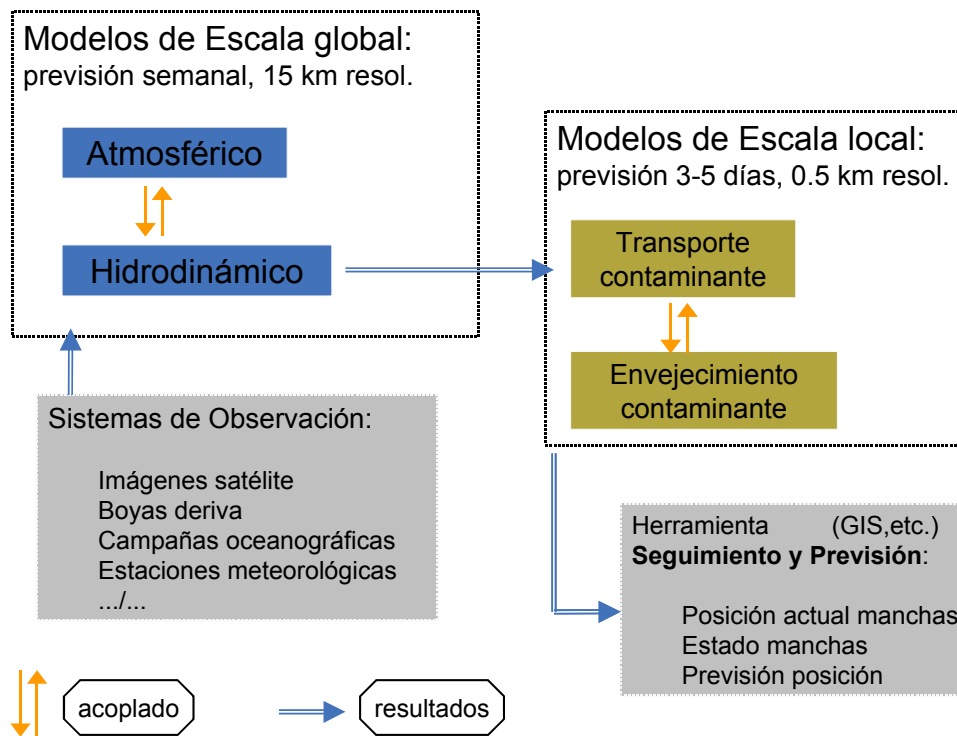


Figura 2.21 Estructura de un sistema de previsión marina

Partiendo de una situación inicial (atmósfera, océano) y de la posición de una mancha observada, se lanza el sistema de previsión para predecir su deriva.

En Francia, el servicio meteorológico (Météo-France), en caso de incidente y/o contaminación marina, aporta los partes océano-meteorológicos así como la previsión a medio y largo plazo de la deriva de las manchas avistadas. Durante la crisis del *Prestige*,

y según el acuerdo de colaboración del Plan Vizcaya entre España y Francia, Météo-France suministró los partes de deriva de las diferentes observaciones realizadas.

En la Figura 2.22, se comparan las previsiones realizadas con el Sistema de Previsión francés con las observaciones satélite para la primera semana de la contaminación por el *Prestige*.

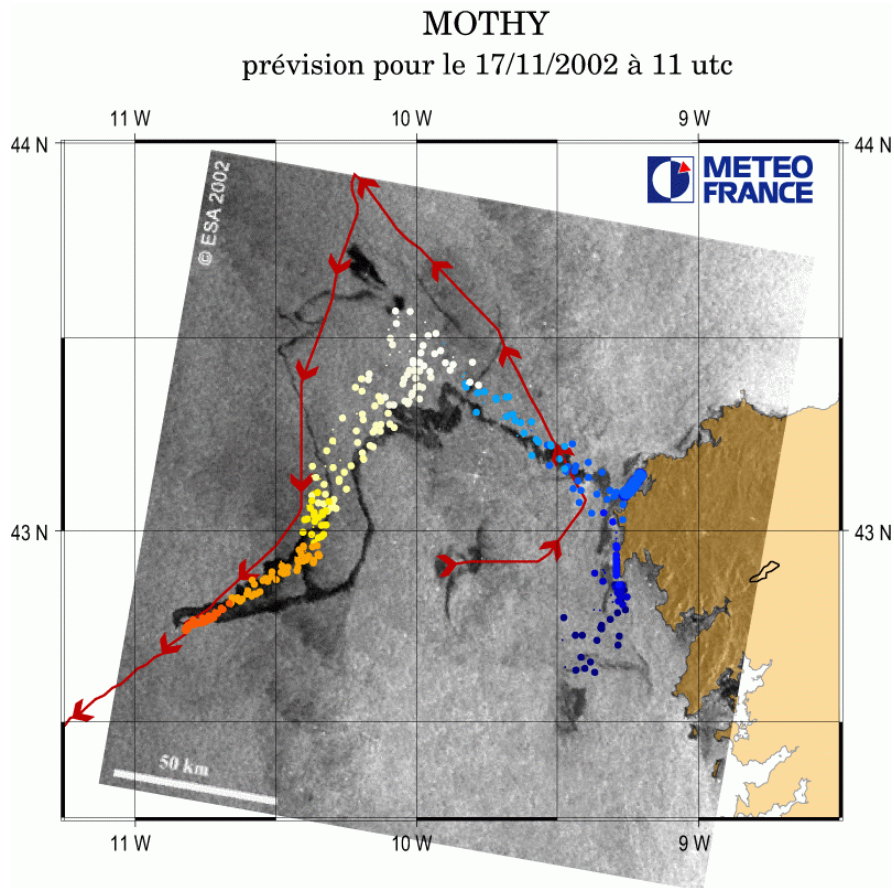


Figura 2.22. Validación de las previsiones con imágenes radar [Fuentes: Météo-France y ESA]

4.3 Sistemas observacionales y Oceanografía Operacional

4.3.1 Marco general de los sistemas observacionales

El concepto de Oceanografía Operacional parte de la necesidad de disponer de una información lo más detallada posible del Océano y de su relación con la atmósfera, para la utilización de sus recursos y la gestión de los problemas que en él residen.

Esto se materializa mediante tres actividades principales: adquisición de datos, modelado y difusión de los resultados. El objetivo que se persigue es poder suministrar a un usuario externo, de forma clara y concisa, información relativa a:

- descripción del estado actual del mar y de sus recursos vivos
- previsión continua de las futuras condiciones del mar

- recopilación datos históricos / climáticos para el análisis de tendencias de larga duración (cambio climático)

De forma mucho más establecida en el campo de la Meteorología desde la década de los '60, este planteamiento parte de la base de que tanto las mediciones como los modelos no son más que una estimación de la realidad física: el objetivo es ver en que forma combinada podemos acercarnos mejor para conocer la realidad.

Este tipo de Sistemas observacionales y de previsión requieren un gran esfuerzo científico-técnico, en la que multitud de organismos y centros de investigación ponen en común conocimiento y recursos para potenciar el desarrollo de técnicas de medición océano-meteorológica y de su modelado.

Sistemas Observacionales mundiales

En 1992, la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED), dentro de su Agenda 21 solicitó la creación de un sistema mundial de observación global de los océanos con el fin de proveer la necesaria información para la predicción oceánica y atmosférica, para la gestión del océano y de las zonas costeras.

En respuesta a ello, y coordinado por diversos organismos mundiales como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Organización Meteorológica Mundial (*World Meteorological Organization*, WMO) se puso en marcha el Sistema Mundial de Observación Oceánica (en inglés *Global Ocean Observing System*, GOOS). Este Sistema Observacional funciona en estrecha relación con el sistema de Vigilancia Meteorológica Mundial (*World Weather Watch*, WWW). De hecho, ambos Sistemas participan al Sistema de Observación del Clima Global (*Global Climate Observing System*, GCOS) ya que existe una marcada interacción entre las componentes oceánicas, meteorológicas (atmosféricas) y climáticas.

La organización y estructuración de dicho GOOS se reproduce a diferentes escalas en subproyectos regionales, aplicados a los distintos océanos o analizando aspectos específicos de un problema. Así, el sistema se estructura según:

- Programas internacionales a gran escala que incluyen el intercambio de datos (Programa de los Barcos de Oportunidad, VOP, datos de boyas de medidas o sistema de observación mundial del nivel del mar)
- Experimentos para la Asimilación de Datos en el Océano Global (GODAE) o de los perfiladores Argo
- Programas regionales centrados en áreas específicas de especial interés como el EuroGOOS en Europa o el IOGOOS en el Océano Índico.

La puesta en acción del GOOS está controlada por una Comisión Mixta entre la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO y la Organización Meteorológica Mundial (WMO), desarrollando las tecnologías de observación y las herramientas predictivas para llegar al estadio operacional.

Beneficios de los Sistemas operacionales de previsión

Cuando estos sistemas observacionales están implementados en un área limitada se potencia su utilidad en la toma de decisiones en casos de crisis. La explotación de un sistema de este tipo, puede aportar a un potencial usuario externo información relativa al:

- Seguimiento y evolución de vertidos contaminantes en el mar. Esto incluye la previsión de su futura localización para la movilización de medios humanos y materiales en la respuesta contra la contaminación, pero también se pueden deducir estados pasados para investigar la fuente / causante de una contaminación dada.
- Seguimiento de objetos y/o naufragos a la deriva, como por ejemplo objetos peligrosos para la navegación (contenedores semi-sumergidos perdidos o barcos sin rumbo)
- Calidad del medio marino. Por ejemplo para la prevención de posibles episodios de algas tóxicas, protección de piscifactorías, etc. Además, este conocimiento del medio puede ser incorporada a planes de Gestión Integrada de Zonas Costeras o en la elaboración de proyectos de ingeniería portuaria.

Servicios y Redes Mundiales de Emergencia

Los servicios meteorológicos nacionales son por antonomasia institutos con vocación “previsionista”; tienen una larga tradición en la observación-seguimiento-previsión de la atmósfera. No es de extrañar pues que en ellos suela recaer también la previsión marina, puesto que disponen de los conocimientos y de la infraestructura adecuada.

En el ámbito nacional, los servicios meteorológicos aportan información a todo un conjunto de usuarios, tanto privados como públicos, en especial a aquellos organismos y autoridades encargadas de la lucha contra la contaminación en el mar. A escala mundial, la Organización Meteorológica Mundial (WMO) puso en funcionamiento en 1994 el Sistema de Intervención de Emergencia para la Contaminación Marina (*Marine Pollution Emergency Response Support System*, MPERSS). Este sistema divide los Océanos en diversas áreas de responsabilidad (MPI), correspondientes a las Metareas definidas para el sistema SAR (*Search and Rescue*) del Convenio SOLAS.

A cada una de estas áreas oceánicas se le asigna un Coordinador Meteorológico de Zona (CMZ), que es un servicio meteorológico nacional. El objetivo es crear un sistema coordinado mundial que suministre información océano-meteorológica en los casos de emergencias marítimas que se produzcan más allá de las aguas territoriales / nacionales.

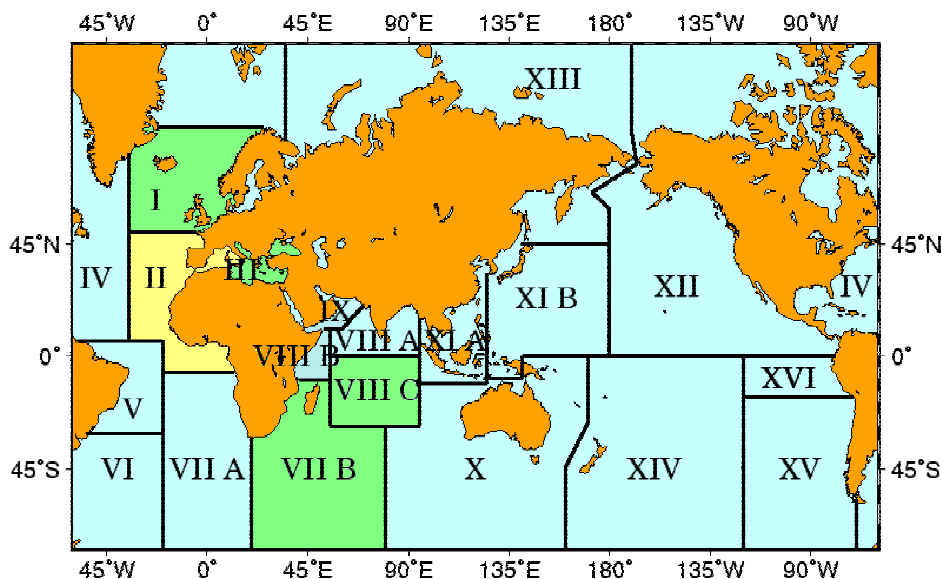


Figura 2.23 Metareas MPERSS de responsabilidad de Météo-France

(www.meteo.fr)

4.3.2 *Sistemas de medida y Sistemas de modelado numérico*

Como ya hemos apuntado, la Oceanografía Operacional está basado en tres conceptos: conocer el estado actual del medio marino mediante redes de medida, prever su estado futuro mediante uso de modelos numéricos que utilizan estos datos iniciales y la difusión del conjunto de información al grupo de usuarios/explotadores del sistema.

Sistemas de Medida y Bases de Datos Oceanográficos

La observación o monitorización marina se basa en la implantación de redes de medida de diversos parámetros tanto oceanográficos (corrientes, temperatura, salinidad) como meteorológicos (viento, presión atmosférica).

En el caso español, el ente público Puertos del Estado mantiene una extensa red de medidas formada por:

- red en aguas profundas (a más de 200m profundidad) formada por 12 estaciones océano-meteorológicas
- red costera: medición del oleaje en 22 puntos costeros
- red en zonas portuarias: mareógrafos y estaciones meteorológicas
- red de correntímetros

Existen técnicas específicas para el tratamiento y almacenamiento de los datos obtenidos. El objetivo es facilitar el uso público de estos datos, sabiendo que resultan de mayor utilidad cuando han sido previamente procesados y/o tratados estadísticamente. De esta forma, es necesario realizar un esfuerzo en la homogenización de los datos/resultados para simplificar su uso, aplicando criterios de calidad y sobretodo unificando formatos.

En la actualidad, existen diversos estándares internacionales para el formato de los ficheros de datos. Uno de los más reconocidos es el NetCDF, utilizables en cualquier plataforma de trabajo, desarrollado por la *University Corporation of Atmospheric Research* (UNICAR, *).

* <http://www.unidata.ucar.edu/packages/netcdf/>

Este estándar auto-contenido y flexible está orientado a facilitar la transferencia de datos entre usuarios distintos, sin necesidad de ninguna otra especificación (como número de variables, dimensiones, unidades, etc.). Sin embargo, este tipo de formatos no es el más recomendado para el almacenamiento debido al gran tamaño de los archivos que se generan.

Por otro lado, se ha avanzado mucho en el diseño de Servidores de Acceso en Línea (LAS) que permiten a un usuario remoto (vía internet) disponer de datos oceanográficos, pudiendo personalizar la extracción (perfiles, área de interés, resolución de los datos, etc.) y definir su formato de almacenamiento (Beegle-Krause et al., 2003). Un buen ejemplo de inventariado de datos océano-meteorológico es el Sistema DODS (*Distributed Oceanographic Data System*, **) a partir del proyecto OPeNDAP (*Open Source Project for a Network Data Access Protocol*).

** <http://unidata.ucar.edu/packages/dods/>

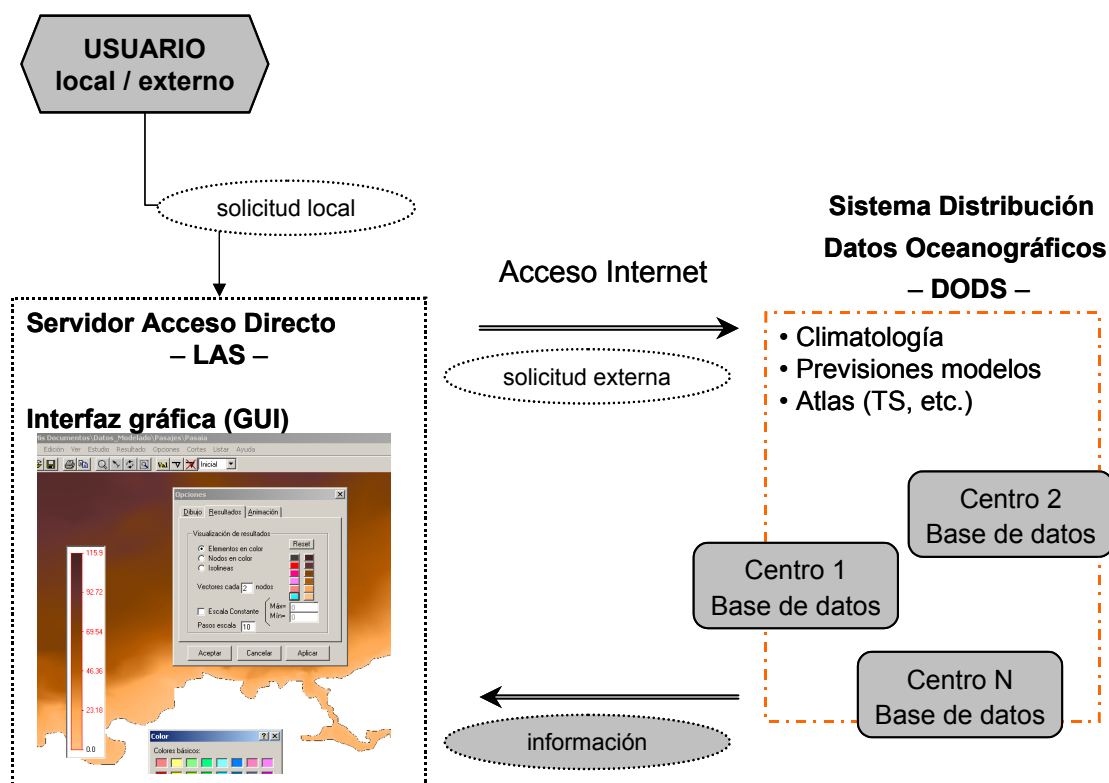


Figura 2.24 Distribución de la información y acceso al servidor LAS en la Distribución Datos Oceanográficos DODS

El objetivo final de un sistema acoplado LAS/DODS es independizar el centro que elabora y/o alberga los datos (climatologías, resultados de modelos) de los potenciales usuarios externos a ese centro (ver Figura 2.24). La distribución de los datos y la estructura interna de su almacenamiento dejan de ser limitantes para la difusión de la información a usuarios externos, pudiendo compartir a un mayor público.

Este tipo de accesos remotos a bases de datos oceanográficas pueden servir, en un caso de emergencia en el que haya que dar una respuesta rápida, para la base de modelos de previsión (transporte de contaminantes). Este fue el caso planteado por la NOAA durante la crisis del *Prestige* en diciembre 2002 (Beegle-Krause, 2003a).

Sistemas de Modelado Oceanográfico y asimilación de datos

La predicción meteorológica y oceanográfica se aborda en la actualidad mediante técnicas de modelado numérico y cálculo por ordenador. Estas técnicas más o menos sofisticadas nos permiten acercarnos a una realidad física muy compleja. Cuando se trata de prever una situación futura de forma continua, es necesario re-alimentar o actualizar el modelo con datos nuevos cada cierto tiempo. Esta técnica se denomina **asimilación de datos**, consiguiendo una mejora de la capacidad predictiva del modelo. Por ello, es fundamental que exista un flujo ágil de información entre el sistema de medidas y el sistema de previsión, minimizando en lo posible el tiempo de transferencia y asimilación de datos; de hecho, se intenta que este procesado se realice en tiempo casi-real (*Near Real Time*, NRT).

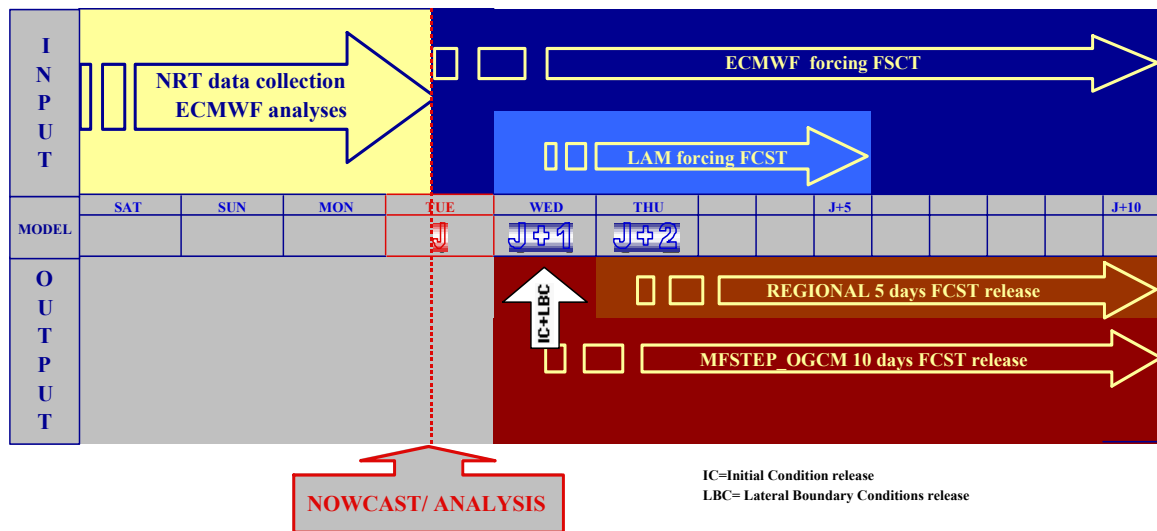


Figura 2.25 Esquema semanal de la operativa de asimilación datos (MFSTEP, 2003)

El concepto de *operacionalidad* se basa en la disponibilidad casi-inmediata de los resultados de las previsiones. Esto implica que los modelos de previsión deben estar corriendo en continuo, alimentándose constantemente de los datos reales. Al cabo del tiempo, los sistemas de previsión operacionales generan un volumen de información muy importante que puede ser utilizado por ejemplo en los estudios de climatologías.

Debido a la diversidad y magnitud de procesos que se suceden en el océano y en la atmósfera, el modelado debe abordarse a diferentes escalas temporales y espaciales. La variabilidad de estos procesos viene ligada al comportamiento turbulento de los procesos de circulación y de forzamiento del océano. Así, en la práctica tendremos un **anidamiento** de modelos, tanto espacial como temporalmente. Este anidamiento (o *downscaling*) se realiza a través de las condiciones de contornos de los modelos. Los resultados de los modelos de gran escala sirven de datos iniciales para los modelos de alta resolución (ver Figura 2.25).

El concepto de sistema de modelado mediante anidamiento es relativamente reciente, pues por un lado los recursos computacionales (de cálculo y almacenaje) son en

la actualidad mucho más potentes. Por otra parte, se tiene un mejor conocimiento del complejo medio físico acoplado atmósfera-oceano.

Como se esquematiza en la Figura 2.21, para el caso de un sistema genérico de previsión oceanográfica, el modelo atmosférico alimenta en su frontera atmósfera-oceano al modelo hidrodinámica de circulación que a su vez alimenta al modelo de transporte de contaminantes. En definitiva cada modelo estará asociado un rango espacio-temporal de validez.

Podemos encontrar hoy en día muchos ejemplos de sistemas operacionales de medición y previsión. Típicamente, estos sistemas se enmarcan en los servicios meteorológicos, pues en ellos recae buena parte del esfuerzo de observación y modelado.

A parte del caso más cercano de Météo-France ilustrado anteriormente, existen otros servicios meteorológicos que realizan actividades parecidas: es el caso de las previsiones realizadas de forma operacional por el servicio meteorológico inglés (UKMO) durante la crisis de la Guerra del Golfo en Arabia Saudí (enero 1991). Como presenta Proctor et al. (1994), se realizaron una serie de previsiones de deriva de las enormes manchas de hidrocarburos que resiguieron las costas unos 200 km (se calcula que se arrojaron al mar cerca del millón de toneladas). Como en muchas otras ocasiones, el disponer de unas buenas mediciones permitió obtener unas previsiones bastante ajustadas.

4.3.3 *Proyectos en desarrollo: el MFSTEP y el ESEOO*

El Sistema de Previsión del Mediterráneo (*Mediterranean Forecasting System*, MFS) es un proyecto en el que participan cerca de 48 centros de 15 países distintos, centrados básicamente en el arco Mediterráneo. Como participantes hay varios centros Oceanográficos y Meteorológicos así como Universidades, Centros y Consejos Nacionales de Investigación.

Este Sistema, planteado en una primera etapa piloto (*Pilot Project – PP*, entre 1999-2002) y en una segunda etapa pre-operacional (*Toward Environmental Predictions – TEP*, 2003-2005) está financiado por el V Programa Marco de la Comunidad Europea (*V Framework Program: Energy, Environment and Sustainable Development*).

Por sus propias características de Sistema Observacional, este Proyecto está estrechamente relacionado con las actividades del EuroGOOS, del GODAE y más recientemente del MERSEA. Según la localización y especialización de los participantes en el proyecto se ha definido en el Mediterráneo diversos dominios de estudio: gran escala (global), regional y local (de plataforma continental) con unas resoluciones aproximadamente de 5, 3 y 1km, respectivamente (www.bo.ingv.it/mfstep).

Siguiendo el principio de la oceanografía operacional, las tres componentes básicas del proyecto MFSTEP son:

- Sistema de observación: desarrollo de tecnologías instrumentales y mejora de las técnicas de transferencia de datos para obtener la monitorización en tiempo casi-real.
- Sistema de previsión: alimentación al conjunto modelos numéricos de previsión, mediante técnicas de asimilación de datos; anidamiento y escalado tanto de los diversos dominios de estudio (global, regional y local) como del conjunto de

procesos reproducidos por los modelos (atmósfera, océano, transporte y ecosistemas).

- Sistema de explotación: el flujo de datos, tanto mediciones como previsiones, es tratado automáticamente para su mejor difusión; los resultados del Proyecto MFSTEP se diseminan en NRT a los usuarios finales mediante interfaces gráficas.

Así, los 6 objetivos principales del Proyecto MFSTEP son:

- 1) Mejora del sistema de monitorización en casi-tiempo real de gran escala ya desarrollado en el anterior MFSP
- 2) Inclusión de nuevas técnicas de observaciones y de medidas bioquímicas
- 3) Desarrollo de la predicción a 10 días a gran escala (del Mediterráneo) océano-meteorológica y a 3 día a nivel regional
- 4) Acoplamiento atmósfera-océano, con forzamiento de alta resolución en las áreas regionales y costeras
- 5) Implementación de los modelos de ecosistemas acoplados al sistema de previsión para reproducir la variabilidad de los elementos bioquímicos (nutrientes, etc.)
- 6) Diseminación de las previsiones en NRT a los usuarios finales y desarrollo de aplicaciones específicas de ciertos participantes.

Otro ejemplo interesante es el Proyecto de Establecimiento de un Sistema Español de Oceanografía Operacional (ESEOO), propuesto al Ministerio de Ciencia y Tecnología tras la catástrofe del *Prestige*. En vista de los acontecimientos sucedidos a raíz del hundimiento del petrolero (noviembre 2002), diversos organismos nacionales y regionales promovieron la idea de establecer un sistema operacional de oceanografía que permitiera en un futuro un seguimiento y previsión de situaciones de emergencia (Fanjul et al., 2004).

Este proyecto reagrupa en parte a los diversos centros que participaron activamente, pero de forma aislada y descoordinada, en las tareas de seguimiento y previsión de la contaminación por las mareas negras del *Prestige*.

5. Conclusiones y Referencias del Capítulo

Como resumen de lo expuesto en el presente Capítulo, podemos destacar los siguientes puntos:

- La contaminación por hidrocarburos tienen diversas fuentes, tanto terrestres como marinas. El transporte marítimo, y en especial el de productos petrolíferos representa una fracción más de estos aportes.
- El volumen anual de aportaciones de tipo operacional, asociadas al uso y transporte de combustibles fósiles que degeneran en residuos oleosos, son muy superiores a los derrames accidentales de petroleros u otras instalaciones fijas.
- Las normativas internacionales sobre prevención de la contaminación marina encuentran dificultades en su implementación debido a conflictos de intereses de tipo político y económicos. A pesar de existir reglamentaciones técnicas, hace falta una mayor participación de los agentes que intervienen en el sector marítimo y comercio energético (armadores, petroleras, autoridades portuarias, administraciones marítimas, usuarios). Por un lado, es necesario un seguimiento del cumplimiento de las normativas existentes (imposición de sanciones para los infractores) y por otro lado, es necesario invertir en el desarrollo de mejores infraestructuras portuarias de recepción.
- La globalización del mercado energético (diversificación de la demanda y de la oferta), así como el constante incremento en la demanda de combustibles fósiles hace prever una saturación del transporte marítimo. Las grandes flotas nacionales o perteneciente a las compañías petrolíferas dan paso a una flota atomizada, de peor calidad y difíciles de evaluar tanto técnica como fiscalmente.
- Las consecuencias de la contaminación por hidrocarburos son muy diversas, en función del tipo de producto y del hábitat amenazado. Mientras que la contaminación crónica de tipo urbana o industrial puede tener efectos medioambientales graves a largo plazo, la contaminación masiva por derrames accidentales suele estar asociada a crisis de tipo socio-económico.
- Las herramientas de gestión para la contaminación marina deben estar enmarcadas en los planes de contingencias. El objetivo es prever y preparar la gestión eficaz de los recursos disponibles para la crisis.
- En una situación de emergencia, es fundamental conocer el estado presente así como su futura evolución. En este sentido, los productos derivados de la Oceanografía Operacional juegan un papel fundamental como apoyo a la toma de decisiones.
- Un Sistema de Previsión se basa en la incorporación de los datos obtenidos en un Sistema Observacional a un Sistema de Modelado. Mediante técnicas de asimilación de datos en modelado y del anidamiento de los dominios de cálculo, es posible plantear el estudio de problemas físicos a diferentes escalas espaciales y temporales.

Bibliografía y Referencias específicas del Capítulo II

De forma excepcional en el presente Capítulo II, y por el tipo de información general consultada (Documentos Oficiales, Reglamento, etc.) no hemos considerado oportuno citarlas expresamente a lo largo del texto.

Transporte y legislación marítima

- [1] Domovic, D., 2000. Introduction to Oil Spill Response. Personal Communication, Malta, 15 pp.
- [2] Comisión Europea / DGET, 2002. El accidente del Prestige. Expediente de prensa 21/11/2002. Comisión Europea, Dirección General de Energía y Transporte, 8 pp.
- [3] Comisión Europea / DGET, 2003. El accidente del Prestige. MEMO, Actualización 8/01/2003. Comisión Europea, Dirección General de Energía y Transporte, 12 pp.
- [4] FIDAC, 2002. Informe Anual 2002. Fondos Internacionales de Indemnización de Daños debidos a la Contaminación por Hidrocarburos, Londres, UK, 182 pp.
- [5] Los Verdes / Alianza Libre Europa, 2003. Propuestas finales sobre Seguridad Marítima. Conferencia de Bayona sobre Seguridad Marítima, 11/04/2003, 8 pp.
- [6] Martínez de Osés, F.X., 2003. Una perspectiva normativa con ocasión del accidente del Prestige. Revista 1ºCuatrimestre 2003-nº17, Instituto Navegación España, pp. 3-10
- [7] ITOPF, 2003. Oil Tanker Spill Statistics. International Tankers Owners Pollution Federation, London, 8 pp.
- [8] UNCTAD, 2002. Review of Maritime Transport - 2002. Ed. United Nations Conference on Trade and Development UNCTAD, Geneva, 146 pp.
- [9] Vice-Presidencia Marítima / INAVE, 2003. Análisis de las causas del hundimiento del Prestige. Revista 2ºCuatrimestre 2003-nº18, Instituto Navegación España, pp. 68-71
- [10] Zamora, J. & León, A., 2000. La contaminació des dels vaixells: realitat i solucions. "Actes de les jornades ""Qui embruta el mar?""", ed. Museu Marítim, Drassanes reials de Barcelona / DIBA", pp. 9-32
- [11] Zamora, J. & León, A., 2003. Serie Prestige. Ed. CELSEM - UPC, Barcelona,
- [12] Zamora, J., 2003. La desgracia del Prestige. Informe, publicación personal., 101 pp.

Mercado Energético

Los datos mundiales de consumo energético pueden diferir según las fuentes; según como se definan las áreas o regiones de estudio, en particular lo que se considera como Europa (más o menos países, incluyendo por ejemplos la antigua URSS, etc.).

- [13] BP, 2003. BP Statistical Review of World Energy - 2002. Ed. British Petroleum, 44pp.
- [14] IEA, 2003. Key World Energy Statistics - 2002. Ed. International Energy Agency, 78 pp.
- [15] TOTAL, 1982. Le pétrole et le raffinage. Audio-visuel de divulgation, Ed Total, 32 pp.
- [16] WMO, 2003. Climate: into the 21th Century. WMO, Ed. William Burroughs, Cambridge University Press, 240 pp.

Contaminación por hidrocarburos

- [17] AFSSA, 2003. Evaluation des risques sanitaires qui pourraient résulter de la contamination des produits de la mer destinés à la consommation humaine, suite au naufrage du pétrolier Prestige. Saisine n°2003-SA-0007, Agence française de sécurité sanitaire des aliments, 20-jan-03, 10 pp.
- [18] Albaigés, J., Porte, C., Pastor, D., Biosca, X. & Solé, M., 2000. The integrated use of chemical and biochemical markers for assessing the effects of the Aegean Sea oil spill in the Galicia coast (NW Spain). *Oil & Hydrocarbon Spills II*, C.A.Brebbia & G.R.Rodríguez Ed., WITPress, pp. 73-84
- [19] API, 1999. Fate of Spilled Oil in Marine Waters. An Information Booklet for Decision-Makers. *Health & Environmental Sciences Dept*, Publication n° 4691, American Petroleum Institute, 43 pp.
- [20] Bermejo, P. , Pascual, C., Moreda, A. & Rodríguez, C.J., 2003. Contaminación abiótica producida por el vertido del Prestige y su impacto en los productos de pesca. En "*El Impacto del Prestige*", Fundación P. Barrié de la Maza, Dir. F. Gonzalez Laxe, IIEG", 247-303 pp.
- [21] Braer, A., 2003. Commentaires concernant les risques liés au ramassage du fuel lourd du Prestige. *Note du Cedre*, Novembre 2003 - www.le-cedre.fr, 9 pp.
- [22] Comisión Europea / DGE, 2001. Impact Reference System - Effects of Oil in the Marine Environment: Impact of Hydrocarbons on Fauna and Flora. Comisión Europea, Dirección General Medio Ambiente, Protección Civil y Accidentes MedioAmbiente, 87 pp.
- [23] Doerffer, J.W., 1992. Oil Spill Response in the Marine Environment. Pergamon Press Ltd, Headington Hill Hall, Oxford, England

- [24] Font, E., Roura, N., Leira, M., Franch, M., Puig X. & SEO/BirdLife, 2003. Propuesta de evaluación de la incidencia del vertido del Prestige sobre las costas de Galicia. Grupo Naturalista Hábitat y SEO/BirdLife, 65 pp.
- [25] Greenpeace, 2003. Prestige: Protección a toda costa. Campaña de Océanos, Greenpeace, 64 pp.
- [26] IFP, 2003. Caractérisation et comportement dans l'environnement du fioul « Prestige ». Institut Français du Pétrole, *Rapport Actualités* Mars 2003 - www.ifp.fr, 31 pp.
- [27] Kennish, M.J. (Ed.), 1997. Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution. *The CRC Marine Science Series*, CRC Press, Ed. M.J. Kennish, Boca Raton, 544 pp.
- [28] OSPAR Commission, 2000. Quality Status Report 2000: Region IV – Bay of Biscay and Iberian Coast. OSPAR Commission, London., 134 pp.
- [29] Walker, D. , Michel, K., Coleman J.C. & Michel, J., 2003. Oil in the Sea: Changes in the Nature of Sources and Inputs since 1985. *2003 International Oil Spill Conference*, API, Washington D.C., 4 pp.

Una mención especial requieren los documentos relativos a la evaluación de la crisis del *Prestige*. Planteados desde un enfoque científico, recogen diversos aspectos de la problemática asociada al hundimiento y contaminación del petrolero:

- “El Impacto del Prestige: Análisis y evaluación de los daños causados por el accidente del Prestige y disposiciones para la regeneración medioambiental y recuperación económica de Galicia” 2003. Dir.: González Laxe, F., Edita *Fundación P.Barrié de la Maza*, Instituto de Estudios Económicos de Galicia, 651pp.
- “La Huella del Fuel. Ensayos sobre el Prestige”, 2004. Edita *Fundación Santiago Rey Fernández-Latorre*, A Coruña.

Herramientas de gestión

- [30] Beegle-Krause, CJ, 2003. Advantages of Separating the Circulation Model and Trajectory Model: GNOME Trajectory Model Used With Outside Circulation Models. *26th Artic Marine OilSpill Program*, Tech. Seminar, Environment Canada, Ottawa, Canada, pp. 825-840
- [31] CAMCAT, 2003. Plan Especial de Emergencias por Contaminación Accidental de las Aguas Marinas. Dpt de Justicia i Interior, SDG Protección Civil, Generalitat de Catalunya
- [32] CEOS, 2000. The use of Earth Observing Satellites for Hazard Support: Assessments & Scenarios. *Final Report of the CEOS Disaster Management Support Group*, 214 pp.

- [33] Fanjul, E. , et al., 2004. Establishment of a Operational Oceanography System at Spanish coastal waters. *Proc. of OCEAN OPS'04 Workshop*, JCOMM, May 04, Toulouse, France
- [34] Jolly, G.W., Mangin, A., Cauneau, F., Calatuyud, M., Barale, H.M., Snaith, H.M., Rud, O, Ishii, M., Gade, M., Redondo, J.M. & Platonov, A., 2000. The Clean Seas Project (ENV4-CT96-0334) Final Report. DG XII/D of the European Commission. Bruselas, <http://www.satobsys.co.uk/CSeas/report.html>
- [35] JRC, 2000. RAPSODI: Remote sensing anti-pollution system for geographical data integration. *Rapport of RAPSODI IST-1999-12290 Project*, Joint Research Center - EU, 6 pp.
- [36] MFSTEP, 2003. Mediterranean Forecasting System Project: Towards Environmental Predictions. MFSTEP Description of Work (www.bo.ingv.it/mfstep), 50 pp.
- [37] NOAA / API / USCG / EPA, 2001. Characteristics of Response Strategies: A Guide for Spill Response Planning in Marine Environments. Dept Comercio de los EEUU, NOAA, American Petroleum Institute, US Coast Guard, US Environ. Protection Agency, 77 pp.
- [38] NOAA / HAZMAT, 2001. Guia para la evaluación del litoral costero.Fichas prácticas. Dept Comercio de los EEUU, NOAA - Servicio Nacional Oceanico, 35 pp.
- [39] NOAA / HAZMAT, 2001. Asistencia para la identificación de petróleo en aguas abiertas - para Observación aérea. Dept Comercio de los EEUU, NOAA - Servicio Nacional Oceanico, 20 pp.
- [40] NOAA / HAZMAT, 2001. Manual de Análisis de Trayectorias. Dept Comercio de los EEUU, NOAA - Servicio Nacional Oceanico, 41 pp.
- [41] Platonov, A.K., 2002. Aplicación de imágenes de satélite SAR en los estudios de contaminación marina y de dinámica de las aguas en el Mediterráneo Occidental. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 140 pp.
- [42] Proctor, R., Flather, R.A., Elliott, A.J., 1994. Modelling tides and surface drift in the Arabian Gulf - application to the Gulf oil spill. *Continental Shelf Research*, Vol. 14, No.5, Elsevier Science Ltd., pp. 531-545