

LAS LECCIONES DE LA CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE*

Antonio Figueras, Emilio Lora-Tamayo D'Ocón, Joaquín
Tintoré, Fiz F. Pérez, J. Albaigés, Francisco Sánchez, M.
Anxo Murado García, Emilio Esteban Rodríguez Merino,
Ramón Hernán Paadín

**LAS LECCIONES DE LA
CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE***

BIBLIOTECA DE CIENCIAS, 23

ANTONIO FIGUERAS, EMILIO LORA-TAMAYO D'OCÓN, JOAQUÍN TINTORÉ,
FIZ F. PÉREZ, J. ALBAIGÉS, FRANCISCO SÁNCHEZ, M. ANXO MURADO
GARCÍA, EMILIO ESTEBAN RODRÍGUEZ MERINO,
RAMÓN HERNÁN PAADÍN

**LAS LECCIONES DE LA
CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE***

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

MADRID, 2005

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y su distribución.



MINISTERIO
DE EDUCACIÓN
Y CIENCIA



CONSEJO SUPERIOR
DE INVESTIGACIONES
CIENTÍFICAS

© CSIC

© Del texto: los autores.

NIPO: 653-05-140-9

ISBN: 84-00-08408-X

Depósito legal: M-8883-2005

Producción editorial: Servicios Integrales de Edición Távara, S.L.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Presidente del CSIC, D. Carlos Martínez Alonso, a los Vicepresidentes Montserrat Torné Escasany y José Manuel Fernández de Labastida, al Director del Servicio de Publicaciones del CSIC, Miguel Angel Puig-Samper, su apoyo en la publicación de este volumen. Agradezco a la Fundación BBVA el permiso para incluir el capítulo «La catástrofe del Buque *Prestige*» previamente publicado en el libro *El conocimiento Científico como referente político en el Siglo XXI* editado por la Fundación BBVA. Agradezco a mi mujer y mis hijas su paciencia y apoyo.

Antonio Figueras
Editor

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	13
PRÓLOGO.....	15
LA CATÁSTROFE DEL BUQUE <i>PRESTIGE</i>	17
Introducción.....	17
El papel del Comité Científico Asesor en la catástrofe del <i>Prestige</i>	18
El problema.....	18
El producto.....	20
La reacción. Primeros pasos.....	21
Primera fase de Neutralización: Obturación de fugas.....	23
Estructuración de las tareas del Comité Científico Asesor.....	25
Neutralización de los pecios. Fase II.....	25
El fuel-oil que queda en los pecios.....	30
El Informe del Comité Científico Asesor.....	32
Actuaciones proactivas del CCA.....	32
Grupo de Oceanografía Operacional (GO2).....	33
Seguimiento analítico de manchas de fuel-oil.....	33
Acumulación de fuel-oil en el fondo marino.....	34
Estudio de sismicidad.....	34
Estudio de corrosión.....	35
Modelo térmico de enfriamiento del fuel-oil.....	36
Programa de Intervención Científica (PIC).....	37
El papel del CSIC.....	38
Conclusiones.....	41
LA INVESTIGACIÓN, UN ELEMENTO CLAVE DEL FUTURO ECONÓMICO Y SOCIAL: EL PAPEL DEL CSIC ANTE EL VERTIDO DEL BUQUE <i>PRESTIGE</i>	45
El nuevo papel de la ciencia y el conocimiento para un verdadero desarrollo sostenible en el siglo XXI.....	45
El papel del CSIC durante la catástrofe del vertido del buque <i>Prestige</i>	47
La necesidad de apoyar de forma estructural una investigación de calidad.....	51
Referencias.....	52

LAS CARACTERÍSTICAS OCEÁNICAS EN EL ENTORNO DEL ACCIDENTE DEL <i>PRESTIGE</i>	55
Introducción.....	55
Condiciones meteorológicas y dinámica oceánica.....	55
Características relevantes del fuel y del agua en la zona del pecio.....	62
El enigma del fuel remanente en el pecio y su temperatura.....	63
Estabilidad del fuel dentro de la columna de agua.....	67
Conclusiones.....	68
Agradecimientos.....	69
Referencias.....	69
LOS VERTIDOS ACCIDENTALES DE PETRÓLEO AL MAR: COINCIDENCIAS Y CONTRASTES	71
El consumo mundial de petróleo.....	71
Los aportes de hidrocarburos al mar.....	73
Principales cuestiones que se plantean tras un derrame.....	75
Características generales del petróleo.....	76
Comportamiento del petróleo en el medio marino.....	78
Procesos físicos.....	79
Procesos de degradación.....	80
Parámetros indicadores del origen y envejecimiento de un vertido. Redes de vigilancia.....	83
Distribución espacial y temporal de los hidrocarburos en la zona del vertido....	84
Algunas consideraciones sobre el impacto de un vertido de petróleo sobre los organismos marinos.....	87
Agradecimientos.....	88
Referencias.....	89
EL VERTIDO DEL <i>PRESTIGE</i>. IMPACTO SOBRE LOS SERES VIVOS	91
Introducción.....	91
Agentes contaminantes.....	92
Aguas residuales.....	92
Metales pesados.....	93
Compuestos organoclorados.....	94
Hidrocarburos poliaromáticos.....	94
El fuel del <i>Prestige</i>	96
Impacto del vertido del <i>Prestige</i>	97
Impacto sobre la flora.....	98
Impacto sobre el plancton.....	98
Impacto sobre la fauna.....	98
Impacto sobre especies comerciales.....	99

Impacto de vertidos de petróleo y sus derivados. Accidentes anteriores: <i>Aegean Sea</i> y <i>Exxon Valdez</i>	102
<i>Aegean Sea</i>	102
<i>Exxon Valdez</i>	103
Criterios a emplear en acciones de limpieza posteriores a vertidos de petróleo y sus derivados en ecosistemas marinos.....	105
Acciones de limpieza y repoblación (Ministerio de Medio Ambiente e iniciativas privadas).....	106
Referencias.....	107
Agradecimientos.....	107
SEGUIMIENTO DEL IMPACTO DE LOS VERTIDOS DEL <i>PRESTIGE</i> SOBRE LAS COMUNIDADES DE PLATAFORMA Y SUS RECURSOS	109
Distribución del fuel y sus derivados sobre el fondo de la plataforma.....	110
El ecosistema de la plataforma continental.....	112
Las comunidades del fondo de la plataforma.....	114
Variaciones espacio-temporales en la distribución y abundancia de las principales especies de interés comercial.....	118
Ecología trófica de las principales especies de peces y crustáceos.....	120
Impactos directos e indirectos sobre las principales pesquerías.....	121
Modelización del impacto.....	121
BIORREMEDIACIÓN. PSEUDOPROBLEMAS, PROBLEMAS Y UNA EXPERIENCIA	123
La noción de biorremediación.....	124
Los pseudoproblemas.....	126
El petróleo como contaminante a medio camino entre lo homoiobiótico y lo xenobiótico.....	128
Algunas claves de la respuesta biológica a los compuestos xenobióticos.....	128
Algunas claves del metabolismo de los hidrocarburos.....	131
Los ensayos de Sálvora.....	135
Problemas de los criterios de evaluación.....	136
Tratamientos y resultados.....	138
Los problemas reales. Elementos para un balance de la biorreparación.....	143
El tipo de petróleo.....	143
El entorno del proceso.....	143
La formulación biorreparadora.....	144
La microbiota implicada en el proceso.....	146
Elementos para un balance.....	148
Agradecimientos.....	150
Bibliografía sumaria.....	150

ACTUACIONES REALIZADAS EN EL PARQUE NACIONAL DE LAS ISLAS ATLÁNTICAS DE GALICIA CONSECUENCIA DE LA CATÁSTROFE DEL BUQUE <i>PRESTIGE</i>	153
Situación de partida.....	153
Actuaciones para la extracción de residuos procedentes de la contaminación de hidrocarburos.....	155
Limpieza de playas arenosas y superficies continuas.....	156
Hidrolimpieza de las zonas intermareales rocosas y tramos supralitorales.....	161
Retirada de hidrocarburos de fondos marinos.....	161
Biorremediación en zonas costeras rocosas (intermareal y supralitoral.....	164
Colocación de barreras anticontaminación.....	165
Situación actual.....	166
Efectos sobre los ecosistemas.....	166
Reflexiones finales.....	173
RECUPERACIÓN DEL FUEL DEL BUQUE PETROLERO <i>PRESTIGE</i>	175
Encargo a Repsol YPF.....	175
El Proyecto 2003.....	176
Robots.....	176
Campaña de adquisición de datos.....	177
Extracción de fuel mediante bolsas lanzaderas (prueba piloto).....	178
Proyecto de extracción de fuel en 2004.....	179
Operaciones marinas 2004.....	181
ÍNDICE DE AUTORES.....	183

PRESENTACIÓN

A casi dos años de la catástrofe del *Prestige*, recoger en un ciclo de conferencias distintos aspectos de la visión y la intervención científica y técnica en la gestión de su remediación es una excelente iniciativa, por cuanto las contribuciones mantienen la frescura y riqueza de detalles propia de acontecimientos inmediatos y la suficiente lejanía temporal como para beneficiarse de la decantación de componentes de «ruido y contaminación» mediáticos.

Porque ésa fue una de las principales dificultades que estuvo presente desde el primer momento y pude constatar y padecer desde mi papel de Presidente del Comité Científico Asesor para la Catástrofe del *Prestige*, ligada sin duda a los componentes sociales y políticos que tuvo el tema. Es sabido que los científicos no fuimos llamados sino hasta después de haberse producido el hundimiento y la proliferación de hipótesis, opiniones y recomendaciones que todavía hoy se producen en relación con el periodo inmediatamente anterior encuentran, a mi juicio, un terreno propicio en la ausencia de una aproximación/contribución científica organizada frente a la catástrofe, desde su comienzo.

El calificativo de «organizada» es importante porque es verdad que la inquietud y profesionalidad de muchos investigadores y entidades de investigación les llevaron desde el primer momento a ofrecer sus conocimientos para intentar solucionar el problema. Una forma espontánea y desinteresada que es preciso reconocer y agradecer, pero que algunas veces y por falta de una adecuada organización o una claridad de mandato –y la crítica es inherente al método científico– contribuyó también a generar más «contaminación y ruido».

Por eso creo que la iniciativa de estructurar la intervención científica desde un Comité regido por los principios de **independencia, transparencia y competencia** fue buena. Quizá este último factor de competencia en mi caso particular no se cumplía en cuanto a las especificidades temáticas de la catástrofe, pero en el caso del resto de los miembros del Comité, tengo que reconocer su excelente especialización y subrayar la dedicación, la profesionalidad y el buen sentido que pusieron en juego. Esta constatación la hago extensiva a muchos otros investigadores de Universidades y OPIs cuya contribución más o menos puntual fue solicitada desde el Comité y en buena medida a los que han puesto posteriormente su dedicación al servicio del tema, desarrollando proyectos de I+D en el marco del Programa de Intervención Científica, diseñado a iniciativa del Comité y financiado desde la CICYT.

Justo es reconocer que los mencionados principios fueron respetados por las instancias gubernamentales durante toda la operación del Comité Científico y ello fue

sin duda determinante para acentuar su credibilidad tanto frente a la sociedad como frente a la comunidad científica nacional e internacional.

Una de las conclusiones —obvia por otra parte— que he podido extraer de esta experiencia se refiere a la necesidad de implicar a los investigadores y su conocimiento en las emergencias/catástrofes desde sus primeros momentos, con el mandato y la capacidad de estructurar una intervención científica organizada, incluyendo el necesario debate de los expertos pero con una voz única y autorizada en base al análisis, al método científico y al contraste de pareceres, pero manteniendo por encima de todo una visión pragmática, que no pierda de vista el objetivo marcado por la emergencia, objetivo que a veces no está en una dirección coincidente con la aproximación científica más pura. Eso sin duda propicia que los mensajes lleguen claros a la sociedad y al Gobierno, huyendo de protagonismos y poniendo, como no puede ser de otra manera, la ciencia al servicio de la Sociedad. Si eso es así, ésta lo agradecerá y el papel de la Ciencia, a través del reconocimiento de esa Sociedad, saldrá fortalecido.

Mi percepción personal ha sido ésa y en el caso del *Prestige* y la intervención del Comité Científico he visto muestras de la confianza que la Sociedad tiene en la Ciencia y en los científicos.

No la defraudemos, y creo que reflexiones como las que se presentan en este libro contribuyen sin duda a afianzarla.

Emilio Lora-Tamayo
Presidente del Comité Científico Asesor para la Catástrofe del *Prestige*
Barcelona, Febrero 2006

PRÓLOGO

ANTONIO FIGUERAS

LAS LECCIONES DE LA CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE*

Un país como España, en el siglo XXI, no puede estar a merced de los caprichos del viento. Eso estaba muy bien cuando en la época colonial dependíamos del viento para que llegasen a España lo que arrancábamos de aquellas tierras. Nuestra Pesca, nuestra Acuicultura, y el Turismo no pueden depender de que el viento role o no o en un momento tan crítico como el que hemos vivido. Un país que es casi una isla no puede permitirse estos lujos. El intenso tráfico marítimo que soporta la autopista náutica (la M-30 del Atlántico), que transcurre frente a las costas gallegas incluye la posibilidad de que se produzcan accidentes como el que ahora nos preocupa. Lo milagroso es que no haya más problemas de este tipo.

Cada año se vierten en los Océanos, como resultado de operaciones habituales del transporte marítimo, accidentes y descargas ilegales, miles de toneladas de petróleo. Los Océanos son enormes pero no infinitos y a este ritmo pronto lo convertiremos en un bonito estercolero. Aunque es difícil predecir, los efectos de un vertido de esta naturaleza pueden durar bastante ya que aunque desaparezca la mancha negra pueden persistir elementos tóxicos que siguen afectando a la vida en la mar. No hemos aprendido de lo que se hizo bien y mal en circunstancias similares (*ExxonValdez*, *Erika*, *Mar Egeo*, ...). Para prevenir la degradación del medio marino es más útil una estrategia de precaución y prevención que de reacción. Por desgracia parece que esta última es la que se ha decidido emplear.

España necesita urgentemente un plan de actuación frente a estas catástrofes, que se ensaye periódicamente. Es imprescindible la creación de una unidad de crisis coordinada, con presencia del Consejo Superior de Investigaciones Marinas, el Instituto Español de Oceanografía, Centros dependientes de las Comunidades Autónomas, especialistas de las Universidades y técnicos de los Ministerios, para prevenir catástrofes de este tipo. Por supuesto una condición necesaria es que los políticos se comprometan

a escuchar y a poner en práctica las recomendaciones de esta unidad. España no se puede permitir carecer de un Centro que coordine planes de emergencia y que actualice los conocimientos científicos y técnicos que sobre el tema se generan continuamente. Tomen nota los que tienen el poder ahora y en el futuro. Esta lección, y las anteriores, nos está costando mucho pagarlas.

En ocasiones como ésta es cuando mejor se perciben las carencias y la necesidad de reforzar la investigación y desarrollo en las ciencias y tecnologías marinas. Aunque en los últimos años la inversión en el sistema español de Ciencia y Tecnología se ha incrementado, la inversión ha sido insuficiente. Sin embargo, aún siendo limitada ha permitido la generación de una masa crítica de investigadores, excelentemente preparada, que constituye en cualquier proyecto de política científica el imprescindible para abordar nuevas y más ambiciosas metas. La clase política y la sociedad española han de asumir que el progreso de un país viene determinado por el nivel de inversión en Investigación y Desarrollo. España, una península, debe diseñar y ejecutar urgentemente una política ambiciosa e integradora en el campo de las Ciencias Marinas que le permita asumir el papel de liderazgo que por la calidad de sus investigadores, situación geográfica y desarrollo empresarial le corresponde.

No lo duden, la inversión en investigación y tecnología, será rentable para aquellos que, con visión de futuro, sepan invertir en el conocimiento.

En este libro se recogen las conferencias que tuvieron lugar en el Instituto de Investigaciones Marinas (CSIC) de Vigo a mediados del 2004. Al publicarlas, incluyendo información actualizada, pretendemos transmitir a la sociedad lo que se ha hecho desde distintos sectores para entender y paliar las consecuencias de este accidente.

Desde el primer momento la comunidad científica española ha intentado responder, entre otras, a las siguientes preguntas:

- ¿Sigue vertiendo el Prestige?
 - ¿Cuánto tiempo va a durar ese vertido?
 - ¿Qué se puede hacer para evitarlo?
 - ¿Qué daños ha causado en la zona próxima al hundimiento?
 - ¿Qué daños ha causado y causará a la pesca del banco de Galicia y zonas próximas?
 - ¿Qué pérdidas ha causado en el marisqueo y pesca litoral de las zonas afectadas?
 - ¿Cuánto tiempo tardará en recuperarse la biodiversidad y las poblaciones de especies comerciales de interés comercial?
 - ¿Se puede acelerar esa recuperación mediante acciones de repoblación y biorremediación?
 - ¿Cuánto tiempo no se podrán consumir los productos de la zona?
 - ¿Aunque no sepan a petróleo, es totalmente seguro consumirlos?
- Muchas de ellas se responden en este libro y se sigue trabajando en otras para poder dar respuesta a las que quedan en el aire.

LA CATÁSTROFE DEL BUQUE *PRESTIGE**

EMILIO LORA-TAMAYO D'OCÓN

INTRODUCCIÓN

El hundimiento del buque *Prestige* y las consecuencias del vertido de su carga, accidente cuyos ecos perduran y sus consecuencias están todavía presentes, es sin duda un caso paradigmático de emergencia y catástrofe, en el que la intervención y la respuesta científicas resultaron imprescindibles, tanto para analizar el problema, como para plantear actuaciones y explicar a la sociedad la situación desde el conocimiento y el método científico. Estos aspectos deben estar muy presentes también en el análisis de las causas directas y remotas e impregnar las políticas dirigidas a eliminar los riesgos de que se repitan esas mismas catástrofes.

Este capítulo detalla el papel del Comité Científico Asesor para el *Prestige*, creado a las tres semanas del hundimiento. El Comité tuvo, entre otras misiones, la de coordinar y proponer iniciativas y actuaciones científicas, que se materializaron desde el momento del hundimiento, a cargo de investigadores de los Centros Públicos de Investigación (Universidades y OPIs).

No entraremos en las causas del accidente ni en la gestión de sus efectos y consecuencias, en la que posiblemente se pueden identificar ahora aciertos y errores. En

* Este capítulo ha sido publicado previamente en el libro *El conocimiento Científico como referente político en el Siglo XXI*. Editor: César Nombela Cano-Fundación BBVA, 2004, ISBN: 84-95163-89-6.

la historia de la catástrofe hay sin duda muchas facetas y esta contribución pretende centrarse en algunas de ellas, las que aporten información para la inevitable reflexión que planteamos y que fundamentalmente corresponden a los papeles del Comité Científico Asesor y del Consejo Superior de Investigaciones Científicas, que estuvieron íntimamente ligados. Por supuesto que este último no fue el único Organismo que se aproximó científicamente a la catástrofe, pero es de justicia reconocer que jugó un papel muy importante durante los primeros meses del problema.

Los dos papeles han pretendido responder a cuestiones que en aquellas circunstancias críticas estaban sin resolver. En algún caso todavía hoy se sigue trabajando para resolver algunas de las cuestiones inicialmente planteadas. Entre ellas podemos citar las siguientes: ¿Cuánto está vertiendo el *Prestige*?; ¿cuánto tiempo va a durar ese vertido?; ¿qué se puede hacer para evitarlo?; ¿qué daños ha causado en la zona próxima al hundimiento?; ¿qué daños ha causado y causará a la pesca del banco de Galicia y zonas próximas?; ¿qué pérdidas ha causado en el marisqueo y pesca litoral de las zonas afectadas?; ¿cuánto tiempo tardará en recuperarse la biodiversidad y las poblaciones de especies comerciales?; ¿se puede acelerar esa recuperación por medio de la repoblación o de la bio-remediación?; ¿durante cuánto tiempo no se podrán consumir los productos de la zona?; ¿cuáles son los criterios de seguridad alimentaria que hay que adoptar?

EL PAPEL DEL COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR EN LA CATÁSTROFE DEL *PRESTIGE*

El problema

El petrolero *Prestige* de 243,5 metros de eslora, se construyó en 1976 con arreglo a la regulación anterior al convenio internacional MARPOL 73/78 (Prevention of Marine Pollution from ships) y con un solo casco. Sus mas de 25 años de vida, en la que se alternaron los periodos de navegación con los de mantenimiento, terminaron un 19 de noviembre del año 2002 a mas de 100 millas al oeste de la costa gallega, afectando trágicamente el entorno medioambiental inmediato y lejano.

El buque había zarpado el 7 de noviembre del puerto letón de Ventspils en dirección sur, con una carga máxima de 76.973 toneladas de fuel pesado del tipo M-100¹. A las 14 horas y 15 minutos del 13 de noviembre de 2002, emitió una señal SOS de peligro indefinido, desde una posición situada a unas 30 millas del cabo Finisterre que, en ese momento, soportaba olas de 8 metros de altura. A los dos minutos, emitió un «mayday» en el que se pedía el rescate de la tripulación porque, según quedó

¹ M-100 en terminología rusa, equivalente al nº 6 en terminología anglosajona o al nº 2 en terminología francesa.

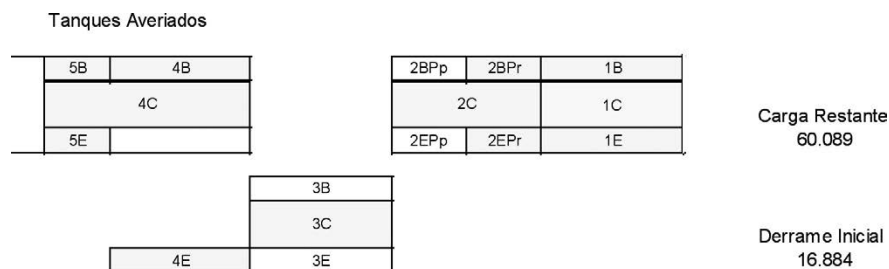


Figura 1. Esquema de posición de los tanques del *Prestige* y de su estado de carga declarado (los tanques 1B, 1E, 2BPp, 2EPp, 2C, 3C, 4B, 4C, 4E, 5B y 5E son los que contenían fuel oil). La parte central «desgajada» es la que se perdió en el momento del hundimiento.

registrado, «...el barco está muy escorado y tiene riesgo de hundimiento...». Con este incidente comienza la catástrofe. Al parecer una fisura en el costado de estribor provocaba la pérdida de fuel-oil, que ya ese mismo día podía advertirse en inspecciones aéreas.

Finalmente, tras varias jornadas de remolque, el buque se partió en dos a las 7:00 del día 19 de noviembre de 2002. Casi cuatro horas mas tarde, a las 10:45 se hundió la popa a los 42° 12,6' N y 012° 03,0' W y el mar se tragó la proa a las 15:18, a los 42° 10,8 N y 012° 03,6' W.

La rotura del buque afectó aparentemente a cuatro tanques (3B, 3E, 3C y 4E) de los que en principio solamente dos contenían fuel-oil (3C y 4E), tal como esquematiza la Figura 1.

Al iniciarse el hundimiento, las zonas de la rotura, tanto de la parte de proa como de la parte de popa, quedaron mirando hacia el fondo marino, adoptando ambas una posición casi vertical porque estaban vacíos los espacios de lastre, los piques de proa y popa y la cámara de máquinas. En su proceso de descenso estos espacios se fueron inundando de agua, lo que sin duda cambió la posición de los centros de gravedad de ambas partes, que giraron sobre sí mismas, apuntando al fondo con la zona de proa y la de popa respectivamente. Ello hizo que ambas zonas sufrieran un impacto de fuerte intensidad con el fondo, perdiéndose el timón, dañándose la zona del codaste, deformándose la proa y originándose una onda de presión, ayudada por los efectos inerciales de la maquinaria, que pudo romper algún mamparo de separación de los tanques y provocar desde el fondo marino un nuevo vertido masivo, directamente desde algún tanque dañado o indirectamente por inundación de la cámara de máquinas con el fuel-oil de los tanques de la parte de popa.

Este pecio tocó fondo a 3.565 metros de profundidad después de haber resbalado por una pendiente del 30% en las estribaciones del Banco de Galicia; por su parte, el de proa yace a 3.830 metros en una superficie mucho menos inclinada. Las variaciones de localización son pequeñas con respecto al punto del hundimiento: 42° 10,6' N

y 12° 03,8' W la popa y 42° 12,37' N y 12° 02,93' W la proa. A esas profundidades las condiciones son peculiares: la temperatura es de 2'6° Celsius, la presión es de 365-393 atmósferas, la concentración de oxígeno es de 5,4 ml/l y la presión parcial de CO₂ es de 0,1 atm.²

Debido a que la sismicidad de la zona es moderada, al buen asentamiento de ambas partes del buque en el fondo marino y a encontrarse la estructura equilibrada en cuanto a cargas se refiere, muy inferiores a las cargas de diseño de la estructura, los dos pecios se encuentran en una situación estable con baja probabilidad de alteración a medio plazo³.

El producto

La carga que llevaba el *Prestige* era fuel-oil pesado de tipo M-100, un derivado del petróleo obtenido como fase residual en su proceso de destilación, con una densidad a 15°C de 992,1 Kg/m³ y a 2,6° C de 1.012 Kg/m³ (nótese que la densidad del agua del mar a 3°C es de 1.045 Kg/m³). Su composición era C, 85,8 %; H, 11 %; S, 2,28 % (22% Hidrocarburos saturados, 50% hidrocarburos aromáticos, 28% resinas / asfaltenos)⁴. Se trata, pues de un residuo de destilación tipo naften-aromático, que emulsiona fácilmente en el mar con contenidos de 45-50% de agua y se calcula que tiene unas pérdidas por evaporación y disolución en dos meses, inferiores al 5%. Como muchos otros factores, la biodegradabilidad no era conocida en ese momento aunque se estimó inferior al 10% en los primeros meses. Otro dato de primera importancia para valorar la capacidad del fluir el fuel-oil, es la viscosidad⁵ (dinámica y cinemática):

T (°C)	mPa·s	n (m ² /s)
0	1.400.000	1,38
3,12	500.000	4,94x10 ⁻¹
5,25	300.000	2,96x10 ⁻¹
10,25	160.000	1,58x10 ⁻¹
15,25	45.000	4,45x10 ⁻²
20,12	19.500	1,93x10 ⁻²
50	850	8,40x10 ⁻⁴

Tabla 1. Viscosidad del fuel oil del *Prestige* en función de la temperatura

² CCA Prestige: «Informe preliminar sobre la corrosión del casco», Madrid, Enero 2003; <http://www.ccaprestige.es>

³ CCA Prestige: «Informe preliminar sobre la sismicidad en la zona del SW de Galicia», «Nota sobre la estabilidad del pecio», Madrid, Diciembre 2002; <http://www.ccaprestige.es>

⁴ <http://csicprestige.iim.csic.es>.

⁵ <http://www.ciemat.es>, obtenida del <http://www.le-cedre.fr>

La reacción. Primeros pasos

Ante la catástrofe, la reacción en el plano científico se produjo en tres fases consecutivas. En primer lugar se puede hablar de una reacción «científica sin coordinar». Esto es, debido al interés que al investigador le produce cualquier situación fuera de lo normal, así como a la responsabilidad social de la que es consciente, hubo grupos más o menos institucionalizados que se pusieron a trabajar, recogiendo muestras, analizando los restos de fuel-oil y haciendo acopio de información. Se pueden citar, como reconocimiento a su trabajo, los esfuerzos de investigadores de Le Cedre (Francia) con el Instituto de Química Ambiental (IQAB-Barcelona) del CSIC, los investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas (IIM-Vigo), también del CSIC y varios profesores de universidades gallegas. Es preciso resaltar que algunas de sus actuaciones llevan fecha de 19 de noviembre (recogida y análisis de muestras, valoración puntual de daños en aves y organismos marinos,...). En conclusión, los científicos trabajaron desde el primer momento, si bien hay que reconocer que en algunos casos de forma no suficientemente coordinada con las administraciones implicadas *in situ* en la zona afectada.

En segundo lugar, para coordinar todas las actuaciones (y no solo las que afectan al plano científico), el Gobierno constituyó una «Comisión Interministerial para el *Prestige*», presidida por su Vicepresidente Primero y Ministro de la Presidencia. Uno de sus primeros cometidos fue el de encargar a instituciones científicas españolas, en concreto al CSIC y al IEO, el estudio de ciertos aspectos parciales, entre otros los daños en las poblaciones demersales de seres vivos y las trayectorias de la marea negra.

En tercer lugar, se organizó una reacción «científica coordinada». En efecto, el 9 de diciembre de 2002, a iniciativa de la Comisión, se constituyó el «Comité Científico Asesor» (CCA). El CCA informaba y estaba en contacto con la Comisión Interministerial, en concreto con su Presidente, aunque logísticamente estaba amparado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología, mas concretamente por la Secretaría de Estado de Política Científica y Tecnológica.

Informar y estar en contacto no quiere decir ser un órgano portavoz. En efecto, desde el primer momento se establecieron y aceptaron tres condiciones o premisas sin las cuales el CCA estimó que no podría trabajar y que rigieron durante todo el período de actuación del CCA. Así, quedó claro que los miembros del CCA serían incorporados en razón de su **competencia** en los temas tratados, ya fuera en su condición de permanentes o invitados. Por otro lado el CCA sería **independiente** para trabajar sin ninguna indicación u orientación, mas que las que se derivaran de la aproximación científica a los temas que rodeaban el problema. Por último, se estableció el criterio de **transparencia** en las informaciones y conclusiones a las que llegara el CCA, con la única salvedad de informar de las mismas en primer lugar a la Comisión Interministerial, para a continuación dar a conocer esa información por los canales mas adecuados (habitualmente prensa y publicación en la web⁶ que se creó con ese fin).

⁶ <http://www.ccaprestige.es>

La condiciones fueron aceptadas sin discusión y no hubo el menor problema en mantenerlas durante el tiempo en que el CCA fue operativo, de tal manera que la única presión que en todo caso experimentó el Comité y que no fue pequeña, fue la asociada a la gravedad de la situación y la responsabilidad y trascendencia de sus decisiones y recomendaciones. Así las cosas, el análisis y estudio de los pecios para detener el vertido fue el objeto principal sobre el que se concentró inicialmente la atención del CCA, y se convirtió en objetivo secundario la intervención científica en su control, seguimiento, efectos y consecuencias. Debe tenerse presente que nunca el hombre había realizado trabajos de reparación / mantenimiento a la profundidad en que estaban los pecios y que por ello se trataba de un desafío científico y técnico sin precedentes.

Participaron como miembros permanentes en el CCA, 7 investigadores del CSIC (biólogos, químicos y físicos), 4 profesores de Escuela Superior de Ingenieros Navales (Universidades de Coruña y Madrid), 2 directivos de la empresa IZAR (dirección de reparaciones y de innovación), 1 investigador de IFREMER y otro de Le CEDRE (instituciones francesas), 1 investigador del IST (Instituto Superior Técnico de Lisboa), 1 investigador del NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU.), 1 investigador del CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales) y 1 investigador del IEO. Además colaboraron de forma puntual 2 investigadores del Instituto de Investigación en Química Ambiental de Barcelona (IIQAB) del CSIC, uno de ellos destacado desde el CCA en el «Grupo de estudio y seguimiento epidemiológico de los efectos sobre la salud a raíz del vertido del *Prestige*», creado en el Ministerio de Sanidad y otro comisionado desde el CCA en EE.UU. para analizar el estado de la tecnología americana en recuperación y tratamiento de vertidos, aceptando así una oferta de colaboración americana.

Es importante destacar la gran dedicación de todos los miembros del CCA, que durante los dos meses largos que duró su tarea tuvieron disponibilidad total de su tiempo y dejaron aparcadas otras obligaciones profesionales y personales.

El primer paso que dió el CCA fue valorar la situación porque ya existían algunos datos fidedignos. La Comisión Interministerial para el *Prestige*, había aceptado el ofrecimiento de inspeccionar la zona de los pecios utilizando el *Nautilé* y su buque nodriza, el *Atalante*, que la sociedad GENAVIR, del IFREMER (Instituto Francés para la Investigación Marina), había realizado a los pocos días del hundimiento. El *Nautilé* es un batíscafo tripulado (hasta 3 personas), capaz de descender a profundidades máximas de 6.000 metros, provisto de un pequeño ROV⁷ y de capacidad de manipular muestras utilizando dos brazos robotizados. El día 1 de diciembre el *Atalante* zarpó de Vigo en dirección a la zona del hundimiento, llevando ya a bordo algunos investigadores, dos de los cuales formaron parte posteriormente del CCA. El 2 de diciembre de 2002 fue localizada la proa del barco y el día 7 la popa, que estaba a 2 millas de la proa. Concluido el trabajo, volvieron a Vigo.

⁷ Remotely Operated Vehicle. Ver web de IFREMER-GENAVIR: <http://www.ifremer.fr/genavir/>

El 10 de diciembre, el recién creado CCA pudo analizar los datos aportados por esta campaña de localización de los pecios. Con los pocos datos de la misma se estimó que había 14 fugas de distinta naturaleza (9 en proa y 5 en popa), por las que se perdía un **caudal del orden de 125 Tm.** diarias. Inmediatamente y a través de los cauces establecidos (Comisión Interministerial), el CCA recomendó que el *Nautilo* volviera a sumergirse para, en primer lugar, **medir la temperatura** de salida del fuel-oil y, a continuación, **ensayara la obturación experimental**, siquiera provisional, de una de las fugas detectadas, con objeto de valorar la viabilidad de disminuir las pérdidas. Aunque el estado del mar no era muy favorable para las inmersiones del batíscafo, entre el 11 y el 16 de diciembre el *Nautilo* pudo bajar al pecio en dos ocasiones, recoger muestras de las fugas, tomar la temperatura en una de ellas (10,5° C⁸ el 12/12/02) y ensayar con éxito la obturación de la n° 3, correspondiente a la bita de proa-estribor, utilizando un disco de aluminio lastrado con granalla de acero.

Primera fase de Neutralización: Obturación de fugas

La vuelta a puerto del *Atalante* – *Nautilo* con esos resultados dejó claro que si bien la pérdida de temperatura asociada a la termalización del pecio iba a favor de un aumento de la viscosidad y por ello de una eventual reducción de los caudales de fugas, su volumen y número hacía prioritario y urgente, antes de pensar en soluciones de neutralización definitivas, obturar siquiera provisionalmente todas las que se pudiera, con la máxima eficiencia posible, lo cual se había demostrado realizable gracias al «experimento» realizado por el *Nautilo*. La valoración de las fugas y la solución teórica de obturación provisional que se proyectó para cada una de ellas, permitió fijar como objetivo que quedara una pérdida residual máxima (popa y proa conjuntamente) **inferior a 10-12 Tm. por día.**

Se planteó entonces **el dilema**: comisionar al *Nautilo* (vehículo de observación con cierta capacidad experimental y dificultades asociadas al clima) para esa tarea, o bien confiar en las propuestas que estaba recibiendo el CCA por parte de compañías *off-shore*, para emplear en esa tarea un ROV industrial de trabajo, como los utilizados en prospecciones petrolíferas en el mar o en el tendido de cables submarinos. Cada una de las alternativas tenía sus ventajas e inconvenientes. El *Nautilo*, por ejemplo, ofrecía experiencia probada de observación a profundidades mayores de 4.000 m, disponibilidad inmediata (estaba fondeado en el puerto de Vigo), conocimiento del pecio y había tenido éxito en la obturación experimental. Sin embargo, adolecía de algunos inconvenientes: si las olas eran superiores a tres metros, no podía operar

⁸ Es habitual que los petroleros transporten la carga de productos muy densos / viscosos a temperaturas del orden de 50° C para facilitar su carga / descarga. El que en salida de una fuga se midan 10° C de temperatura al cabo de mas de 20 días de estar la carga rodeada de agua a 2,6° C, da una idea de la baja conductividad calorífica del fuel-oil de los tanques.

y su capacidad de trabajo no sobrepasaba los límites de lo experimental. Por otro lado, el ROV se podía emplear las 24 horas del día con cualquier situación del mar. Además, estaba acostumbrado a operar en el fondo marino. Su experiencia se veía garantizada por tratarse de empresas auxiliares de potentes petroleras y, en fin, se comprometían a estar sobre el pecio en tres semanas.

En ese momento no se sabía que no había ninguna experiencia en trabajos de ROV a más de 3.000 metros y posteriormente, a lo largo del mes de enero, durante el análisis de las soluciones de neutralización definitiva, el CCA constató que por problemas técnicos no había ningún ROV capaz de trabajar a la profundidad de 4.000 metros que se requería⁹ (lo había sin embargo para tareas de observación). Por ello la decisión que tomó el CCA el 18 de diciembre, de encomendar el trabajo al *Nautilo*, se reveló crucial para concluir con éxito las tareas de obturación provisional, hasta dejar una **fuga residual inferior a 2 Tm. diarias**, el 13 de febrero de 2003.

El día 19 de diciembre el *Nautilo* comenzó a trabajar en popa y al día siguiente en proa con un fin: eliminar estachas y restos que impidían el libre acceso al pecio. Durante esa tarea se detectaron otras 6 fugas nuevas, lo que además de constituir una mala noticia, suponía que el **caudal de fuga debía sin duda ser superior a las 125 toneladas diarias, estimadas en un principio**.

A pesar de haber programado que el submarino tomara muestras y leyera la temperatura en varias fugas a lo largo de las campañas, la presión de las circunstancias hizo que desde el CCA se diera prioridad absoluta a la obturación de fugas. A ello dedicó el trabajo del *Nautilo*, en las siete campañas de su actuación que totalizaron 46 días de trabajo hasta el 15 de febrero de 2003, durante las que se efectuaron 106 horas de inmersión (la media de cada inmersión era de 4 horas). Además, el rendimiento de uso del *Nautilo* (días de trabajo posibilitado por el clima) fue del 56% (43% si se incluyen los días de avituallamiento en Vigo). Las técnicas de obturación seguidas fueron distintas, según el tipo de fuga:

- **Tapas de escotilla:** Cierre completo de la tapa girando el volante de cierre.
- **Escotillones con tapa de bisagra:** Recolocación de la tapa y afirmado con sacos de granalla de acero.
- **Grietas en cubierta:** Colocación de sacos impermeabilizados, lastrados con granalla / barita.¹⁰
- **Registros abiertos:** Tapa de acero con brazos articulados ajustables.
- **Bitas en proa:** Campana lastrada con sacos de granalla de acero.
- **Válvula de regulación de gas inerte en proa:** Saco de lona especial ajustado por la parte inferior.

En todas las campañas participaron investigadores y técnicos españoles, en concreto a bordo del buque *Atalante* y en contacto directo con el CCA, 9 personas del

⁹ De hecho la mayor dificultad radica en un rediseño del «umbilical» que une el ROV al barco nodriza. Ese problema y otros menores, han sido finalmente resueltos por la industria, aunque no ha sido sino hasta la primavera del 2003.

¹⁰ Sulfato de Bario.

CSIC (del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo y de la Unidad de Tecnología Marina con sede en Barcelona), 1 persona del IEO, 2 personas de la Universidad de Vigo, 1 persona de la Universidad de la Coruña (El Ferrol) y 3 personas de IZAR. Algunas de ellas eran miembros del CCA, que además se sumergieron en el *Nautilo* en calidad de observadores, sobre todo durante los últimos días de operación (1ª quincena de febrero) con objeto de validar, desde el CCA, el estado final de cada fuga.

Estructuración de las tareas del Comité Científico Asesor

Las actuaciones del CCA pueden dividirse en dos bloques: las que le fueron encomendadas que denominamos «reactivas» y las que el CCA propuso realizar que podemos calificar de «proactivas». Serían, por mejor decir, los «encargos recibidos» y las «recomendaciones e iniciativas propuestas». Las actuaciones reactivas se centran en torno a un mandato único: neutralizar el vertido del *Prestige*, tarea que a su vez, se dividió en dos fases, la primera dirigida a contener las fugas para dar tiempo a la consideración, el diseño y el desarrollo de la segunda: estudio del pecio y propuesta de la metodología que habría de seguirse para neutralizar definitivamente los pecios y conjurar el peligro de un vertido del fuel-oil que quedaba en los tanques.

Por su parte, las «proactivas» fueron surgiendo a medida que los análisis y las valoraciones del CCA lo encontraron pertinente y a grandes rasgos, fueron:

- Creación de un Grupo de Oceanografía Operacional para el seguimiento y predicción de las trayectorias de los vertidos.
- Constitución de un «Operativo de seguimiento analítico» de las manchas de fuel-oil.
- Análisis de la acumulación de fuel-oil a media profundidad y en fondos marinos.
- Estudio de sismicidad y calidad de los fondos en la zona de los pecios.
- Estudio de la corrosión de los restos hundidos.
- Modelo térmico de los tanques con su carga de fuel-oil.
- Análisis primario de la posibilidad de emplear métodos de biorremediación para la eliminación del fuel-oil.
- Informes sobre limpieza de zonas rocosas.
- Diseño de un Programa de Intervención Científica (PIC) sobre la catástrofe.

Neutralización de los pecios. Fase II

Iniciada la dinámica de neutralización de los pecios en su Fase I, correspondiente a la obturación provisional del máximo número de fugas, el trabajo de carácter reactivo del CCA relativo a la neutralización inició su segunda fase, centrándose en el análisis de las posibles soluciones del problema que tuvieran un carácter mas definitivo. El carácter provisional de las obturaciones que se estaban realizando en la

Fase I permitían no solo el estudio del problema en condiciones de mayor sosiego, sino tener unas perspectivas de durabilidad razonables. A pesar de ello, la sola consideración de alguno de los problemas o complicaciones potenciales que el devenir del tiempo podía producir (como la corrosión del casco o la existencia de un riesgo de sismicidad moderada), hacía necesario plantear un estudio de soluciones con carácter definitivo. Sin embargo el CCA fue pronto consciente de la dificultad del problema derivada de las condiciones extremas de situación de los pecios: nunca se había abordado una situación de esa naturaleza a tal profundidad. Por lo tanto se estaba ante un autentico desafío al estado del conocimiento y la técnica, que traía consigo un evidente y altísimo riesgo de fracaso, derivado precisamente de esa naturaleza. Se necesitaban soluciones sencillas y contrastadas con otras experiencias anteriores (que no existían en esas condiciones) o extrapoladas a partir de ellas; que pudieran acometerse en el menor plazo posible; que redujeran al máximo, durante su puesta en marcha, los riesgos de contaminación a corto y largo plazo; y se veía necesario también, en la fase operativa, una gestión empresarial con capacidad y experiencia en integración de tecnologías, ya que no había ninguna de ellas capaz por sí sola de resolver el problema. En todos los estudios de soluciones no se tuvo en cuenta el factor económico, porque se consideró que en ese momento era secundario y hay que decir que el CCA nunca recibió la menor indicación, mucho menos presión, para tenerlo en cuenta.

En principio se analizaron 3 líneas de actuación distintas:

- Dejar el fuel-oil en el lugar del hundimiento.
 - No realizar ninguna actuación sobre el pecio: Confiar en la máxima durabilidad de la Fase I de neutralización (obturbación provisional de las fugas).
 - Confinar los pecios en sarcófagos, cofres, o recintos capaces de contener potenciales escapes.
 - Neutralizar el fuel por desnaturalización.

Año	Barco	Profundidad	Actuacion realizada	Localización
1628	<i>Vasa</i>	30 metros	Reflotado (por cable) en 1960 y llevado a 15 m. de profundidad donde se restauró	Archipiélago de Estocolmo
1968	<i>K-129</i> , submarino ruso de clase Golf	5.000 metros	Sin confirmación oficial: en 1974 el Hughes Glomar Explorer, desde superficie, recuperó 11 m. de la proa	Hawai
2000	<i>Kursk</i> , submarino nuclear ruso	108 metros	El submarino fue izado a una posición debajo de la barcaza Giant 4 y transportado a dique, en octubre 2001	A 90 millas de la base de Murmansk
2001	<i>Ehime Maru</i> , BIO Japonés	600 metros	Hundido tras colisionar con submarino USA emergiendo. Reflotado hasta 30 m. para recuperar cadáveres	Hawai

Tabla 2. Algunos casos de reflotamiento /extracción de pecios

- Extraer el fuel-oil.
 - Reflotar las dos partes del pecio.
 - Extraer la carga sin control y recogerla en superficie.
 - Extraer la carga de forma controlada.
 - Procesamiento continuo (exige la instalación de un *riser*¹¹).
 - Procesamiento *batch* (o por lotes), que no necesita *riser*.
 - Reflotar las dos.

La consideración obvia de que la carga de fuel-oil extraída no daría nunca problemas mientras que una carga confinada o enterrada podía suponer a la larga un problema de contaminación, estuvo presente en todas las deliberaciones y fue un factor crítico a la hora de explorar con una mayor intensidad las posibilidades de extracción definitiva.

El reflotamiento o extracción del buque entero, tenía antecedentes de éxito. La Tabla 2 resume algunos casos de reflotamiento / extracción de pecios

En todos ellos la profundidad era menor que en el caso del *Prestige*. Además en nuestro caso los daños estructurales no permitían confiar en la integridad del pecio durante la operación de reflotamiento, con el consiguiente peligro de contaminación masiva.

El reflotamiento puede plantearse mediante distintas técnicas¹², tales como flotadores, izado por cables, barcasas, etc. Existía el antecedente inmediato del *Kursk*, extraído el año 2000 desde 108 metros de profundidad. Ahora bien, para que un reflotamiento tenga éxito, se requiere que la estructura sea resistente; que previamente se haya liberado el máximo de la carga de sus depósitos y, en el otro lado de la balanza, el riesgo de contaminación es muy elevado.

La extracción no controlada requiere el desarrollo de una tecnología de voladura controlada bajo presiones de 400 atmósferas. Eso, unido al riesgo de dispersar el fuel-oil hacen ese método muy poco aconsejable.

La extracción controlada tiene algunos antecedentes inmediatos, aunque a profundidades mucho menores, cómodamente accesibles:

- *Ievoli Sun*: en abril-mayo de 2001 se recuperaron por bombeo 4.000 Tm. de estireno y fuel-oil, del buque hundido en el Canal de La Mancha a 95 metros. Se usaron ROV's y tecnología de «hot tapping»¹³.
- *Erika*: Extraídas 11.000 Tm. de fuel-oil por bombeo en el verano del 2000, del pecio hundido a 125 m. (costa de Bretaña francesa). Por sus características es el modelo mas parecido al caso del *Prestige* (salvando el problema de profundidad).

¹¹ El *riser* es la estructura de canalizaciones que, verticalmente, debe unir el punto de operación en una prospección petrolífera en el fondo del mar, con la superficie donde están los buques de control y carga

¹² De cualquier forma hay que tener en cuenta que el «peso en rosca, en seco» de la estructura es del orden de 7.000 Tm. la popa y 6.000 Tm. la proa, al que hay que añadir el de la carga de fuel-oil remanente.

¹³ Perforación de un depósito (natural o artificial) que contiene crudo, para instalar una válvula que permita la extracción bajo condiciones controladas.

En general el análisis de cada solución se hizo teniendo en cuenta variables importantes: antecedentes a esas profundidades y experiencia probada, tecnologías implicadas, plazo de ejecución estimado y riesgos potenciales inherentes a la operación.

La reflexión sobre el «confinamiento» arrojó una serie de datos definitivos. En primer lugar se necesitaban ROV's capaces de operar a profundidades del orden de 4.000 m., lo que requería el desarrollo y validación de nuevas capacidades sobre esos equipos. El enterramiento con arcilla o grava (técnica conocida como «cubrimiento») necesitaría del orden de 2,5 millones de metros cúbicos para cubrir ambos pecios. El cubrimiento con clatrato ($\text{NaCl-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$) a partir de una inyección de CO_2 , parecía una solución sólida y estable¹⁴ en las condiciones ambientales del lugar donde se encuentra el pecio (temperatura de 2,6 °C, salinidad del agua de 3,49% y una presión de 360 atm.), aunque se trataba de un método aún muy experimental, probado a pequeña escala y del que no se tenía certeza de sus resultados a largo plazo, ya que no ha sido posible demostrar en ningún caso, ni siquiera en los experimentos que ha realizado el Monterey Bay Research Institute (MBARI) de California (EE.UU.), que el clatrato a esas profundidades pueda formar una red tridimensional relativamente rígida y adherida al pecio, sin que se disperse sobre el fondo oceánico.

En cuanto al «sarcófago» es posible pensar en un «cofre» de hormigón, de acero, de resina «epoxy» o de otro material mas o menos hermético, aunque siempre capaz de contener eventuales vertidos que por su flotabilidad tienden a subir. No hay duda de que existe experiencia española en la fabricación de grandes estructuras de estos materiales, así como en su transporte y colocación precisa. La técnica del «hormigón proyectado» también se analizó, pero no había precedentes para ese tamaño y a esa profundidad. La «desnaturalización» o neutralización del fuel-oil por procesos químicos o bioquímicos se podría efectuar por medio de la «polimerización», esto es, la fabricación de materiales poliméricos a partir de monómeros olefínicos, pero no era posible porque se necesitan catalizadores ($\text{AlCl}_3\text{-TiCl}_3$, metalocenos) que no operan en el agua y, además, necesitan altas temperaturas. La «incineración (por combustión)», que podía ser otro procedimiento de desnaturalización, requiere enormes cantidades de aire y combustible (gas) para calentar hasta el punto de ignición (160 °C) y, para más dificultad, los productos resultantes son altamente contaminantes (SO_2). Por otro lado, la «biodegradación» es capaz de eliminar cantidades pequeñas de fuel-oil, pero necesita nutrientes y es relativamente lenta. No obstante existe la experiencia de su uso en la fase final de la catástrofe del *Erika*, para eliminar el fuel-oil remanente, una vez concluida la extracción por bombeo del volumen mas importante¹⁵.

Con respecto a la extracción controlada se pueden considerar dos tipos de métodos. El primero es el de extracción «on line» como proceso continuo de bombeo o de conducción del fuel desde el depósito (tanques del buque) hasta el destino (buque de

¹⁴ Fuente: <http://www.acri.fr/co2/diox-1.htm/>

¹⁵ Se sembraron colonias de bacterias con nutrientes, para facilitar la eliminación de los restos a largo plazo.

almacenamiento en superficie). Requiere de un *riser* y en ocasiones, para rebajar la viscosidad, utilizar algún diluyente como el *ester metilo de colza*. La experiencia inmediata es la del *Erika*. El segundo método es el de extracción «batch» o por lotes: se trata un proceso de extracción, almacenamiento submarino y descarga por lotes, bien usando campanas, paraguas, globos, bolsas, o dispositivos semejantes. Con esta técnica en principio no sería necesario usar el *riser*. El método tiene un pequeño inconveniente para asumir la responsabilidad de ponerlo en marcha: nunca se ha ejecutado, por lo tanto, no existen antecedentes probados¹⁶.

Por lo demás en ambas situaciones se necesita utilizar la técnica «hot tapping» de perforación, extender la capacidad de trabajo de los ROV's hasta 4.000 m y validarla, así como que el fuel pueda fluir a lo largo de algunos metros hasta el contenedor, eventualmente a través de un mezclador de diluyente (problema de viscosidad / adherencia).

La Tabla 3 resume las opciones barajadas.

	Método	Viabilidad primaria	Referencias	Riesgo medioamb.	Plazo estimado	Coste estimado
Confinamiento	Cubrimiento	SI	<i>Pallas</i> 1998 (pocos mts)	Medio	<i>Pallas</i> : 1 año	<i>Pallas</i> : 18 M DM
	Clatrato de CO ₂	NO				
	Cofre hormigón	SI	Ninguna	Pequeño. Necesitado de revisiones	2 años	130 M€
	Cofre metálico	SI	Ninguna	Medio. Necesitado de revisiones	10 meses	100 M€
Desnatu- ralización	Polimerizac.	NO (en el fondo marino)				
	Incineración	NO (en el fondo marino)				
	Biodegrad.	NO (sólo al final)	<i>Erika</i>			
Reflota- miento	Barcazas	Probado a poca profundidad	<i>Kursk</i>	Alto, con los tanques llenos		
	Flotadores	NO probado	Con pecio intacto	Alto, con los tanques llenos		
Extracción	Salida incontrolada	NO		Enorme		
	Extracción por bombeo controlado	SI	<i>Bohlen, Tanio, Yuil 1, Osung 3, Erika</i>	Poco	8 meses	200 M€

Tabla 3.

¹⁶ La compañía OIL STOP LCC, de EE.UU. tiene al parecer una patente sobre los «sub sea oil collector», que no han sido comprobados a las profundidades y en las condiciones *Prestige* (<http://www.oilstop.com>).

El fuel-oil que queda en los pecios

La pérdida total de la carga contenida en los tanques 4E y 3C se produjo entre el instante del accidente y el hundimiento e impacto final con el lecho marino de las dos partes en que quedó dividido el buque, seguido del deslizamiento de la porción de popa sobre el fondo marino. La estructura del tanque 3C, desapareció prácticamente en los procesos de rotura y hundimiento, por lo que desde la avería inicial hasta que tocó fondo, se vertieron al mar **al menos** unas 16.884 Tm. que corresponde a la capacidad de los tanques 4E y 3C.

Tras el hundimiento y una vez detectadas las 20 fugas existentes en ambos pecios, para evaluar el caudal de fuel-oil vertido se procedió al análisis de las estimaciones de velocidad de salida del fuel-oil y sección de las fugas, obtenida de las imágenes de video tomadas en las inmersiones y de los valores de temperatura del fuel-oil obtenidos también por el submarino. Como quiera que entre el día del hundimiento (19 de noviembre) y el del primer avistamiento del pecio (2 y 7 de diciembre para la proa y la popa respectivamente) transcurrieron aproximadamente dos semanas, la cantidad de fuel-oil que se pudo perder por las fugas identificadas se estimó a partir de una ley exponencial que aproxima el caudal en función de la temperatura¹⁷. Para que dicha aproximación diera valores que respondieran a lo que posteriormente se observó, hubo que considerar un comportamiento no newtoniano del flujo.

Uno de los datos más significativos del cálculo de fugas reside en el hecho de que las aberturas para la máquina de limpieza (butterworth) de los tanques 4C y 4B fueron sondadas mecánicamente por el *Nautilo*, el día 26 de enero. El cable de sonda lastreado que se introdujo, de una longitud aproximada de un metro, salió limpio de fuel-oil, lo que permitió asegurar que el nivel de fuel-oil en ese tanque era sensiblemente inferior al supuesto en los cálculos anteriores. Esto hizo que se reconsiderara lo que se creía que quedaba de fuel-oil, corrigiéndose las estimaciones que se tenían hasta esa fecha para la parte de popa del pecio. No podía haber más fuel-oil del que físicamente se puede alojar a popa de dichas tapas abiertas, considerando la escora y el trimado con el que quedó esta parte del pecio tras el hundimiento.

La situación de la parte de popa del pecio sobre el lecho marino es la que se refleja esquemáticamente en la Figura 2. Se encuentra asentada de proa aproximadamente 15° en el sentido popa proa, y entre 12° y 15° en el sentido babor estribor. Con estos datos es posible evaluar la cantidad máxima de fuel que puede quedar retenida en este tanque, en unas 2.400 Tm. Análogamente en el tanque 4B han sido detectados otros registros «butterworth» sin fuga aparente, lo que permite suponer una situación similar de pérdida parcial de la carga, con una cantidad máxima remanente en el tanque de unas 200 Tm.

¹⁷ Es obvio que en el momento del impacto con el fondo marino (debido precisamente a ello) y durante esas dos semanas pudo producirse una fuga masiva que no se corresponde con el «estado estacionario» posterior, en el que se estiman los caudales de flujo.

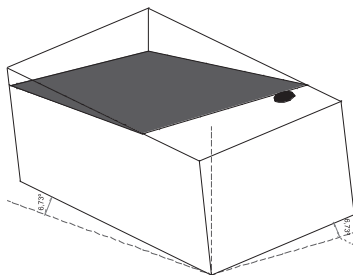


Figura 2. Esquema simplificado de la situación de la parte de popa del pecio sobre el lecho marino, con el contenido de un tanque

En virtud de los caudales de fuga estimados, es muy posible que la pérdida de gran parte de fuel-oil en ambos tanques de popa se produjera durante el hundimiento y más concretamente en el impacto contra el fondo marino y posterior deslizamiento de esta parte del pecio, hasta alcanzar la posición de equilibrio que ahora ocupa, ya que el proceso debió suponer un gran deterioro estructural en la zona de popa, que resultó con grandes deformaciones y roturas. Como consecuencia de ello cabe pensar que los tanques almacén, de sedimentación y de servicio diario de fuel-oil propio, contenidos en la cámara de máquinas y en contacto con el mamparo de proa de la cámara de bombas, también resultaron dañados, con un posible vertido de su contenido, que se estima en 1.200 Tm.

Con los datos que el CCA tuvo a su disposición hasta febrero del 2003, no fue posible afirmar si el fuel-oil perdido fue derramado al mar, o si aún se encontraba ocupando otros espacios más a popa, como son la cámara de máquinas y sus alrededores. Por consiguiente tampoco se pudo aseverar si las cantidades remanentes evaluadas con los datos parciales conocidos en esas fechas reflejaban de modo cierto el estado de los tanques de la parte de popa del pecio, por lo que el informe final del CCA consideraba necesario que en las primeras fases de la solución definitiva de neutralización se debería realizar un sondado de todos los tanques, utilizando los correspondientes ROV's de trabajo.

Como resumen de todo lo anterior, en el informe de neutralización de los pecios que finalmente emitió el CCA a mediados de febrero de 2003, se estimó que quedaban dentro del pecio un máximo de 37.517 Tm., aproximadamente la mitad de lo que al parecer transportaba el *Prestige*. Asimismo, dada la poca fiabilidad de los indicios y la falta de medidas precisas, se recomendaba que durante la siguiente fase de neutralización, se hicieran las medidas necesarias para validar esas conclusiones, operación que se llevó a cabo en el verano de 2003, una vez puestos a punto los ROV capaces de operar a esas profundidades¹⁸. Las mediciones rebajaron las estimaciones: **en popa quedaban 700 Tm. y en proa 13.000 Tm.**

¹⁸ Desde el *Prince Polar*, buque noruego fletado por Repsol YPF, que midió el contenido de los tanques usando una técnica de «neutrones térmicos», derivada de la empleada para la evaluación de contenidos de bolsas de petróleo.

El Informe del Comité Científico Asesor

Finalmente el 14 de febrero de 2003 y de forma simultánea, finalizó la Fase I de eliminación provisional de fugas (quedó una fuga remanente inferior a 2 Tm. diarias, lo que significa menos del 1,6% de la estimada inicialmente) y se presentó a la Prensa y se publicó en la web del CCA el **Informe del CCA para la Fase II**, completando así una colección de informes que habían ido apareciendo desde el 10 de diciembre de 2002. El día anterior este informe se había presentado al Vicepresidente del Gobierno, Presidente de la Comisión Interministerial.

El **Informe** recomendaba como primera opción la extracción del fuel y como segunda, el sarcófago. Además, recomendaba el estudio de viabilidad de ROVs a 4.000 metros así como el de fluencia del fuel. En tercer lugar, recomendaba que la fase operativa, incluyendo los estudios de viabilidad apuntados, fuera gestionada por una empresa o grupo de empresas¹⁹. La cuarta recomendación proponía el sondado de los tanques para lograr una valoración veraz del fuel-oil que quedaba en los pecios; instaba a que se tomaran todas las medidas posibles y con la máxima celeridad para intentar la extracción en el verano de 2003 y, finalmente, recomendaba la vigilancia e inspección continua o periódica del pecio, para controlar su estado y potenciales incidencias.

Actuaciones proactivas del CCA

El CCA respondió a algunas consultas puntuales, realizadas desde distintos Departamentos que estaban desarrollando iniciativas y actuaciones en relación con el tema del *Prestige* (limpieza de rocas, biorremediación). El grueso del trabajo corresponde sin embargo a las actuaciones que con carácter proactivo fue recomendando el CCA, en paralelo con los trabajos e informes correspondientes a las Fases I y II de neutralización. Estas tareas se pusieron en marcha de tal manera que quedaron realizadas o habían adquirido autonomía propia cuando el CCA quedó disuelto a finales del mes de febrero de 2003, una vez encomendada la fase operativa de la neutralización definitiva a la empresa Repsol YPF. En todo caso el CCA no ejecutaba esas tareas, sino que recomendaba su ejecución, orientaba su línea de trabajo y en su caso, indicaba quien, a su juicio, podía desarrollarlas.

¹⁹ Al día siguiente la Comisión Interministerial encargó la implementación de la fase operacional a la empresa Repsol YPF.

Grupo de Oceanografía Operacional (GO2)

Por recomendación del CCA (12 de diciembre de 2002), se encomendó al CSIC (IMEDEA) la organización y puesta en marcha de un grupo de trabajo para determinar y predecir las trayectorias de las manchas de fuel-oil asociadas al vertido del *Prestige*. El grupo se organizó con la colaboración de investigadores del CSIC (IMEDEA, ICM e IIM), INTA, Univ. Harvard, NOAA y Saclant Undersea Research Centre (EE.UU), Organismo Puertos del Estado, SASEMAR, Instituto Superior Técnico (IST) e Instituto Hidrográfico (Portugal), Universidades de Vigo, Cantabria y Santiago de Compostela e IEO. El grupo planteó un trabajo basado en la obtención de datos (por medio de las informaciones remitidas por buques, mediante lanzamiento de boyas de deriva, observaciones de aviones y satélites...), seguido del desarrollo de modelos de predicción (zonas de integración, condiciones meteorológicas). De esta manera la asimilación de datos y la simulación de las trayectorias del vertido permitió mantener, desde mediados de enero, una información en la web, que además se comunicaba puntualmente a SASEMAR para tenerla en cuenta en la gestión de las medidas contra la contaminación.

Seguimiento analítico de manchas de fuel-oil

Por recomendación del CCA, a partir del 9 de enero de 2003 y a la vista de la llegada de una segunda oleada de fuel-oil, el IIQAB del CSIC organizó una estructura para el seguimiento analítico de manchas avistadas o recibidas en las playas. La metodología establecida necesitó el desarrollo de protocolos de toma de muestras y la puesta a punto de los métodos de análisis. A través de ellos se puede identificar no solo «la huella» de un vertido para conocer si corresponde al fuel-oil del *Prestige*, sino también el tiempo aproximado de exposición al ambiente, lo que permite distinguir si se trata de un vertido que corresponde al original de noviembre de 2002, a un nuevo vertido, o a restos antiguos aflorados o redepositados por el oleaje. De esta manera y hasta el verano del 2003 se pudo comprobar que los restos de fuel-oil recogidos en las playas correspondían al primer vertido²⁰, encontrándose también que empezaron a aparecer restos de fuel-oil que no correspondían a la composición del que transportaba el *Prestige* y que sin duda respondían a vertidos de carácter fraudulento provenientes de otros petroleros. En julio de 2003 el porcentaje de muestras que no correspondían a fuel-oil del *Prestige* alcanzó valores del 30%.

A título de ejemplo la Figura 3 muestra las distribuciones relativas de *n*-alcanos del fuel-oil del *Prestige* y de muestras del vertido recogidas en la costa al cabo de un mes (Bermeo) y dos meses del hundimiento (Cabo Villan y Ovicedo) (Pr: pristano. Ft: fitano).

²⁰ O lo que es lo mismo, no ha habido evidencia hasta esa fecha, de llegada a las playas de fuel-oil vertido con posterioridad a los primeros días del hundimiento.

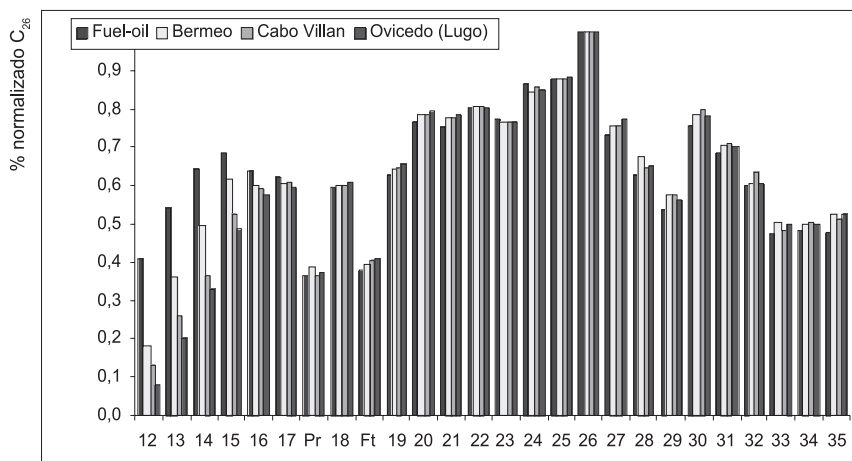


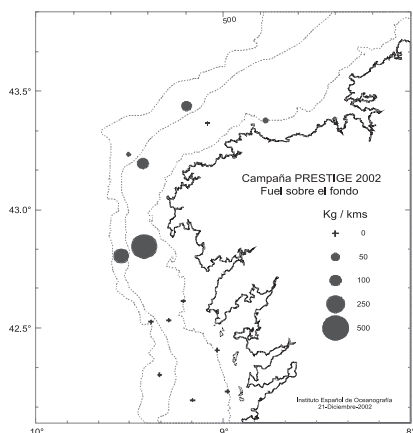
Figura 3. Distribuciones relativas de n-alcenos en el fuel-oil del *Prestige* y en muestras recogidas en la costa al cabo de un mes (Bermeo) y dos meses (Cabo Villano y Ovicedo) del vertido. (Nota: Pr - Pristano, Ft - Fitano)

Acumulación de fuel-oil en el fondo marino

La tarea de estudiar la acumulación de fuel-oil a media profundidad y en fondos fue desarrollada por investigadores del Instituto Español de Oceanografía (IEO). A mediados de diciembre se inició la primera de una serie de campañas destinadas a analizar el contenido de hidrocarburos en el sedimento y en la columna de agua, así como la afectación de comunidades demersales de seres vivos. En segundo lugar, empezó a usar dragas «box corer» y a tomar muestras de agua en botellas «GO FLOW». Llegó a interesantes conclusiones para la gestión del problema ambiental: las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el agua eran en general bastante bajas; los valores más elevados se encontraban en las cercanías del fondo y en las proximidades de la costa, especialmente en la zona comprendida entre Finis-terre y Carnota y, por último, en una primera aproximación, la distribución y abundancia de las principales especies comerciales no parecía haber sido sustancialmente afectada por los vertidos del *Prestige*. La Figura 4 y la Tabla 4 (fuente IEO) corresponden a los resultados de una de las campañas.

Estudio de sismicidad

Por sugerencia del CCA se encomendó al CSIC (concretamente a la Unidad de Tecnología Marina) otra de las actuaciones proactivas, que consistió en el estudio de la sismicidad y calidad de los fondos en la zona de los pecios. Con vistas a valorar la



Estrato	Yst	SE
70-120 m	31.00	0.00
121-200 m	547.17	441.98
201-500 m	232.67	155.57
Total	270.28	156.19

Tabla 4. Índices de cantidades de fuel por estratos de profundidad (Yst está expresado en g/15 minutos arrastre y SE es el error estándar)

Figura 4. Distribución espacial de la concentración de hidrocarburos poliaromáticos totales en sedimento, en la plataforma de Galicia

viabilidad primaria de un encofrado, era necesario conocer la sismicidad y la calidad / estabilidad de fondos en esa zona. Este estudio debía extenderse y profundizarse durante el desarrollo de los trabajos de la Fase II operacional. Para ello se hizo acopio de datos de localizaciones de eventos terremotos proporcionados por la red Internacional IRIS, y por el Instituto Geográfico Nacional (IGN), así como de información de sísmica de reflexión vertical que aporta imágenes de la estructuras en profundidad y que permite definir los rasgos estructurales más sobresalientes de la zona de estudio. Se concluyó de forma preliminar que la zona Sur-Oeste del Banco de Galicia, donde están los pecios, presenta una menor sismicidad que la zona Norte, si bien es una zona con cierto riesgo, dada la posición geodinámica de la estructura y zona, en el límite entre las cortezas oceánica y continental. En la superficie del fondo marino, se detecta una zona de bloques basculados que denotan actividad tectónica. Por ello se decidió que el estudio debería ampliarse con una campaña *ad hoc*, incluyendo la utilización de microsismógrafos en la zona del pecio. La campaña se llevó a cabo en el verano-otoño de 2003²¹.

Estudio de corrosión

La tarea de evaluar el riesgo de corrosión de los pecios se encomendó al CSIC (CENIM-Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas), junto con la Universidad

²¹ En el marco temporal de la campaña MARCONI, realizada por investigadores del ICM del CSIC en agosto y septiembre de 2003, a bordo del BIO *Hespérides*.

de Vigo (Dep. de Mecánica Aplicada y Construcción). El CCA pidió que se hiciera un estudio sobre el alcance de los fenómenos de corrosión en las planchas metálicas del pecio, para cuantificar en lo posible la velocidad del proceso y valorar los riesgos de desintegración de la estructura a largo plazo. A partir de datos de corrosión en aguas y profundidades semejantes, obtenidos en el Laboratorio de Ingeniería Civil Naval de Port Hueneme (EE.UU.), se dedujo que el efecto de CO_2 era despreciable y que la concentración de oxígeno en el agua de mar era la variable ambiental más importante en el proceso, y en menor medida la temperatura, según el modelo siguiente:

$$\text{Corrosión (mm/año)} = 21,3 + 24,5 [\text{O}_2] + 0,356 T$$

De acuerdo con el modelo y teniendo en cuenta los espesores originales de las planchas de mamparos, costados y cubierta del *Prestige* (10 mm, 15,5 mm y 20 mm, respectivamente) y la velocidad de corrosión puntual, los tiempos requeridos para producir perforaciones en cubierta serían de 54 años, mientras que en mamparos y costados estas perforaciones se producirían a los 23 y 40 años respectivamente. La corrosión localizada no supondría en principio pérdida de la resistencia estructural del conjunto, que se corroería a un ritmo cinco veces más lento, aunque parece evidente que se podrían producir fugas masivas. Podría concluirse que, por más que en un momento dado se sellaran totalmente las fugas, el deterioro estructural local a partir de los 23 / 40 años desde el hundimiento, sería suficiente para no poder evitar que el fuel-oil saliera definitivamente de todos los tanques²².

Modelo térmico de enfriamiento del fuel-oil

La tarea de desarrollar un modelo térmico que permitiera estimar la dinámica de enfriamiento del fuel fue considerada por el CCA de primera importancia, toda vez que a partir de sus resultados, de la viscosidad y adherencia del fuel y su variación con la temperatura, se puede valorar la probabilidad de que el fuel-oil pueda fluir durante una operación de extracción o eventualmente se quede en los tanques, si no en estado sólido, sí en condiciones que aseguren su inmovilización en los pecios.

El trabajo fue encomendado al Centro de Investigaciones Energéticas y Medioambientales (CIEMAT), que lo desarrolló contando con la colaboración de investigadores de la EETSI Aeronáuticos (UPM), la Universidad Nacional de Educación a Distancia, la Universidad de Zaragoza, la Universidad de Oviedo, la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, la Universidad de Santiago de Compostela, la ETSI Industriales y la ETSI de Minas (UPM), el Instituto de Catálisis y Petroleoquímica del CSIC, la Universidad Técnica de Delft (Holanda) y el Centro de Investigaciones de TOTALFINAELF de Francia.

El problema es extraordinariamente complejo por la especial y distinta geometría tridimensional de cada tanque, con distintas condiciones de contorno, que en

²² Siempre que las condiciones de viscosidad y adherencia lo permitieran.

muchos casos son variables. Se integraron en el estudio los pocos valores experimentales obtenidos con gran dificultad por el *Nautilo* en la medida de temperatura y se llegó a una primera conclusión: el fenómeno que prevalece y que hace que el fuel se enfríe mas rápidamente es el de convección. Los resultados de los distintos grupos de trabajo dan una horquilla de resultados que permiten prever el régimen de enfriamiento: en promedio la temperatura del fuel en el caso de un tanque ideal (sin geometrías especiales tipo cuernas y mamparos de refuerzo) baja a 10°C en 2 meses y tarda del orden de 1 año en estabilizarse a la temperatura del medio marino que lo rodea. La Figura 5 (fuente CIEMAT) presenta algunos de estos resultados.

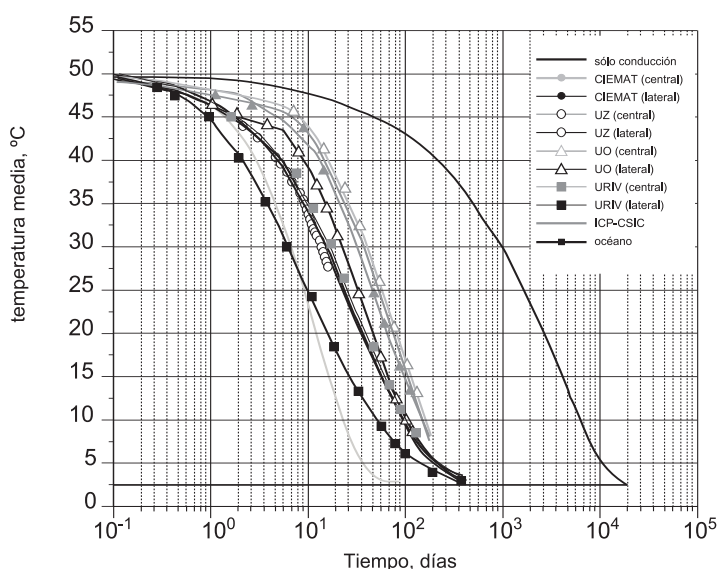


Figura 5. Resultados de simulación del enfriamiento del fuel-oil en un tanque del pecio *Prestige*, realizados por distintos equipos de investigación

Programa de Intervención Científica (PIC)

El 2 de diciembre de 2002, la Secretaría General de Política Científica del MCyT encargó al CSIC la elaboración de un documento que estableciese el **Programa de Intervención Científica del MCyT (PIC)** a medio y largo plazo, en relación con el hundimiento del buque *Prestige*, integrando las capacidades y conocimientos del CSIC, el IGM y el IEO. Por recomendación posterior del CCA, el MCYT confirmó esta tarea de redacción y coordinación inicial al CSIC, extendiendo su marco de implicación al conjunto de los Centros Públicos de I+D (Universidades y Organismos Públicos de Investigación).

Tras realizar varios borradores, el Programa entró en su fase de confección final a partir de una reunión celebrada a finales del mes de enero en el Ministerio de Ciencia

y Tecnología, a la que asistieron mas de 80 expertos de 15 Universidades, 4 Organismos Públicos de Investigación, SASEMAR y Puertos del Estado.

El PIC del MCyT se encuadra en el marco de la Acción Estratégica que el Gobierno diseñó para paliar y remediar los efectos del vertido. El PIC está coordinado por la Comisión de Coordinación Científica de la Acción Estratégica, comisión en la que participan tanto miembros del CSIC como de otros OPIS y Universidades y que empezó a trabajar el 21 de febrero de 2003. La coordinación con otros Ministerios y actividades es responsabilidad de la Comisión Ejecutiva dirigida por el Comisionado del Gobierno para las actuaciones derivadas del vertido del buque *Prestige*.

Las investigaciones del PIC de especial urgencia se encuadraron en el marco de 9 Acciones Especiales del Plan Nacional de I+D+i. Estas investigaciones²³ se iniciaron en abril de 2003. Las investigaciones del PIC a medio plazo se han encuadrado en el marco de una convocatoria pública de proyectos de investigación financiada por el Plan Nacional de I+D+i que se publicó en el BOE el 21 de marzo de 2003 y que preveía el inicio de su ejecución durante el mes de octubre de 2003.

Las líneas que en principio cubre el PIC, son las siguientes:

- Estudio del pecio, desde la perspectiva de la estructura del buque y de las características y comportamiento de su contenido.
- Seguimiento y modelización de las trayectorias que corresponden a los vertidos de fuel desde la zona del hundimiento, su evaluación oceanográfica y su incidencia en la toma de medidas de lucha contra el vertido en puertos, rías y costa en general.
- Estudio del comportamiento ambiental del fuel-oil derramado para analizar su distribución y persistencia en el medio.
- Estudio del impacto sobre el medio biológico, desde el punto de vista de su valor ecológico y comercial.
- Impacto socioeconómico del accidente y propuestas de prevención de riesgos (protocolos y planes de contingencia).
- Coordinación general y tareas horizontales para asegurar el perfeccionamiento y cooperación de todo el esfuerzo investigador y una adecuada transferencia de los resultados a la sociedad.

Algunas de la tareas de estas líneas fueron iniciadas a través de las actuaciones proactivas del CCA, y otras se han cubierto a través de las Acciones Especiales urgentes, puestas en marcha con posterioridad a la disolución del CCA.

EL PAPEL DEL CSIC

El 19 de diciembre de 2002 se hundió el petrolero *Prestige*, tras varios días de zozobras que apuntaban esa posibilidad.

²³ Puede obtenerse más información en <http://otvm.uvigo.es/invesprestige.html>

El **lunes 18 de noviembre**, es decir un día antes del hundimiento, el CSIC realizó el primer informe sobre sus propias capacidades de acción en el tema del vertido. Tenía dos páginas y en él se advertía que existirían tres fases de impactos medioambientales: en la primera, el impacto mecánico y químico serían altamente tóxicos; en la segunda, habría un impacto ecológico y ecotóxico y en la tercera, destacaría el impacto netamente ecológico. Ante la certeza de que la situación que se avecinaba no era muy halagüeña, se propusieron varias actuaciones:

- **Seguir la trayectoria del vertido, estudiando su impacto y preparando una evaluación oceanográfica** (las trayectorias del crudo, sedimentos, columna de agua...).
- **Estudiar el impacto y realizar una evaluación biológica** (analizando la abundancia y el estado de salud de larvas de peces, de moluscos bivalvos y crustáceos de interés comercial en los lugares afectados por la marea negra, porque son indicadores biológicos de la calidad del medio ambiente marino).
- **Preparar los medios para la biorremediación** del medioambiente afectado por el vertido, con bacterias proteolíticas que degraden los hidrocarburos.

Finalmente en este primer informe se indicaban los Institutos o Centros del CSIC capaces de realizar estudios y contribuciones sobre las iniciativas propuestas: IQAB, IIM-Vigo, ICMAN-Cádiz, EBD, CEAB, IMEDEA.

El CSIC no se dio por satisfecho y continuó sus trabajos. El **miércoles 20 de noviembre** entregó al Ministerio de Fomento un segundo informe sobre las capacidades del CSIC ante el vertido del *Prestige*, que profundizaba y detallaba algunos extremos del primero. El **jueves 21 de noviembre**, el Vicepresidente de Investigación Científica y Técnica y el Coordinador de Recursos Naturales asistieron a una reunión en el Ministerio de Fomento en la que el Subsecretario informó que se iba a encomendar al CSIC la coordinación de los trabajos científicos, lo cual, anunciaba, se ratificaría en la reunión del Consejo de Ministros del viernes 22 de diciembre. Asimismo, se encargaron algunas tareas específicas al IEO. El **lunes 25 de noviembre** se informó al Comité Científico Asesor del CSIC de la situación y de los informes realizados y el **jueves 27 de noviembre** se hizo lo mismo a la Junta de Gobierno del CSIC. Mientras tanto se avanzaba en la línea solicitada por Fomento aunque trabajando de forma no coordinada y, a la espera de la confirmación de la encomienda, el CSIC constituyó un «**Comité CSIC-Prestige**» formado por los dos Vicepresidentes (de Investigación Científica y Técnica y de Organización y Relaciones Institucionales) además del Director del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo, los Coordinadores y ex-Coordinadores de las Áreas de Química y de Recursos Naturales, todos presididos por el Presidente del Organismo.

El **viernes 29 de noviembre** se recibió en el CSIC la anunciada encomienda del Ministerio de Fomento. En ella la «Comisión Interministerial *Prestige*» pedía al CSIC informes sobre los siguientes temas específicos:

- Determinación de la concentración de hidrocarburos en el agua y en los organismos a distintas profundidades, tanto en la zona de hundimiento como en el litoral.
- Comportamiento de las posibles salidas de fuel en el fondo marino.
- Seguimiento y predicción de las trayectorias que podían tomar los vertidos de fuel-oil en la zona del hundimiento.

De esta manera se iniciaron los trabajos en distintos Institutos del CSIC bajo la coordinación de la Vicepresidencia de Investigación Científica y Técnica y el apoyo de los Coordinadores de las Áreas de Recursos Naturales y de Química. Ese mismo día 29 se recibieron informaciones (a través de investigadores del CSIC) según las cuales el buque francés *Atalante* con el batiscafo *Nautilé* realizaría una misión de observación en la zona *Prestige*, entre el 1 y el 9 de diciembre. Por esa razón el **sábado 30 de noviembre**, desde la Presidencia del CSIC y tras varias gestiones con IFREMER (institución propietaria del *Atalante-Nautilé*) y con SASEMAR, que era «el armador» de la operación, se consiguió que se aceptara a bordo del *Atalante* a un investigador y un técnico del IIM-CSIC de Vigo.

El **lunes 2 de diciembre** se entregó el segundo informe del CSIC al Secretario General de Política Científica del MCYT. El informe planteaba el conjunto de iniciativas que deberían ser realizadas por investigadores de distinta afiliación. En la misma reunión el IEO hizo entrega asimismo de un documento sectorial, que planteaba las tareas que sus investigadores podrían realizar. El CSIC quedó encargado formalmente de elaborar en el plazo de una semana un primer borrador del programa de intervención científica en el desastre del *Prestige*, que integrara su documento inicial y el del IEO. El 2 de diciembre tras una reunión con representantes del IEO, CIEMAT e IGN, se diseñaron las tareas de ese programa y se redactó un texto preliminar introductorio del informe correspondiente. El borrador quedó completado al día siguiente, **3 de diciembre** y se envió al Subsecretario del MCYT (a la sazón, representante del MCYT en la Comisión Interministerial del *Prestige*), que presumiblemente lo presentó a su vez en la reunión de la Comisión del mismo día. También el 3 de diciembre comenzaron los contactos formales con el organismo Puertos del Estado para preparar la estrategia que se seguiría en relación con el «Programa de trabajo de trayectorias», que dio lugar al Grupo de Trabajo del CCA en Oceanografía Operacional.

Al día siguiente, **4 de diciembre** llegan las primeras noticias de los observadores del CSIC embarcados en el *Atalante*: la proa ha sido localizada y las pérdidas de fuel-oil se estiman en unas 20 toneladas por día²⁴. Ante esas noticias el CSIC envía al Subsecretario del MCYT una nota-informe en la que sostiene la necesidad de:

- Continuar las observaciones del *Atalante* / *Nautilus* hasta que se pueda cuantificar el número y caudal de las fugas de proa y localizar la popa para hacer lo mismo (extremo que fue acordado en la Interministerial sin necesidad de utilizar el informe).
- Instar a la Armada a hacer un reconocimiento detallado de la zona marcada como de hundimiento de la popa.
- Preparar una campaña conjunta CSIC / MCYT- IFREMER para principios de enero de 2003, con el *Nautilus* / *Atalante*, para confirmar puntos de fuga y sus caudales, así como realizar estudios de oceanografía y de sedimentos. Posteriormente y en ese sentido, el **5 de diciembre** un investigador de IFREMER con el que existía relación científica anterior desde el IMEDEA (Dr. Bruno Barnouin), contacta con el Coordinador de Recursos Naturales del CSIC para negociar aspectos técnicos ante una posible prolongación de la misión de observación.

²⁴ Evidentemente no se habían localizado todas las fugas.

Los días **6 y 7 de diciembre**, el Dr. Bruno Barnouin informó al Coordinador de Recursos Naturales del CSIC que se prolongaría la campaña de observación y que el IFREMER estaba de acuerdo en la realización de la campaña en enero de 2003. El **7 de diciembre** aparecieron noticias de prensa y en TVE según las cuales el IEO iniciaba una campaña de estudio del impacto sobre las pesquerías, a bordo del buque oceanográfico *Cornide de Saavedra*. Este era el tema específicamente encargado por la Comisión Interministerial al IEO.

El **9 de Diciembre**, por encargo de la Interministerial y del Vicepresidente del Gobierno se constituyó, a través de la Secretaría de Estado de Política Científica y Tecnológica, el Comité Científico Asesor (CCA), designando al Vicepresidente de Investigación Científica y Técnica del CSIC, Dr. Emilio Lora-Tamayo, como su Presidente. El 10 de Diciembre tiene lugar en la sala de reuniones de esa Secretaría de Estado la primera reunión del CCA, presidida por quien escribe estas líneas.

Con posterioridad a esta fecha, las actuaciones del CSIC se realizaron en el marco de las que coordinó el CCA, por lo que ya han sido expuestas en otras secciones de este documento.

CONCLUSIONES

En la catástrofe del *Prestige* se pueden distinguir **tres etapas** bien diferenciadas:

- 1.El problema del petrolero desde su SOS hasta el hundimiento (13 al 19 de noviembre 2002).
- 2.El hundimiento, el vertido, la limpieza de «mareas de fuel-oil» y el tratamiento de las fugas hasta su obturación máxima (19 de noviembre 2002 al 14 de febrero 2003)
- 3.A partir del 14 de febrero de 2003, la neutralización definitiva del pecio, la evaluación de daños y la remediación.

Es bien conocido que la intervención científica se ha producido (y se está produciendo) en las etapas segunda y tercera y ha estado ausente en la primera. La crítica, ineludible en una aproximación científica, nos obliga a reconocer que la intervención tanto del CSIC como de la comunidad científica, fue algo descoordinada en los primeros momentos, fruto entre otras cosas de la especial naturaleza del problema y de la ausencia de datos y valoraciones claras. También hay que decir que las formas de actuación del CSIC y de otros Centros Públicos de Investigación demuestran la sensibilidad, voluntad y disponibilidad de su personal para los problemas que afectan directamente a la sociedad de la que forman parte y a la que se deben.

Por «primer momento» entendemos desde la catástrofe, esto es, el hundimiento y sus secuelas. A los investigadores, antes, ni se les consultó, ni tuvieron ninguna iniciativa de carácter mas o menos corporativo, y es cierto que su intervención como científicos no estaba contemplada en las etapas operativas de esa primera fase.

También hay que reconocer que la información disponible no permitía presagiar la magnitud y alcance de la catástrofe.

El problema, la catástrofe, es especial en sí mismo, como son todas las catástrofes, porque todas tienen algunos rasgos que las diferencian de las conocidas. Por ello, bueno es tener presente que esta del *Prestige*,

- No se trata de una catástrofe puntual que tiene lugar en un espacio muy corto de tiempo y que origina efectos y daños acotados sobre los que se puede trabajar, sino de una situación activa, dinámica y sostenida en el tiempo.
- Este mismo matiz presta al problema unas características de presión mediática y política que complican todavía más la actuación seria, fría y rigurosa que debe corresponder al medio científico.
- El problema es multidisciplinar y multisectorial: comprende aspectos científicos, técnicos y de gestión operativa, estos últimos fuera del alcance del mundo científico (salvamento, gestión de puertos o de costas, etc...)

Parece claro que había competencias y capacidades científicas aplicables al problema en distintos Centros Públicos de Investigación (CSIC, IEO, CIEMAT, Universidades). Parece claro también, que en este nivel, la descoordinación fue todavía mayor que la existente dentro de un mismo Centro, incluso a pesar de recibir indicaciones y encargos de la Comisión Interministerial, seguramente emanados de un análisis teórico del problema, desde una mesa de reuniones, sin poder considerar la necesidad de entregar la coordinación científica a un único órgano. Advuértase que esto se hizo, con sensatez, cuando se creó el CCA el 9 de diciembre. A partir de ese momento, los papeles quedaron claros y se puede decir que el «aparato científico» funcionó, integrando conocimientos, energías y capacidades de todos los Centros Públicos de Investigación, sin partidismos, localismos, ni protagonismos ajenos al papel científico, siempre bajo los principios de:

- Excelencia (calidad, rigor científico).
- Independencia (respecto a cualquier presión política / mediática, incluida naturalmente la de la propia Interministerial, a la que se informaba en primicia)
- Transparencia (publicidad de resultados en ruedas de prensa / entrevistas centralizadas y coordinadas y en web). Esto es especialmente importante.

Sin embargo, para que la experiencia pueda servir de cara al futuro, las lagunas principales detectadas, sobre las que hay que trabajar para corregir intervenciones defectuosas y para mejorar capacidades frente a otras emergencias, desde el CSIC y en general desde el mundo científico, son:

- La identificación de recursos humanos competentes según su excelencia investigadora y no otra.
- La identificación / designación / asunción de liderazgos y capacidades de coordinación centralizadas: la voz de la comunidad científica debe ser única, excelente y rigurosa, aunque la elaboración del discurso sea plural.
- La disponibilidad de recursos económicos que faciliten movilizaciones.

Por tanto una conclusión importante es la necesidad de clarificar papeles, competencias y capacidades siquiera entre los Centros Públicos de Investigación depen-

dientes de la Administración del Estado (OPIS). El papel y las tareas de los distintos actores científicos en el problema fue sin duda importante hasta el 9 de diciembre, pero algo desorganizado y caótico a pesar de las indicaciones recibidas desde la Interministerial. Delegar la actuación científica en un solo órgano, el CCA, sirvió sin duda para aunar esfuerzos y extraer sinergias, a partir de esa fecha.

Igualmente, a partir de la actuación del CSIC en el problema del *Prestige*, o también a partir de su participación en la corrección de los efectos de la catástrofe de Aznalcollar se puede sustanciar la necesidad de disponer de recursos económicos para atender a las necesidades de intervención urgente, siquiera en los primeros estadios. Porque a día de hoy de lo que no se puede dudar es de la preparación y experiencia del CSIC en la corrección de estas situaciones.

De la misma manera parece oportuno la existencia de un Grupo Permanente de Emergencias del CSIC de pequeño tamaño (5-8 personas), coordinado desde su Presidencia, con disponibilidad operativa inmediata, capaz de hacer un análisis primario de cualquier emergencia /catástrofe donde sea pertinente la intervención científica, capaz asimismo de identificar, evaluar y dirigir la constitución de un comité de amplio espectro de competencias y procedencia de sus miembros, que sea útil para tratar problemas originados por catástrofes en los que resulte indicada la intervención científica.

LA INVESTIGACIÓN, UN ELEMENTO CLAVE DEL FUTURO ECONÓMICO Y SOCIAL: EL PAPEL DEL CSIC ANTE EL VERTIDO DEL BUQUE *PRESTIGE*

JOAQUÍN TINTORÉ

EL NUEVO PAPEL DE LA CIENCIA Y EL CONOCIMIENTO PARA UN VERDADERO DESARROLLO SOSTENIBLE EN EL SIGLO XXI

En los inicios de 2005 estamos ante una nueva dimensión social y económica de la investigación que ya es una realidad. Por primera vez, la sociedad civil y la clase política se vuelven hacia los científicos buscando respuestas a problemas muy diversos que afectan a sectores tan variados como el medio ambiente, la salud, la nutrición, o la energía, entre otros. La sociedad es cada día más consciente de la necesidad de potenciar una investigación independiente y de calidad, para así poder consolidar y extender el estado del bienestar.

El vertido del buque *Prestige* ha sido quizás una de las catástrofes ambientales más importantes de las últimas décadas en Europa. Ante las necesidades evidenciadas desde distintos elementos clave de la Administración del Estado, los investigadores del CSIC, conjuntamente con investigadores de reconocido prestigio de Centros Públicos de Investigación y empresas, buscaron respuestas concretas en tiempo reducido y colaboraron así a orientar las acciones que permitieron luchar contra el vertido de forma más eficaz. En otras palabras, se puso de manifiesto, una vez más, la importancia de una investigación de calidad, una investigación independiente al servicio de la sociedad.

Los gobiernos de la Unión Europea, conscientes de este nuevo papel de la ciencia y el conocimiento en el siglo XXI, se han comprometido a alcanzar una media de gasto en ciencia del 3% del PIB para 2010. Teniendo presente la situación actual en nuestro país, será necesario incrementar significativamente, y en los distintos niveles de la administración pública española, los presupuestos de investigación así como potenciar, o crear, estructuras de gestión más ágiles y eficaces. Las empresas también deberán apostar decididamente por la Investigación, el Desarrollo y la innovación (la I+D+i), tendrán que dejar de ser indiferentes y asociarse a los grupos de investigación competitivos que les aportarán una nueva capacidad de innovar y por tanto, un valor añadido.

Conviene recordar que «un país no investiga porque sea rico, sino que es rico porque investiga». Este nuevo papel de la ciencia es especialmente evidente en el ámbito del medio ambiente y la economía. En efecto, el medio ambiente y los recursos naturales son, a principios del siglo XXI, uno de los temas de mayor interés en nuestro país y es evidente su importancia social, cultural y económica. Esto indica una mayor concienciación general sobre los efectos del desarrollo de las últimas décadas, y una preocupación por las condiciones del planeta que legaremos a las generaciones futuras. El medio ambiente del planeta Tierra es un sistema extremadamente complejo cuya descripción interdisciplinaria involucra muchas variables, algunas desconocidas, otras difíciles de medir y casi siempre con relaciones entre ellas no triviales. Desvelar esta complejidad intrínseca ha sido uno de los principales resultados que nos ha proporcionado la ciencia en los últimos años. La complejidad no es un pretexto del científico sino una realidad característica de los sistemas naturales que no podemos soslayar. Tal y como decía Einstein, *«las cosas deben de hacerse tan sencillas como sea posible, pero sin caer en el simplismo»*.

A pesar de la complejidad del sistema, la sociedad demanda, cada día con mayor frecuencia, respuestas concretas a problemas nuevos que se plantean como consecuencia del desarrollo no sostenible de las últimas décadas (Tintoré et al, 2003). El cambio climático, el papel de los océanos en el clima, la erosión de nuestras costas, la gestión de los recursos marinos, la lucha contra la contaminación marina, son algunos ejemplos de esos problemas y, a pesar de su complejidad y del gran número de incógnitas, la sociedad pide respuestas lo más precisas posibles que requieren de una base sólida de conocimiento e investigación (Tintoré, 2003).

Este nuevo papel de la ciencia, con evidentes aportaciones al conocimiento del medio ambiente también tiene ya repercusiones significativas en la economía, en particular, por ejemplo, en relación con la influencia del hombre sobre el clima del planeta. El *Protocolo de Kioto*, y un sinnúmero de iniciativas legislativas concretas con importantes repercusiones económicas son la evidencia del papel que desempeña la ciencia al aportar conocimiento. La mejor ciencia, bien orientada, con bases políticas y éticas sólidas, puede dar lugar a cambios estructurales importantes, incluso de nuestro sistema productivo. La entrada en vigor de la nueva Directiva europea del Agua es otro ejemplo que también tendrá efectos relevantes sobre el medio ambiente y la economía.

En otras palabras, la ciencia independiente y de calidad nos permite trazar un camino hacia un objetivo que debe ser cada día más claro para todos: el desarrollo sostenible, entendido como *«aquel que satisface las necesidades de las generaciones*

presentes sin comprometer las capacidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades» (Brundtland, 1987). El conocimiento objetivo y fiable nos debe permitir primero buscar y luego encontrar puntos de equilibrio entre los tres pilares del sistema: el Medio Ambiente, la Economía y la Sociedad (Jiménez Herrero, 2000).

Estamos ante un cambio estructural importante, un nuevo papel de la ciencia y el conocimiento que está llevando aparejado un cambio socio-económico significativo. Hemos pasado de una dualidad bienestar-impacto a otra bien distinta calidad-preservación. En las grandes empresas, el medio ambiente ha pasado de ser una externalidad negativa, que se intentaba minimizar, a ser una parte intrínseca del sistema, una parte muy valorada por sus clientes y que, por tanto, está aportando un valor añadido significativo. Hay múltiples ejemplos de cómo este cambio va avanzando de forma gradual en la sociedad: la relevancia del *Down Jones Sustainability Index*, la aparición de nuevos fondos de inversión especializados en desarrollo sostenible, el número cada vez mas significativo de empresas que se comprometen a garantizar unos mínimos estándares ambientales y laborales. Incluso tenemos ejemplos recientes de cómo la bolsa reacciona de forma bien distinta ante estrategias empresariales diferentes, en empresas de sectores tan diversos como la energía o el transporte, según adopten o no una actitud sensible ante problemas ambientales.

De forma general, podemos afirmar que existe la concienciación de toda la sociedad de que el medio ambiente no es un recurso ilimitado y que es, además, un recurso frágil y de gran valor. Pero hay que dar un paso más integrando el medio ambiente como una variable clave de cualquier actuación. Es imprescindible basar el futuro en un desarrollo sostenible de verdad, una sostenibilidad fuerte, no una sostenibilidad 'de moda' y esto requiere, tal y como hemos ya indicado, la búsqueda de puntos de equilibrio entre Medio Ambiente, Economía y Sociedad, basados en el conocimiento (Tintoré, 2005).

EL PAPEL DEL CSIC DURANTE LA CATÁSTROFE DEL VERTIDO DEL BUQUE *PRESTIGE*

El CSIC demostró, durante el vertido del buque *Prestige*, su capacidad para responder como un instrumento clave de la Administración del Estado a preguntas concretas en tiempos cortos. El CSIC respondió a distintos niveles.

En efecto, el buque se hundió el 19 de noviembre de 2002 y el CSIC elaboró sus primeros informes al Ministerio de Ciencia y Tecnología «*El CSIC ante el Prestige, propuestas de actuación*» los días 18 y 20 noviembre de 2002. En estos informes¹ ya se contemplaban actuaciones concretas en aspectos ligados a la limpieza de costa, predicción de trayectorias de crudo, etc. Además, desde el 20 de noviembre de 2002 se organizaron en el CSIC grupos de trabajo en aquellos temas en los que se consideró

¹ Citados también por el prof. Lora-Tamayo en libro BBVA.

era previsible que la Administración requiriese de un conocimiento fiable, como paso previo a la toma de decisiones por parte de los organismos responsables. Específicamente, el 25 de noviembre se informó al Comité Científico Asesor del CSIC de la situación y de los informes realizados, constituyéndose formalmente el Comité CSIC *Prestige*, formado por el Presidente y los dos vicepresidentes del Consejo junto con los coordinadores de aquél momento y los previos del Área de Química y Recursos Naturales y el Director del Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo.

Conviene igualmente destacar que en el Informe del 2 de diciembre se indicaba en su sección final *«Consideraciones finales: coordinación, oportunidad y coste»*:

La magnitud, complejidad y repercusión del problema planteado por el vertido del Prestige es tal que parece imprescindible que actúe un órgano de coordinación científica que colabore con las administraciones responsables de las actuaciones operativas proporcionando datos concretos que permitan establecer prioridades de actuación, coordinar a las distintas instituciones, organismos y departamentos ministeriales con el fin de optimizar recursos y evitar duplicidades de actuación.

En este sentido, el CSIC aporta su experiencia en la coordinación desde la vertiente científica, desarrollada y probada en el vertido de Aznalcollar, un vertido con características semejantes en cuanto a la complejidad, interdisciplinariedad y repercusiones tanto socio-económicas como ecológicas.

Un Organismo Público de Investigación interdisciplinar y con experiencia como el CSIC parece ofrecer garantías de un trabajo bien coordinado, eficaz y unas acciones que estarán siempre avaladas por unos criterios científicos internacionalmente aceptados.

Conviene tener presente que las actuaciones propuestas en este documento son preliminares y que se está procediendo a la elaboración detallada de un plan de trabajo así como una temporalización de los resultados esperados. El coste de estas acciones no se puede soslayar. Será sin duda un coste importante como importante es el vertido y más aún sus repercusiones, que indudablemente deberá contemplarse en cualquier encomienda.

Además, se incluía de forma explícita una sección «Capacidades presentes y futuras de *Puertos del Estado* para la monitorización y predicción del medio marino en las costas Españolas: implicaciones en el accidente del *Prestige*».

En un segundo nivel, el CSIC a través de distintos investigadores colaboró activamente también, entre diciembre de 2002 y marzo de 2003, con la Administración del Estado en el marco del Comité Científico Asesor (CCA) constituido por investigadores independientes y creado por la Vicepresidencia del Gobierno el 12 de diciembre de 2002. El CCA fue presidido por el Vicepresidente del CSIC, Prof. Lora-Tamayo con el fin de mitigar las fugas del buque y analizar la solución para la neutralización del pecio. Cabe resaltar la relación estrecha con investigadores extranjeros de prestigio y empresas líderes mundiales del sector marítimo y petrolero, fruto de las excelentes conexiones de los investigadores del CSIC, y que intervinieron tanto en la primera fase de limitación de las fugas del buque (ejecutada de forma conjunta con el IFREMER y el submarino *Nautilo*, con interacción directa continuada con los investigadores del CSIC), como en la segunda fase de búsqueda y análisis de

la solución para la neutralización del pecio en la que los intercambios también fueron continuos.

En un tercer nivel, el CSIC mostró también la capacidad de coordinar la investigación a corto, medio y largo plazo en un ámbito complejo, interdisciplinario y con fuertes repercusiones mediáticas. En efecto, el CSIC participó de forma activa en la elaboración del Programa de Investigación Científico del MCyT entre diciembre de 2002 y abril de 2003. Este programa dio lugar a una convocatoria extraordinaria de proyectos del Plan Nacional de I+D+i durante 2003 y 2004 que abordaba específicamente la problemática de los vertidos marinos.

En un cuarto nivel, el CSIC demostró la capacidad de sus investigadores para responder de forma casi inmediata, con investigaciones que estaban y han estado directamente ligadas a las actividades diarias de lucha contra la contaminación. En particular y a modo de ejemplo estas investigaciones «operacionales» se ejecutaron en distintos institutos del CSIC, en estrecha y fructífera colaboración con otros OPIS y universidades, en temas como la predicción de las trayectorias del crudo, la identificación de la procedencia de nuevas manchas identificadas en el litoral, la idoneidad de uno u otro método de limpieza, etc. En este sentido, es de destacar la constitución de un grupo de trabajo de Oceanografía Operacional para la predicción de las trayectorias de las manchas de crudo en el marco del CCA y coordinado por el CSIC a través de los investigadores del IMEDEA (UIB-CSIC). Este grupo de trabajo permitió la coordinación de las actividades de toda la comunidad científica en el ámbito de la Oceanografía Operacional y proporcionó, a través del CCA, las predicciones de las trayectorias de las manchas de fuel asociadas al vertido desde finales de diciembre de 2002 (Orfila *et al.*, 2004). Recordemos que estas actividades son esenciales para optimizar tanto las labores de recogida del vertido en el mar como las tareas de recogida en el litoral o la colocación adecuada de las barreras de protección entre otras. Específicamente, las actividades de este Grupo de Trabajo de Oceanografía Operacional del CCA se centraron en la coordinación de las observaciones realizadas por los diferentes grupos de investigación y agencias gubernamentales (datos oceanográficos, atmosféricos, teledetección y seguimiento visual de las manchas), los diagnósticos y pronósticos de las condiciones oceanográficas y atmosféricas realizadas a partir de diferentes modelos numéricos y la integración de la información recopilada en un modelo numérico que permitía predecir la evolución y dispersión del vertido. Así, se realizaba una predicción diaria sobre la evolución de las trayectorias de las manchas del vertido que estaba accesible diariamente por internet.

Conviene destacar finalmente que esta iniciativa dio lugar a la constitución de un grupo de investigadores y técnicos de probada competencia profesional que demostraron, además, ser capaces de trabajar de forma conjunta y eficiente. Este núcleo ha seguido bien cohesionado gracias a la labor y experiencia clave de Puertos del Estado que dirige, desde 2004 un macro-proyecto de investigación, ESEOO, cuyos fines son consolidar y extender el sistema inicialmente implementado, con más voluntarismo que estructura, durante 2002 y 2003. El reto es sin duda crear un sistema, una estructura estable, una estructura anclada en instituciones y organismos que son imprescindibles para su éxito y que necesita de la colaboración real y efectiva de un

número de investigadores y técnicos superior a 100. Este sistema permitirá en el futuro predecir la evolución de vertidos, objetos flotantes, y ayudar en el rescate de naufragos, etc. con lo que se optimizarán las labores de recuperación y se incrementará por tanto los niveles de seguridad en la mar y el litoral.

Finalmente, en un quinto nivel, conviene destacar la labor de divulgación realizada por el CSIC en relación al nuevo papel de la ciencia en la sociedad del siglo XXI a través tanto de conferencias y seminarios de los investigadores del CSIC en distintas ciudades y municipios, como mediante la creación de una página web con las informaciones científicas mas relevantes y la publicación periódica en la misma de informes técnicos que describían, en lenguaje accesible, los progresos de las investigaciones en curso.

En síntesis, durante la catástrofe del buque *Prestige*, el CSIC a través de sus más de 2.000 personas involucradas directamente en la investigación del medio ambiente, de ellas 400 investigadores doctores agrupados en 21 Institutos de investigación situados en distintas Comunidades Autónomas, demostró que está preparado para este nuevo reto que se plantea en relación al nuevo papel de la ciencia en la sociedad del siglo XXI. El CSIC es el único Organismo de Investigación interdisciplinario adscrito al Ministerio de Educación y Ciencia presente en todo el territorio nacional. Los investigadores del CSIC han situado a este organismo entre los más competitivos de toda Europa, según datos procedentes de los resultados obtenidos los 3 últimos Programas Marco de investigación de la CE, 1992-2004 en temas medio ambientales. El CSIC es, por tanto, hoy en día, una garantía de calidad y de capacidad para buscar soluciones a los problemas que ya tiene planteados la sociedad española y es también un instrumento muy cualificado, capaz de responder, conjuntamente con otros actores a los nuevos retos que se le planteen a nuestra sociedad y a la Administración del Estado en el futuro en el ámbito del medio ambiente.

Antes de finalizar esta sección, quizás convenga recordar que el CSIC es un organismo realmente interdisciplinar y que la diversidad de sus áreas es el principal activo del Consejo, y es también su mayor potencial para la sociedad española. Y es que la investigación no es básica o aplicada, como se decía antes, sino que es buena o mala, creativa o repetitiva. Y la que se realiza en el Consejo, conjuntamente entre investigadores y personal de apoyo de distinto tipo es de la máxima calidad y está avalada continuamente por evaluadores externos. Esta es, sin duda, una de las fortalezas del Consejo: una variedad y una riqueza temática, una diversidad rica y fructífera, algo bastante parecido a lo que sucede en la naturaleza y en los sistemas naturales, fuente clara de riqueza y también de complejidad y sobre todo, de vida. Es en este entorno donde avanza el conocimiento y por tanto la ciencia. Y es evidente que el CSIC funciona (ahí están los datos de competitividad de este organismo frente a sus homólogos nacionales e internacionales) pero también son muy evidentes las limitaciones de su estructura actual que no permite responder a las necesidades de los investigadores. Es imprescindible un cambio profundo y meditado de esta estructura que permita homologar la gestión de la investigación de nuestros investigadores a la de los organismos equivalentes en los distintos países líderes en la Unión Europea.

LA NECESIDAD DE APOYAR DE FORMA ESTRUCTURAL UNA INVESTIGACIÓN DE CALIDAD

En las dos secciones previas hemos intentado mostrar la importancia del conocimiento y las capacidades del CSIC y de sus investigadores como un elemento clave de respuesta ante desastres ambientales como el del *Prestige* (Tintoré, 2004) y, de forma más general, como un elemento importante ante los retos que tiene la sociedad en el siglo XXI, centrados en la implementación de un verdadero desarrollo sostenible.

Sin embargo, el conocimiento no se improvisa y la investigación es un trabajo de equipos, de grupos de investigación que deben alcanzar un tamaño mínimo para que la sociedad perciba un retorno apreciable. El científico francés Claude Bernard lo expresó del siguiente modo: *«El arte soy yo, la ciencia somos nosotros»*. El arte puede ser un ejercicio individual pero en la ciencia moderna se trabaja mayoritariamente en equipos de investigación. Y un elemento clave de la investigación es, sin duda, la curiosidad, el verdadero motor de la pasión por el conocimiento. En este contexto, es preciso recuperar la relevancia social de aquellos maestros que supieron estimular en nosotros la curiosidad y nos transmitieron sus conocimientos. En palabras de Newton *«Si he podido ver tan lejos, es porque he podido apoyarme en las espaldas de los gigantes que me han precedido»*. Una idea también expresada por André Gide cuando dice en su diario, *«Todas las olas del mar deben la belleza de su perfil a las que las precedieron y se retiraron»*. Por tanto, uno de los retos a alcanzar en un futuro inmediato es la consolidación de equipos de investigación competitivos junto con la creación de nuevos grupos en líneas estratégicas. Para conseguirlo, es imprescindible que incrementemos, con el apoyo de todos los sectores de la sociedad, el número de investigadores.

En paralelo a un incremento sustancial del presupuesto de todo el sistema de I+D+i español, la sociedad debe exigir calidad a la investigación. Por tanto, hace falta establecer una nueva cultura de evaluación sistemática de la actividad científica global (pues individualmente ya existe y es efectiva) unos contratos programa con universidades y centros públicos de investigación que permitan a la sociedad comprobar el cumplimiento de unos objetivos específicos huyendo de incrementos en ocasiones bien intencionados pero poco efectivos. En ciencia existe un sistema internacionalmente aceptado de evaluación de la calidad. Este sistema es en España muy respetado gracias al trabajo de la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (ANEP). La sociedad debe conocerlo, emplearlo y desde una base de política científica sólida con unas prioridades claras, exigir calidad.

El incremento de presupuesto ligado a una nueva cultura de evaluación y seguimiento es sin embargo una condición necesaria pero no suficiente. Los investigadores españoles son competitivos en muchos de los ámbitos en el escenario internacional, pero no son competitivos ni los medios, ni quizás más importante aún, la estructura del sistema que es la clave del éxito en el futuro. La Ley de la Ciencia, el Plan Nacional y la ANEP transformaron el sistema de I+D de este país. Desgraciadamente, este sistema es débil en sus aspectos estructurales y sigue basado en el voluntarismo. Esto fue necesario y admisible en sus inicios pero, ahora, hay que dar un

gran salto adelante. Hay que crear estructuras de gestión científica sólidas y bien coordinadas, homologables internacionalmente que nos permitan consolidar realmente un sistema de I+D+i que pueda dar respuestas ágiles a las necesidades de la sociedad del siglo XXI. Hay que actuar de manera rápida y eficaz, de lo contrario, nos podemos quedar fuera de los avances científico-tecnológicos de este siglo que acaba de iniciarse.

Además de presupuesto, política científica y estructura, para que este nuevo papel de la ciencia sea realmente percibido por todos los ciudadanos, es imprescindible ayudar seriamente a divulgar la buena ciencia y quizás más importante a medio plazo, avanzar hacia una nueva cultura de cooperación y coordinación siguiendo las líneas marcadas desde la Unión Europea y la *European Research Area*. Establecer esta nueva cultura de cooperación en España no va a ser fácil pues requerirá establecer una verdadera política científica que, vertebrada sobre una estructura sólida y bien dimensionada, llegue de verdad hasta los investigadores, hasta los laboratorios y nos permita pasar, allí, de una cultura de competencia entre institutos e investigadores a una cultura de cooperación entre los mismos. Aprender a sumar más que seguir restando, o aprender a remar todos en la misma dirección. Parece trivial pero no lo es pues tenemos aún poca cultura de trabajo en equipo. Esta nueva cultura de la cooperación hará a nuestro país mucho más visible y competitivo en el escenario europeo y mundial.

En síntesis, es necesario un golpe de timón firme, desde muy arriba, que permita reorientar el rumbo de la ciencia española pues estamos en uno de estos momentos idóneos para dar un gran salto adelante en la ciencia, la tecnología y la innovación en España. Federico Mayor Zaragoza lo decía recientemente «... *la política científica debe situarse al más alto nivel de la gobernación de un país...*». Estamos ante una oportunidad única que debe convertirse en una realidad en el escenario europeo y español. La sociedad lo demanda y el CSIC, conjuntamente con investigadores de otros centros públicos y empresas, gracias al trabajo serio y callado de muchos equipos durante muchos años, están preparados para jugar el papel que les corresponde aportando una ciencia de calidad y una ciencia cercana a la sociedad. Necesitamos el apoyo de los ciudadanos, de la sociedad civil y de los distintos responsables políticos para poder responder, juntos, a estos retos de la sociedad española y para conseguir, entre todos, un mundo mejor para las generaciones futuras. Este es el nuevo papel de la ciencia en la sociedad y la economía del siglo XXI. Y soy optimista: estamos en el buen camino.

REFERENCIAS

- Jiménez Herrero, 2000: Desarrollo Sostenible. Transición hacia la co-evolución global. Ed. Pirámide.
- Lora Tamayo, E., 2004: La catástrofe del buque *Prestige*, en El conocimiento científico como referente político en el siglo XXI, Nombela Cano, C., (Ed.), Fundación BBVA.

- Orfila, A., Vizoso, G., Alvarez, A., Onken, R., Jordi, A., Basterretxea, G., Fernandez, V., Casas, B., Fornes, A., Tintoré, J. 2004: la respuesta científica ante el vertido del buque *Prestige*: oceanografía operacional en España y la experiencia del IMEDEA. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 98, 191-207.
- Tintoré, J., M. Jacob., C. Duarte, 2002: Medi Ambient i sostenibilitat a les Illes Balears: un repte per el segle XXI. En «Informe Economic i Social de les Illes Balears». SA NOS-TRA. Palma de Mallorca.
- Tintoré, J., 2003: Ciencia y Medio Ambiente en el siglo XXI. El reto del desarrollo sostenible, pp. 46-49. En «El papel de la ciencia en Baleares. Un homenaje a Javier Benedí». F. Grasses y C. Duarte eds. UIB. ISBN: 84-7632-845-1
- Tintoré, J., 2005: ¿Qué hay de natural en un desastre natural?: ciencia, conciencia y sociedad o el reto de una sostenibilidad fuerte en el siglo XXI. CCCB (en prensa).

LAS CARACTERÍSTICAS OCEÁNICAS EN EL ENTORNO DEL ACCIDENTE DEL *PRESTIGE*

DR. FIZ F. PÉREZ

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúan las condiciones meteorológicas y oceanográficas que acontecieron durante la gestión del accidente del *Prestige*. Se recogen datos históricos de las redes de observación estatal así como la información que la comunidad oceanográfica viene utilizando como información básica de la dinámica marina en la zona. Por otro lado se muestran las medidas de temperatura del fuel y las propiedades físicas y químicas del agua del mar en el entorno del pecio con el objetivo de evaluar las tesis manejadas por los gestores del accidente y al mismo tiempo mostrar como es el comportamiento del fuel en función de sus propiedades físicas y del agua de mar circundante.

CONDICIONES METEOROLÓGICAS Y DINÁMICA OCEÁNICA

En la cuenca Ibérica, esto es, entre la costa Peninsular y las Islas Azores, los vientos dominantes proceden del Sur-Suroeste. La gráfica adjunta muestra un histograma de frecuencias de viento en la posición 43° N 11° W obtenido a partir de mapas de presión atmosférica superficial desde 1987 hasta el 2001 (450 medias diarias) para el

mes de noviembre. El valor medio del viento en ese mes durante 15 años fue de 16 nudos con dirección Noreste (Lavin et al 1991; Lavin et al 2000). La gráfica muestra la dirección desde la que se desplaza el viento desde la posición $43^\circ \text{ N } 11^\circ \text{ W}$. Los vientos registrados más frecuentes se dirigen en dirección 30° , esto es Este-Noreste. En la práctica la importancia de este porcentaje se hace todavía mayor (alrededor de un 80%) si se considera que la interacción entre el viento y la superficie del mar es un fenómeno altamente no-lineal, dependiente al menos del cuadrado de la celeridad del viento. No hay datos concretos en la posición del hundimiento ($42^\circ \text{ N } 12^\circ \text{ W}$) del viejo petrolero *Prestige*, pero no es de esperar una diferencia significativa con el histograma presentado ya que los campos de viento obtenido por sensores remotos (QUICKSCAT) muestran un gran paralelismo en toda la zona de Finisterre. Los vientos más frecuentes se dirigen justamente desde la zona de hundimiento del *Prestige* hacia Finisterre. Los vientos empujan la capa superficial del océano hacia la costa y con ella cualquier cuerpo flotante en esa capa. La densidad del fuel a 14°C (temperatura media superficial del mar) es de $995 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, sensiblemente inferior a la densidad de agua superficial ($1026 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) lo que origina su desplazamiento por la superficie del mar conducido por los vientos y por las corrientes superficiales oceánicas.

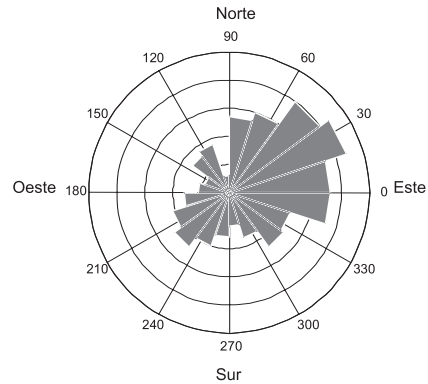


Figura 1. Diagrama de frecuencias de la dirección a la que se dirige el viento geostrófico en el $43^\circ \text{ N } 11^\circ \text{ W}$

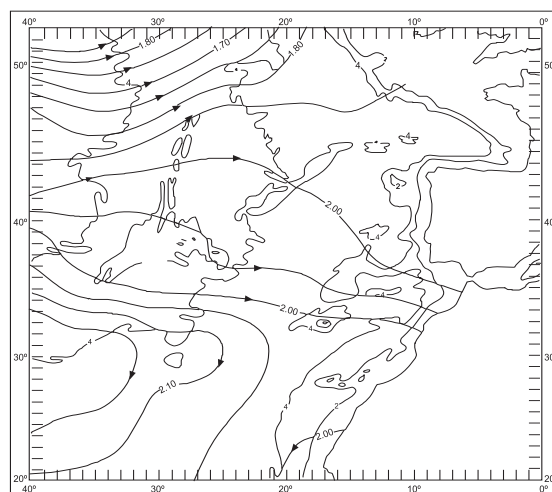


Figura 2. Circulación geostrófica media del agua superficial de mar en el Atlántico Nordeste

Aunque en esta región no hay un patrón climático definido debido a la fuerte dependencia del viento (con alternancia de vientos dominantes procedentes del Norte en verano con vientos dominantes procedentes del suroeste en invierno), existe una persistente corriente de deriva hacia al Este como muestra la gráfica obtenida por Maillard (1985) a partir de la recolección de datos históricos.

Durante las dos décadas pasadas se realizaron una serie de campañas oceanográficas que permitieron obtener el campo de corrientes superficiales y que ha sido recopiladas por Álvarez-Salgado et al., (2003). En la figura siguiente se observa que en las cinco campañas realizadas fuera de la época estival (septiembre y julio) las corrientes son siempre hacia el Norte y hacia la costa siendo las corrientes hacia mar abierto muy poco frecuentes. Puntualmente, durante cortos periodos de tiempo o en situaciones meteorológicas anómalas o extremas, la realidad puede diferenciarse del patrón aquí descrito. Además de las corrientes oceánicas generadas por los vientos, la corriente de deriva hacia la costa mostrada en el párrafo anterior genera una corriente en el talud continental para dar continuidad a la lenta pero incesante avenida de agua oceánica hacia la costa peninsular. Esta corriente de talud –conocida como «corriente Ibérica hacia el Polo» o «corriente de Navidad» (Pingree et Le Cann, 1990)– circula hacia el Norte y se intensifica en las proximidades del solsticio de

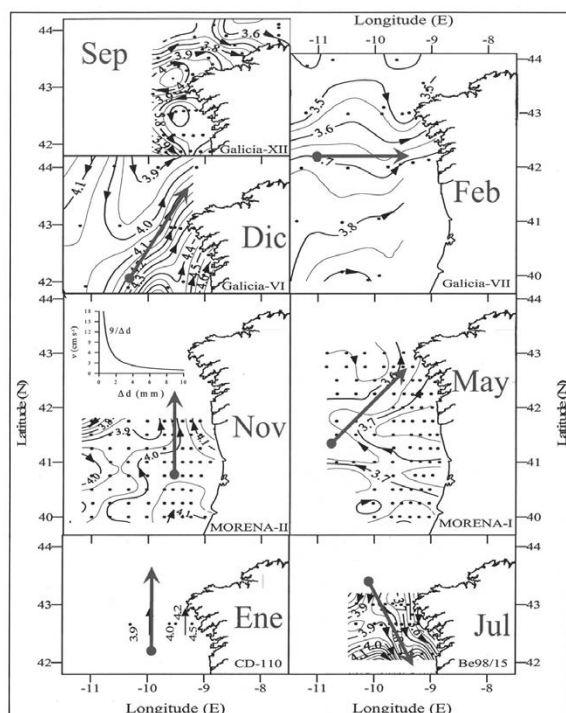


Figura 3. Variación estacional de la circulación geostrófica superficial

invierno. No está bien establecido la causa de esta intensificación que ocurre hacia Navidad, pero probablemente esté relacionada con el aumento de los vientos de poniente cuando se desplaza hacia el sur el Anticiclón de las Azores. Este fenómeno produce un fuerte transporte de aguas cálidas y salinas que circulan a largo del talud continental hacia el norte por toda la costa europea (Álvarez-Salgado et al., 2003).

A la vista de estos dos efectos bien establecidos, vientos y corrientes superficiales, podía preverse que cualquier fluido vertido en la zona del hundimiento derivaría hacia el Este antes o después. Alejar el *Prestige* de la costa no evitaría la contaminación de las costas gallegas y europeas, sino que únicamente retardaría la llegada a la costa del fuel perdido por el buque. Como se vio después, la separación del buque originó una dificultad adicional en el tratamiento del foco contaminante, ya que con el tiempo el fuel se dispersó y se mezcló con el agua, haciendo cada vez más difícil su recogida por los buques anticontaminación.

Aunque la mancha originada en el momento de la rotura fue evaluada inicialmente en más de 20 000 Tm, en realidad la mancha pudo alcanzar las 40 000 Tm ya que dos de los tanques centrales se vaciaron al partirse el petrolero en dos y otros tanques perdieron gran parte del fuel que llevaban debido a su alta fluidez en aquellos momentos. Además, con la quiebra en dos del buque, también se partieron todas las conducciones de bombeo y de aireación de cada tanque dejándolos comunicados con



Fuente: Elaboración propia, Instituto Hidrográfico de Portugal, SIAM y Le-Cedre

Figura 4. Evolución de la mancha generada durante el hundimiento del *Prestige*. Datos recopilados y publicados por *La Voz de Galicia*

el exterior y originando pérdidas adicionales. Esta gran mancha de fuel actuó a modo «de boya a la deriva» que fue trazando la dinámica de las corrientes superficiales y sus grandes dimensiones permitieron seguir su recorrido durante más de un mes. Transitó primeramente hacia Finisterre como era previsible, luego recirculó delante de la costa gallega y más tarde alcanzó el golfo de Vizcaya donde, una vez dispersa, produjo un continuo goteo de fuel hacia las costas del Cantábrico durante la primavera y el verano. El día 19 de diciembre se colocaron cuatro boyas de deriva superficial Argos rodeando la gran mancha de fuel. Estas boyas la siguieron durante una semana y luego derivaron hacia tierra mientras la mancha se dirigía al centro del Golfo de Vizcaya.

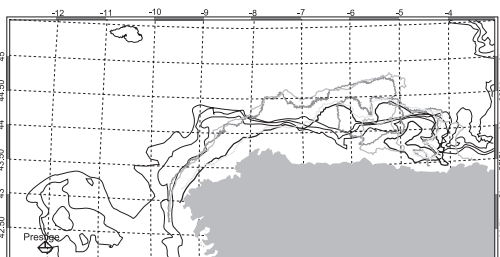


Figura 5. Seguimiento de las corrientes en la época invernal usando boyas Argos

Si observamos los valores del viento registrados en la boya de Silleiro vemos que prácticamente salvo dos cortos períodos (del 3 al 12 de diciembre y del 9 al 16 de enero) los vientos fueron hacia tierra y preferentemente de componente sur. La gran mancha de fuel siguió una trayectoria hacia el Este exceptuando esos dos períodos. En el primero fue cuando la mancha entró en las Rías Baixas preferentemente por la boca norte constituyendo la tercera y la más intensa de todas las mareas negras que alcanzaron la costa gallega. En el segundo período de vientos del Norte, la mancha

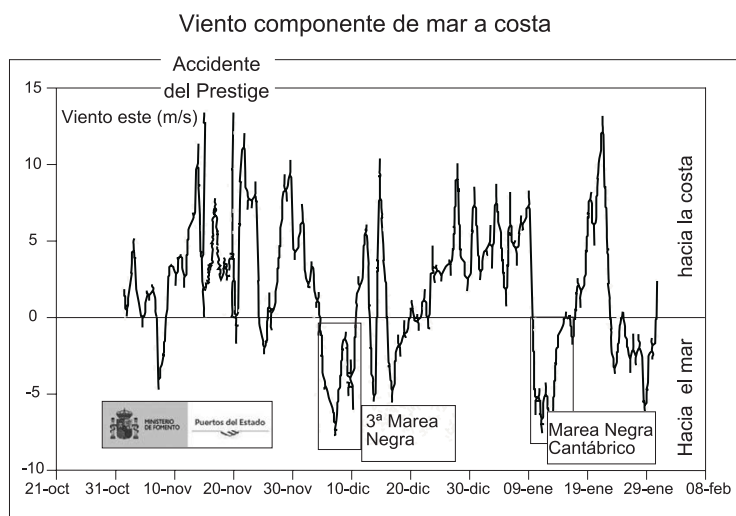


Figura 6. Componente del viento en la dirección de la costa. Datos registrados en la boya de Silleiro perteneciente al ente público Puertos del Estado

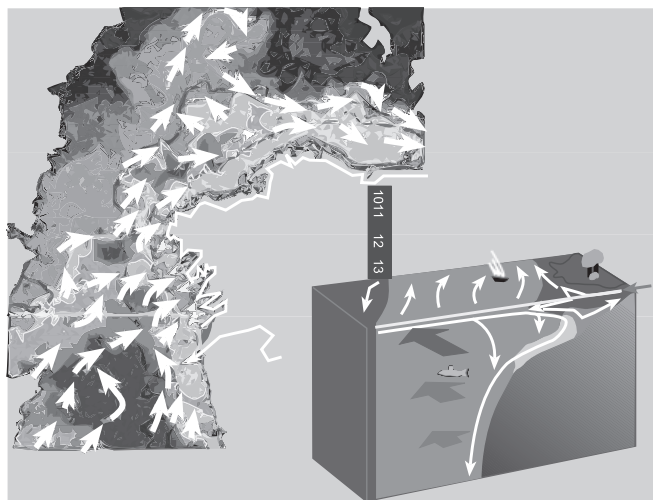


Figura 7. Circulación superficial y transversal de la corriente Ibérica o corriente de Navidad. El rango de temperaturas es desde 11° C a 15° C

que estaba en el centro del Golfo de Vizcaya camino de las costas de Brest, giró justo hacia las costas de Cantabria y el País Vasco.

En la semana anterior, el día 12 de diciembre, la gran mancha fue desplazada por lo vientos del sur desde las aguas portuguesas hasta el Norte de Estaca de Bares afectando muy poco al litoral. Este mismo fenómeno asociado a la *corriente de Navidad*, tuviera una gran repercusión en los medios de comunicación en marzo del 2000 cuando aparecieron al norte de Finisterre siete cadáveres y restos de un autobús accidentado en el río Duero unos días antes. Esta fuerte *corriente Ibérica* hacia el Polo, está asociado a un frente en la plataforma que separa aguas salinas y cálidas procedentes del Sur, y aguas salobres producto de la fuerte escorrentía asociadas a las fuertes lluvias aportadas desde los ríos y las Rías.

Las aguas oceánicas, cálidas y salinas (color rojo en la figura adjunta), circulan hacia el Norte arrastradas por el viento y también por el empuje de la corriente de deriva de carácter oceánico hacia la península Ibérica. La corriente en su desplazamiento hacia el Norte, tiende a desviarse hacia la costa por *efecto Coriolis* (que desvía en el Hemisferio Norte las corrientes hacia la derecha) por lo que esta agua tiende a apilarse hacia la costa. Simultáneamente las fuertes contribuciones de agua de lluvia en tierra generan una salida de agua dulce y salobre desde los ríos que impide que la corriente cálida se acerque a la costa. De esta forma se origina una zona frontal muy marcada que actuó como barrera contra la entrada de fuel en las Rías Baixas, haciendo además que la mancha se desplazase rápidamente hacia el golfo de Vizcaya.

En la figura siguiente se revelan los datos salinidad observados durante la tercera semana de diciembre de 2002. La salinidad superficial muestra valores bajos en el margen costero siendo aun más bajos cerca de la costa. En las secciones verticales de

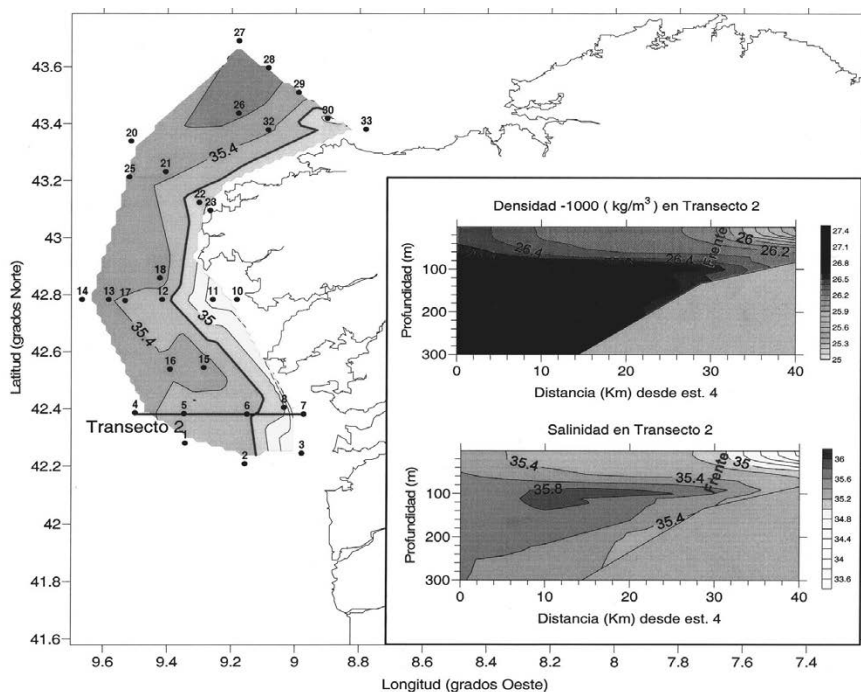


Figura 8. Distribución de la salinidad superficial observada durante la tercera semana de diciembre del 2002. Secciones transversales de salinidad y densidad mostrando el frente entre aguas costeras y la corriente salina que circula hacia el norte

salinidad y densidad se identifica claramente un intenso gradiente formado por aguas salobres en la zona más somera e interna, mientras que en aguas profundas, un máximo de salinidad de 35.8 nos indica la cuña de agua salina que circula hacia el polo. En superficie, la línea de salinidad 35 marca, aunque groseramente, la barrera salobre que impidió la entrada de la gran mancha de fuel en las Rías y que luego circuló hacia el golfo de Vizcaya.

Resumiendo, durante la época de invierno y con vientos del sur se conforma un frente oceánico que mantiene una fuerte corriente hacia el Norte que defendió a las Rías Baixas de una entrada masiva de fuel durante la segunda mitad de diciembre. Por el contrario con vientos del Norte, el frente se debilita, y posibilita la entrada del fuel, especialmente por las bocas norte como aconteció durante la primera semana de diciembre.

Características relevantes del fuel y del agua en la zona del pecio

Un desconocimiento bastante generalizado de las propiedades del fuel y del agua del mar llevaron a la publicación de falsas hipótesis que fueron desmontadas por las evidencias y aclaraciones posteriores. En aquellos momentos se dijo de que el fuel alcanzaría la misma temperatura que el agua (2.55°C) a las pocas horas, que «congelaría» a 6°C y que la ausencia de oxígeno en el fondo marino propiciaría una nula corrosión de la estructura del buque.

Detrás de estas erróneas hipótesis estuvieron, por una parte, la ignorancia de la *baja conductividad térmica* del fuel y de *datos oceanográficos* bien establecidos y por otro, una probable mala traducción de «*point de écoulement*» por *punto de fusión* en lugar de *punto de fluidez*.

Las primeras imágenes de la ascensión del fuel brillante y ligero desde el pecio captadas por el *Nautilus* fueron sumamente tristes e impactantes para aquellos que tuvimos la oportunidad de observarlas. La prensa llevaba varios días informando de la presencia de grandes manchas a partir de imágenes captadas desde aviones portugueses y franceses, pero aún teníamos esperanzas de que el fuel en superficie fuese debido a la rotura de uno de los tanques centrales del *Prestige*. Su rápida ascensión suponía una gran fluidez que sólo podíamos entender si la temperatura del fuel era superior a la supuesta. La medida de la temperatura y el conocimiento de su evolución con el tiempo eran objetivos inmediatos.

Medir la temperatura del fuel fue pues uno de los primeros trabajos que realizó el batiscafo *Nautilus* en la segunda campaña junto con la obturación de las fugas. El día 12 de diciembre, tres semanas después del hundimiento y gracias a un sofisticado termómetro electrónico con memoria interna, se midió una temperatura 9.9°C, unos 7.4°C superior a su entorno. La medida se realizó sobre el fuel que emanaba libremente del tanque 1E. La lenta disminución de la temperatura desde los 50°C (temperatura de carga en el puerto de origen) debido a la muy baja conductividad térmica del fuel ($\lambda = 0,13 \text{ W/m}^2\text{K}$) y a la alta capacidad calorífica específica ($1,7 \text{ kJ/kg.K}$), fue ratificada por modelos hidrodinámicos desarrollados en aquellos momentos y que obtenían valores del orden de decenas de meses para el enfriamiento del fuel completamente aislado dentro de los tanques (www.ciemat.es).

Los datos mostrados posteriormente por *Le-Cedre* confirmaron que el fuel no «solidifica» y que sigue fluyendo incluso a -10°C aunque lo haga de forma extraordinariamente lenta. La alta temperatura favoreció una elevada fluidez y provocó que durante los primeros días se produjera elevadas pérdidas tanto por las fisuras existentes en la cubierta del buque como por las conducciones de bombeo y ventilación que tienen cada uno de los depósitos.

En cuanto a las propiedades del agua del mar en el entorno del pecio, es importante caracterizar aquellas que repercuten en la capacidad de corrosión de la estructura del buque, como la *presión de CO₂*, la *salinidad* y la *concentración de oxígeno*. Las aguas profundas del Atlántico Norte tienen una ventilación relativamente alta en relación a los consumos de oxígeno por los microorganismos, de forma muy diferente a las aguas profundas de un embalse o un pantano. De hecho, en aguas frías

(2.55°C) y con una saturación de oxígeno de un 70%, la concentración de oxígeno de unos 7.7 ppm, es decir, muy similar a la existente en superficie. La salinidad del agua profunda es de 34.90 y del contenido en dióxido de carbono resulta una presión parcial de CO₂ de 0.1 atmósferas. Estos datos permitieron determinar a posteriori que la corrosión de la estructura de 10 mm de grosor sería de unos 25 años. Este tiempo debería ser todavía menor si consideramos que, debido a su flotabilidad en el agua, el fuel se encuentra presionado contra la cubierta del pecio y también introducido en las estructuras de ventilación (menos gruesas y por lo tanto con menor tiempo de corrosión). Este peligro real de corrosión condicionó la decisión de retirar el fuel del pecio para evitar que se convirtiera en un problema crónico en las costas gallegas.

El enigma del fuel remanente en el pecio y su temperatura

Una vez constatadas las fugas de fuel e iniciadas las operaciones de obturación, las preguntas obvias eran ¿Cuánto fuel queda dentro?, ¿Cuál es la mejor solución técnica para el pecio? La respuesta a una y otra pregunta estaban fuertemente condicionadas por el estado de fluidez del fuel y su temperatura.

Para contestar a la primera, lo más directo hubiera sido disponer de un sistema de sondeo, pero el *Nautila* no estaba preparado ni diseñado para realizar este tipo de operaciones. Posteriormente varias compañías especializadas coordinadas por Repsol se prepararon durante seis meses para poder realizar esta medida con técnicas muy sofisticadas, lo que da una idea de la complejidad que representa el sondeo. Sin embargo era imprescindible tratar de saber cuando fuel quedaba en el pecio a la vez que el *Nautila* iba realizando sus tareas de obstrucción de fugas. Solo parecía haber un dato medianamente certero: que la carga declarada oficialmente no contradecía las

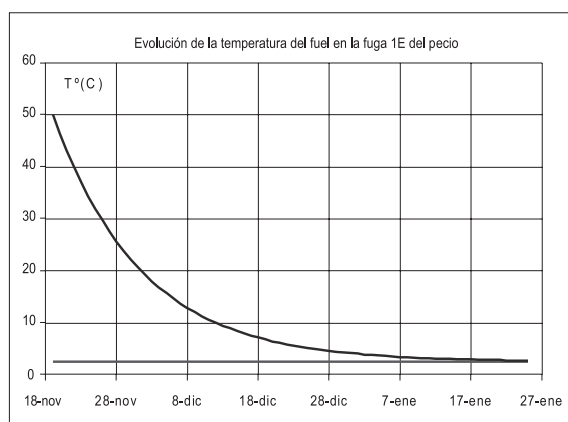


Figura 9. Variación de la temperatura del fuel saliente del tanque 1E del *Prestige*

evaluaciones realizadas por los ingenieros navales a partir de los datos e imágenes de navegación del *Prestige*. La opción era tratar de estimar el fuel que fluía en todas las fugas y determinar por extrapolación el fuel perdido en cada tanque. El *Nautile*, con sus sistemas de video, permitió colocar marcadores en todas las fugas y en varias ocasiones. Con los marcadores se determinó la velocidad de escape del fuel y a partir de ahí su caudal (www.ciemat.es). Aunque de esta manera se podía evaluar cada una de las fugas y la fuga total durante los dos meses de obturaciones, existía una dificultad adicional en la evaluación de las fugas habidas durante las tres semanas transcurridas entre el hundimiento y la toma de las primeras imágenes. No se disponía de ninguna medida realizada durante ese periodo de tiempo y únicamente la temperatura del fuel nos podía dar alguna información clave para resolver este enigma.

Se conocía la temperatura de carga del fuel, las medidas realizadas el día 12 de diciembre y que las realizadas dos meses más tarde indicaban que el fuel ya estaba completamente frío. Con estas observaciones se obtuvo la evolución de la temperatura de fuel emanado en el tanque 1E mostrado en la gráfica. Se observa que durante la primera semana la temperatura del fuel en el pecio era mayor de 30°C y durante la segunda semana la temperatura superaba los 15°C. La línea horizontal corresponde a 2,55°C que es la temperatura del agua circundante.

A partir de estos datos se estimó que las fugas emitidas en las tres semanas anteriores fueron 3,6 veces superiores y se calculó el fuel remanente en el barco en unas 37 500 Tm, número que resultó claramente superior al medido posteriormente por Repsol.

A raíz de un trabajo de clase, le sugerí a mi hija Olalia Fernández Vila, estudiante del primer ciclo de Ingeniería Química, analizar este problema. Ella elaboró un ingenioso trabajo llamado «*Estudio del comportamiento del fuel en los tanques del Prestige*» en el que se realiza una estimación del flujo de fuel e incluso se compatibilizan los excesivamente largos tiempos de enfriamiento proporcionados por los modelos hidrodinámicos con las observaciones. En este apartado se incorporan algunos de los resultados obtenidos por ella en dicho trabajo.

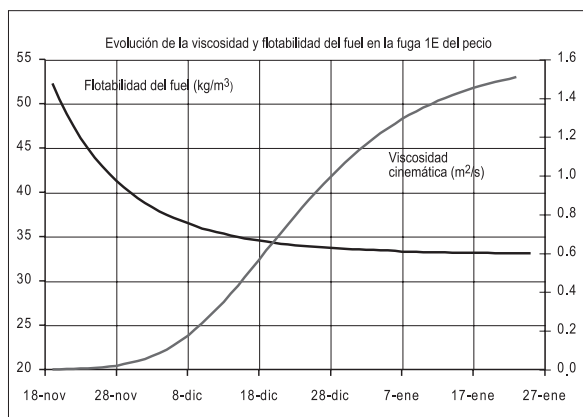


Figura 10. Variación temporal de la flotabilidad y viscosidad del fuel del *Prestige*

La viscosidad y la densidad del fuel son las dos propiedades físicas que determinan las pérdidas a través de las fisuras y las aberturas de los tanques. Ambas son función de la temperatura. La viscosidad varía de manera acentuada con la temperatura y por lo tanto es muy determinante en la estimación de las pérdidas. Como se observa en la figura (línea marrón) durante las dos primeras semanas la viscosidad fue muy baja y consecuentemente la fluidez muy alta. Esto permitió que el fuel dentro del tanque se estratificara verticalmente según su temperatura. La densidad condiciona el movimiento del fuel en el seno del agua de mar. Dado su valor siempre menor que la densidad del agua del mar que rodea el pecio ($1\,043\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) el fuel se desplaza siempre hacia la superficie a cualquier temperatura. La línea azul de la figura muestra la flotabilidad a la que se ve sometido el fuel.

La nueva determinación de la evolución del flujo de fuel parte de la expresión empírica utilizada por Repsol YPF para llevar a cabo sus cálculos para la extracción del fuel,

$$Q = k \cdot D^3 \cdot h^{1.4}$$

(<http://www.repsolypf.com/esp/todosobrerepsolypf/repsolypfenlasociedad/medioambiente/informesmedioambientales/historicoinformes.asp>). Esta ecuación es similar a la utilizada en los cálculos previos (www.ciemat.es). Se deben incorporar explícitamente los términos de viscosidad y flotabilidad que están contenidos como constantes en el factor **k** de la ecuación dado que cuando Repsol realizó sus operaciones el fuel ya se había enfriado y estabilizado. El caudal depende directamente de la flotabilidad e inversamente de la viscosidad incluyéndose ambos con un mismo exponente que se determina mediante los datos experimentales tomados por el *Nautilo* en la fuga 1E (8 T/día a través de una bita de 30 cm de diámetro a $9,8^\circ\text{C}$ de temperatura) y aquellos mostrados en la web de Repsol sobre el llenado de las bolsas lanzaderas (167 toneladas por día con una apertura de 70 cm de diámetro y una columna de fuel de 13,5 metros). La nueva ecuación obtenida es:

$$Q = 89 \cdot D^3 \cdot h^{1.4} \cdot (F/v)^{0.61}$$

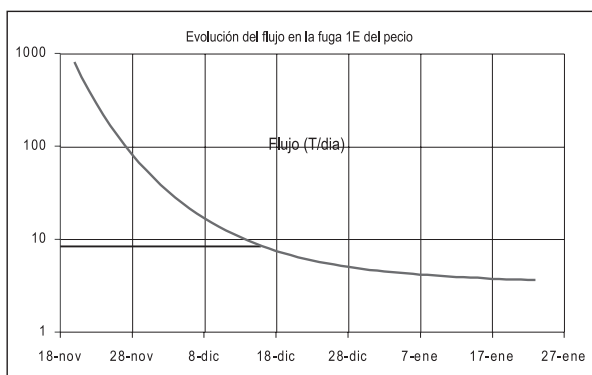


Figura 11. Variación del flujo saliente de la fuga del tanque 1E del *Prestige*. La línea horizontal representa la medida del flujo el día 12 de diciembre del 2002

donde Q es el caudal de un orificio de diámetro D , de un tanque con una altura h de fuel. F es la flotabilidad del fuel y ν la viscosidad cinemática. Se considera que la variación de la temperatura del fuel que emana de la fuga es similar a la temperatura media del fuel dentro del tanque. En la figura la línea horizontal muestra el valor del caudal medido para el día 12 de diciembre y como se ve, las pérdidas de fuel calculadas con la ecuación y reflejadas en la gráfica en las primeras semanas fueron muy superiores a este valor. Si en aquel momento se calculaba una pérdida total en torno a 150 T/día para todo el pecio ahora resulta que las cantidades perdidas por el *Prestige* durante los 23 primeros días fueron entre 10 y 20 veces superiores las estimadas por aquellas fechas.

El segundo problema que se aborda aquí es la identificación del origen de la discrepancia entre los resultados de los modelos hidrodinámicos –extraordinariamente complejos y que necesita largos tiempo de ejecución– construidos para predecir la evolución de la temperatura del fuel en los tanques (www.ciemat.es) y que indicaban un enfriamiento muchísimo más lento con las medidas observadas. El lento enfriamiento del fuel facilitó unas altas pérdidas de fuel durante las primeras semanas, siendo también la causa de un enfriamiento del fuel más rápido del predicho por los modelos, dado que el fuel más calido del tanque tiende a fluir más fácilmente hacia el exterior (www.ciemat.es).

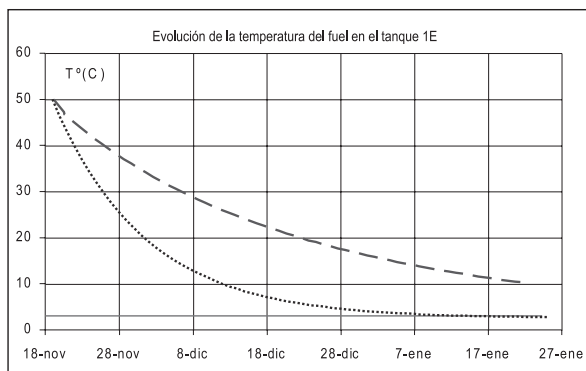


Figura 12. Variación teórica de la temperatura del fuel del tanque 1E considerando un tanque sin pérdidas de fuel (línea discontinua) obtenido a partir de los reales de temperatura observada (línea de puntos). La línea continua representa la temperatura del agua exterior de los tanques (2,55° C)

A partir del caudal y la temperatura del fuel que escapa del tanque 1E mostrado en las figuras anteriores, se ha estimado el enfriamiento debido a la difusión del calor a través de la estructura del pecio y la variación hipotética de la temperatura en un tanque sin fugas. La línea roja describe la evolución de la temperatura en un tanque sin pérdidas considerando solamente difusión térmica. El hipotético tiempo de enfriamiento es ahora mucho más largo que el real y al mismo tiempo más acorde con los obtenidos con los modelos hidrodinámicos. Parece ser pues, la pérdida de fuel un elemento clave e ineludible a la hora de predecir la evolución de la temperatura en los tanques.

Las medidas y los cálculos aquí mostrados, dentro de su simplicidad y sus aproximaciones, permiten compatibilizar las distintas observaciones realizadas (*Nautilo* y Repsol) con los resultados de los modelos hidrodinámicos (www.ciemat.es, Marcos et al. 2004), y al mismo tiempo muestran que el valioso trabajo de sellado del pecio realizado por el *Nautilo* no permitió, dada la urgencia, realizar en aquel momento una mejor estimación del fuel contenido dentro del pecio.

Estabilidad del fuel dentro de la columna de agua

La llegada masiva de fuel durante la segunda semana de diciembre a la zona de las Rías Bajas resultó inesperada para los grupos de vigilancia que trabajan en la predicción de trayectoria de manchas. En ese momento surgió el «*fuel entre aguas*» para explicar la aparición repentina de fuel que los sistemas de vigilancia aérea no habían podido observar. Sin embargo este hecho se ha exagerado hasta el punto de colocar este «*fuel entre aguas*» en cualquier profundidad del océano cuando solo se ha documentado para una capa muy superficial que alcanza escasamente una o dos decenas de metros de profundidad.

La variación de la densidad del fuel con el tiempo debido a los distintos procesos físicos y químicos a los que se ve sometido durante su peregrinar por el océano, también esta detrás de algunas observaciones y debates relevantes. Contrasta el hecho de que de momento no se haya observado fuel en los fondos marinos próximos al pecio con la detección de fuel en los fondos de la plataforma gallega y cántabra a distintas profundidades. Todas las grabaciones hechas a bordo del *Nautilo* mostraban que los fondos marinos y la propia superficie del pecio estaban cubiertos por una capa de sedimento fino de color blanco de composición calcárea y de origen biológico. En la plataforma las prospecciones realizadas con aparejos de pesca de arrastre mostraron la presencia de fuel enterrado o semienterrado, encontrándose en mayores cantidades en los fondos próximos a la costa y sobre todo en las zonas costeras donde el impacto de las mareas negras fue más intenso. Un posible mecanismo que encaja con los hechos observados implica que el fuel se aproximó primeramente hacia la costa por superficie antes de hundirse al lecho de la plataforma. La acción de las olas hace que el fuel se mezcle con agua de mar creando una emulsión que alcanza porcentajes de agua de hasta el 60% (*Le-Cedre*) lo que disminuye en el mismo porcentaje su flotabilidad. Además las olas sumergen, dependiendo de su amplitud, el fuel varios metros o incluso decenas de metros, lo que dificulta la observación de las manchas de fuel durante los temporales, siendo este fenómeno descrito como «*fuel entre aguas*». Se han realizado varias campañas oceanográficas en la zona desde el accidente del *Prestige* y no se ha observado fuel en ninguna de las muestras de agua tomadas en la columna de agua, mientras que las campañas de prospección pesquera encontraron muy pronto el fuel en el sedimento marino. Por lo tanto no hay evidencias de fuel en la columna de agua, excepto en los primeros metros debido a la interacción de la mancha más o menos emulsionada del fuel con las olas. En estos

viajes por debajo de la superficie el fuel absorbe partículas de sedimento que están en resuspensión por la agitación del mar, sobre todo en los momentos de fuerte mar de fondo. Las partículas de sedimento en suspensión se adhieren a la mancha emulsionada de fuel originando un aumento de densidad que supera la del agua mar y por consiguiente su hundimiento irreversible. La posibilidad de aumentar la densidad del fuel por evaporación de las fracciones volátiles es muy baja, ya que este fuel tiene un bajo porcentaje de compuestos volátiles. Hasta el momento no hay evidencias de que las manchas de fuel incorporen material en suspensión en alta mar que le permita incrementar su densidad justamente en un estrechísimo rango de un 0.2% y poder mantenerse en el medio de la columna de agua por largo tiempo (Ansell et al. 2001; O'Brien, 2002). Por otra parte este proceso sí tiene lugar en la plataforma costera y sobre todo en las zonas menos someras donde la movilidad del sedimento por turbulencia es grande y se llega a observar fuel altamente emulsionado con un 2% de arena (Scholz et al 1994; Petrae, 1995).

CONCLUSIONES

Al no existir ningún plan de contingencia que hubiese permitido evaluar de antemano las distintas posibilidades e incluso contrastar la información barajada, los gestores del accidente decidieron alejar el buque en base a una información que como aquí hemos visto ha sido deficiente. El tanque que se rompió en el primer momento contenía solo un 8% de toda la carga del *Prestige* y se decidió alejar el buque tratando de evitar la marea negra generada por las fugas de un solo tanque. Se especuló que si todo el buque se hundía dejaríamos de ver el resto del fuel por centenas de años contado con su *solidificación* y con el perfecto mantenimiento de la estructura del buque asumiendo una nula corrosión. Durante el hundimiento, el *Prestige* perdió una parte muy grande de su carga. Además de los tanques partidos, las numerosas conducciones de bombeo y de aireación partidas dañadas o partidas, permitieron la salida por flotación del orden de unas 40 000 T. La dinámica oceánica devolvió a tierra en dos semanas lo que se trató de alejar en unos días. De esta decisión resultaron una graves consecuencias tales como:

- Incremento en más de 8 veces el vertido de fuel.
- Aumento de la dificultad de recoger el fuel vertido.
- Extensión en muchos ordenes de magnitud la costa afectada.
- Extensión de la contaminación a los fondos marinos.

Creación de otro problema de gestión medio ambiental: La presencia de 14.000 Tn de fuel durante frente las costas.

AGRADECIMIENTOS

Gran parte de este trabajo no sería posible sin la ayuda de compañeros de las campañas Prestinaut (*Nautile*). Especial mención para Antonio Pérez de Lucas y Waldo Redondo Caride, de nuestras continuas discusiones sobre ¿Qué hacer? o comentarios como «Fiz, queda muy poco fuel en el pecio», surgieron muchas ideas e inquietudes. Indudablemente, reconocer también a la tripulación del *Atalante* y del *Nautile* su entrega a la hora de resolver continuos problemas técnicos que iban surgiendo en la toma de muestras y obturación de fugas. Muestro mi agradecimiento a los miembros del Grupo de Oceanología y la Unidad Asociada GOFUVI que de manera resuelta y en aquellos duros momentos arrimaron el hombro y cooperaron como observadores en las campañas de obturación de fugas. Me gustaría mencionar especialmente a Xosé Antón Álvarez-Salgado, Carmen González Castro y Miguel Gil Coto por aportarme datos y gráficas relevantes sobre circulación y distribución de propiedades de las masas de agua profundas. Debo remarcar aquí la importante tarea de recopilación informativa en relación a los vertidos marinos que la oficina técnica de Vertidos Marinos (www.otvm.uvigo.es) realiza con el soporte de la Universidad de Vigo y el Ministerio de Educación y Ciencia.

REFERENCIAS

- Álvarez-Salgado, X.A., F.G. Figueiras, F.F. Pérez, S. Groom, E. Nogueira, A. Borges, L. Chou, C.G. Castro, G. Moncoiffe, A.F. Ríos, A.E.J. Miller, M. Frankignoulle, G. Savidge, R. Wollast. 2003. The Portugal Coastal Counter Current off NW Spain: new insights on its biogeochemical variability. *Progress in Oceanography*, 56, 281–321.
- Ansell, D.V., B. Dicks, C.C. Guenette, T.H. Moller, R.S. Santner and I.C. White 2001. A review of the problems posed by spills of heavy Fuel Oils. International Oil Spill Conference. The International Tanker Owners Pollution Federation. 16 pp.
- Lavin, A., G. Díaz, G. Casas y J.M. Cabanas, 2000. Afloramiento en el NW de la península ibérica. Índices de afloramiento para el punto 43° N, 11° W. Período 1990-1999. *Inf. T, c. Inst. Esp. Oceanogr.*, 15, 25 pp.
- Lavin, A., G. Díaz, J.M. Cabanas y G. Casas, 1991. Afloramiento en el NW de la península ibérica. Índices de afloramiento para el punto 43° N, 11° W. Período 1966-1989. *Inf. T, c. Inst. Esp. Oceanogr.*, 91, 40 pp.
- Maillard, C., 1985. Atlas hidrologique de l'Atlantique Nord-Est. IFREMER.
- Marcos M. J., A. Agüero, A. García-Olivares, B.J. Haupt y J.L. de Pablos 2004. Assessment of the behaviour of oil in the tanks of the *Prestige* in the Atlantic deep sea. *Scientia Marina* 68(3), 307-315.
- O'Brien M. L. 2002. At-sea recovery of heavy oils – a reasonable response strategy? 3rd R&D Forum on High-Density Oil Spill Response. The International Tanker Owners Pollution Federation Limited (ITOPF)
- Petrae G., 1995. Barge Morris J. Berman Spill. NOAA's Scientific Response. HAZMAT Report no 95-10. Hazardous material Response and Assessment Division, National Oceanic And Atmospheric Administration. Seattle, USA, 63 pp.

- Pingree, R.D. y Le Cann B. 1990. Structure, strength and seasonality of the slope currents in the Bay of Biscay regions. *Journal of the Marine Biological Association of the UK*, 70, 857-885.
- Scholz D. S., J. Michel, C. B. Henry, B. Benggio, 1994. Assessment of risks associated with the shipment and transfer of group v fuel oils. HAZMAT Report 94-8. Hazardous material Response and Assessment Division, National Oceanic And Atmospheric Administration. Seattle, 36 pp.

LOS VERTIDOS ACCIDENTALES DE PETRÓLEO AL MAR: COINCIDENCIAS Y CONTRASTES

J. ALBAIGÉS

Los vertidos accidentales de petróleo al mar son consecuencia, en buena parte, del intenso tráfico marítimo de crudos y productos derivados entre las zonas productoras y consumidoras, para hacer frente a las demandas estructurales del mercado energético, dominado en gran medida por los combustibles fósiles. En este capítulo se describirán algunos aspectos generales de la presencia de hidrocarburos en el mar, para comprender mejor el comportamiento de un derrame y su impacto sobre los organismos. Todos los derrames tienen puntos en común, pero también diferencias importantes, que conviene conocer para una adecuada gestión de las tareas de recuperación del medio. En este contexto, el accidente del *Prestige* tiene escasos precedentes, por el tipo de producto vertido y por el hundimiento del petrolero con parte de la carga, a elevada profundidad.

EL CONSUMO MUNDIAL DE PETRÓLEO

Hace un siglo, la demanda energética era abastecida a partes iguales por leña y carbón, pero poco a poco el petróleo empezó a jugar un papel creciente y, a mediados de los años 60, ya se situó como principal combustible (Figura 1). Posteriormente, en 1999, el gas natural superaría al carbón. Hoy día los combustibles fósiles proporcionan alrededor del 80% del abastecimiento energético mundial, con unas proporciones del 35, 22 y 21% de petróleo, gas natural y carbón, respectivamente. Más del 25% del consumo de petróleo se registra en los EEUU, donde ha aumentado un 11% en la última década. En Japón, con una proporción del 8%, el consumo ha registrado un aumento del 4%, mientras que en la China, con una proporción de sólo

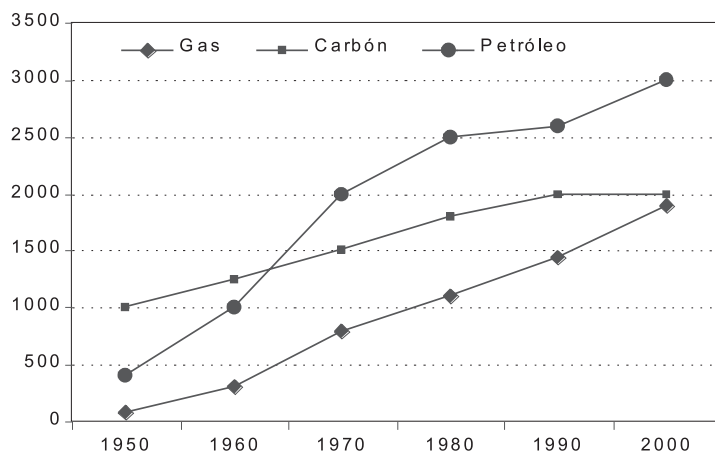


Figura 1. Consumo mundial de combustibles fósiles, en millones de toneladas equivalentes de petróleo¹

el 6%, el incremento ha sido del 45%. Aumentos incluso superiores se han observado en países menos desarrollados, como la India, fruto básicamente del auge del mercado automovilístico². De todas formas, según el Consejo Mundial de la Energía, estas tendencias irán disminuyendo progresivamente en las próximas décadas.

El consumo de combustibles fósiles se centra fundamentalmente en el transporte (57%), con el vehículo personal como símbolo más emblemático del desarrollo, mientras que un 20% se destina a la industria y el resto a otros usos. El 59% de toda la energía destinada al transporte se consume en los países industrializados, en los que vive tan sólo el 19% de la población mundial. Y sólo en los EEUU se consume la mitad de dicha cantidad. Por el contrario, en el continente asiático, con más de un 50% de la población mundial, el consumo relativo por transporte no alcanza el 15%.

Estas cifras ponen de relieve las enormes desigualdades existentes entre el primer mundo y el resto de países. Así, en el año 1997, en EEUU, el consumo medio de petróleo fue de 70,2 barriles por persona y día, en Japón y Alemania de 42 y 32,5, respectivamente, mientras que en Brasil fue de 10,5 y en la China e India, de 4,2 y 2,0, respectivamente. Para abastecer estas demandas, la producción actual de petróleo crudo es de más de 3000 millones de toneladas al año, de las cuales más de la mitad debe transportarse por mar entre los grandes productores (principalmente Oriente Medio) y consumidores (principalmente EEUU, Europa y Japón), con los consiguientes riesgos de vertidos accidentales o intencionados.

LOS APORTES DE HIDROCARBUROS AL MAR

Es difícil evaluar con exactitud el volumen de hidrocarburos que llegan al mar por distintos caminos, pero las estimaciones oscilan entre 1,3 y 3,2 millones de toneladas anuales, habiendo descendido significativamente en las últimas décadas, fruto de los mayores controles y normativas internacionales sobre seguridad marítima (transporte) y prevención de derrames³. Unas normativas que, en general, se han planteado después de graves accidentes como el *Torrey Canyon* (MARPOL, 1973), *Exxon Valdez* (OPA, 1990) y *Erika* (Paquetes Erika-I y II, 2000).

Aunque los vertidos accidentales son los que generan un mayor impacto en la opinión pública éstos sólo representan, como puede verse en la Figura 2, alrededor de un 5% del total de los hidrocarburos vertidos. La fuente más importante es la pro-

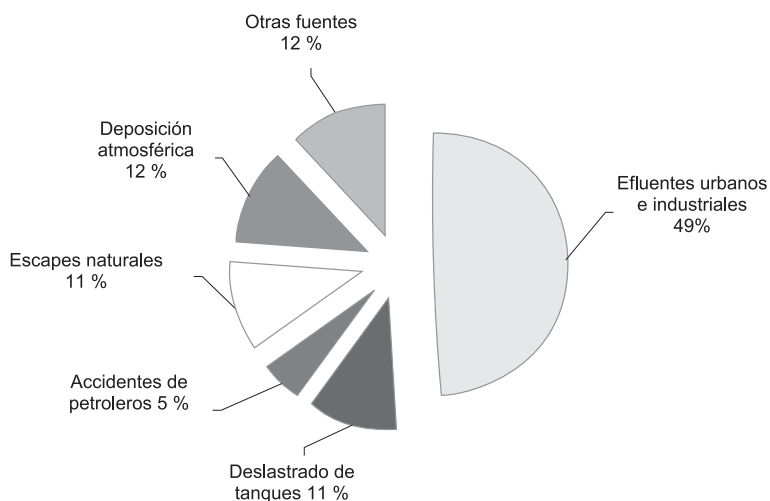


Figura 2. Fuentes de contaminación marina por hidrocarburos

cedente de los efluentes urbanos e industriales, seguida de la deposición atmosférica, aportes que tienen un carácter crónico, en contraposición a los accidentales. Otro aporte crónico, y que en muchas ocasiones se manifiesta de forma similar a los vertidos accidentales, es el procedente de las operaciones de deslastrado o lavado de tanques de los petroleros. Unas operaciones que generan residuos cuya descarga al mar es ilegal, pero que se produce con notable frecuencia por las dificultades de su vigilancia y penalización.

Precisamente, en los años 70, la principal causa de vertidos eran las descargas operacionales, mientras que en la actualidad más del 60% corresponde a colisiones y naufragios (Figura 3). Si bien el número de vertidos ocasionales ha ido disminuyendo de forma significativa en los últimos 30 años, como indican las estadísticas recogidas por

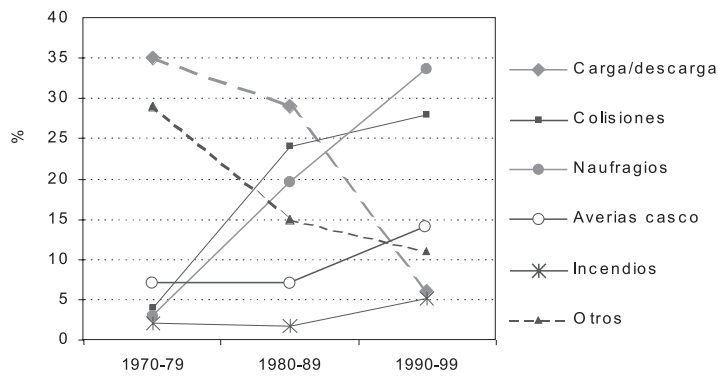


Figura 3. Causas de vertidos de petróleo al mar⁴

Buque	Año	Localidad	Cantidad vertida (Toneladas)
Atlantic Empress	1979	Tobago	287000
Castillo de Bellcer	1983	Sudafrica	260000
Amoco Cadiz	1978	Bretaña francesa	223000
Odyssey	1988	Canadá	145000
Haven	1991	Genova	140000
Torrey Canyon	1967	Islas Scilly (GB)	130000
Urquiola	1976	A coruña	100000
Hawaian Patiot	1977	Honolulu	95000
Independentza	1979	Bósforo (Turquia)	95000
Braer	1993	Islas Shetland (GB)	85000
Aegean Sea	1992	A Coruña	74000
Sea Empress	1996	Milford Haven (GB)	72000
ABT Summer	1991	Angola	70000
Matula	1974	Estrecho de Magallanes	50000
Prestige	2002	Galicia	50000
Exxon Valdez	1989	Alaska	37000
Polycommander	1970	Vigo	32000
Erika	1999	Bretaña francesa	14000

Tabla 1. Vertidos accidentales de petróleo más importantes

la International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF)⁴, el mayor tamaño de los petroleros ha comportado vertidos mayores y un impacto mayor en el medio marino. En la Tabla 1 se presentan los más significativos. Aparte, deben mencionarse los vertidos originados en el accidente del pozo *Ixtoc-1*, en el Golfo de Méjico (1980), y durante la Guerra del Golfo (1990), que se acercaron al millón de toneladas cada uno.

Por las razones expuestas en la sección anterior, el tráfico marítimo se concentra en determinadas zonas geográficas o corredores marítimos, lo que se traduce en mayores riesgos de contaminación o de accidentes. De la Tabla 1 se desprende que el Canal de la Mancha y las costas gallegas han sido zonas particularmente castigadas por este tipo de accidentes. De todas formas, no siempre existe una relación directa entre la cantidad de petróleo vertida y los efectos sobre el medio. Éstos dependerán de las condiciones ambientales de la zona y de las características del producto vertido. A pesar de que existen unas ciertas pautas comunes en todos ellos, ningún vertido es idéntico a otro, por lo que su estudio sobre el terreno es imperativo, con el fin de establecer la estrategia más adecuada de lucha contra la contaminación.

PRINCIPALES CUESTIONES QUE SE PLANTEAN TRAS UN DERRAME

En términos generales, los interrogantes que se abren tras un derrame y que orientarán los posteriores trabajos de campo son las siguientes:

- ¿Cuál es el comportamiento que tendrá el producto vertido en el medio oceánico y en la zona litoral? ¿Cuánto tiempo es previsible que permanezca en el medio?
- ¿Qué técnicas de restauración deben recomendarse?
- ¿Cuáles serán los efectos a corto, medio y largo plazo sobre las comunidades biológicas, tanto de valor ecológico como comercial?
- ¿Qué medidas convendrán adoptarse con vistas a la actividad pesquera y al control alimentario?

Como es sabido, en el caso del *Prestige* surgió otro interrogante, que se aborda en detalle en otro capítulo:

- ¿Cuál es el comportamiento que va a tener el buque y el fuel que contiene, durante los próximos meses, en la zona del hundimiento? ¿Debe extraerse? ¿Cómo?

Para dar respuesta a aquellas cuestiones, la Administración aprobó un Programa de Intervención Científica que incluía una serie de actuaciones a corto, medio y largo plazo, con unos objetivos prioritarios definidos y abierto a la colaboración interdisciplinar e interinstitucional. El Programa comprendió nueve Acciones Especiales urgentes (2003) y la convocatoria de una Acción Estratégica sobre Vertidos Marinos Accidentales, con sucesivas convocatorias de Proyectos (2003-2005). Parte de la información que sigue fue obtenida durante la ejecución de las primeras Acciones Especiales⁵.

Para afrontar las primeras cuestiones es preciso tener una visión integrada sobre:

- La composición química del vertido.
- La comprensión de los procesos físicos, químicos y biológicos que afectarán su persistencia en el medio y los posibles efectos derivados.
- Su presencia en los distintos compartimentos bióticos y abióticos del medio.

CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL PETRÓLEO

Un crudo de petróleo es una mezcla muy compleja de hidrocarburos y derivados, que abarca desde compuestos volátiles, de bajo peso molecular, como el metano, hasta compuestos pesados, no volátiles, como las resinas y asfaltenos. Estos compuestos se distribuyen en familias de hidrocarburos saturados (alcanos y cicloalcanos), aromáticos, cicloalcanos parcialmente aromatizados (naften-aromáticos), y derivados de azufre, nitrógeno, oxígeno, así como complejos organometálicos⁶.

En la Figura 4 se muestran las distintas fracciones de interés económico que se obtienen del petróleo por destilación (gasolina, queroseno, gas-oil, aceites lubricantes, etc.), quedando un residuo de menor valor, que se destina a combustible industrial (fuel-oil) o a asfalto. En ella se muestra también la distribución de las distintas fami-

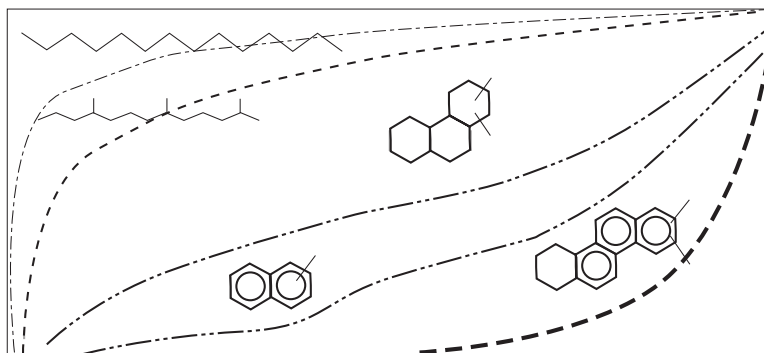


Figura 4. Diagrama representativo de la composición de un crudo de petróleo

lias de compuestos. Como puede verse, las fracciones más pesadas tienen un carácter más aromático, e incluyen mayor proporción de compuestos polares (resinas y asfaltenos), con unos contenidos de azufre superiores. Estas fracciones contienen también ciertos metales, principalmente níquel y vanadio, en forma de complejos porfirínicos.

Conviene señalar que, en general, desde un punto de vista cualitativo, todos los crudos tienen los mismos componentes, pero su distribución cuantitativa varía en función de la historia geoquímica de los mismos, es decir del ambiente deposicional

en el que se formaron y de su grado de evolución geotérmica. Así, por ejemplo, los crudos más antiguos (p.ej. los de Oriente Medio) acostumbran a tener mayor proporción de fracciones ligeras que los más recientes, que suelen tener un carácter más asfáltico (p.ej. los de Venezuela). La distinta composición de los crudos o derivados es la que determinará su comportamiento y efectos en el medio.

Los vertidos del *Torrey Canyon* y del *Amoco Cadiz* fueron de crudos de petróleo tipo Arabia ligero, lo mismo que el del *Metula*, en el estrecho de Magallanes. El *Aegean Sea* también transportaba un crudo ligero del Mar del Norte (Brent), así como el *Braer* (Gulfacks). En cambio, los vertidos del *Erika*, *Baltic Carrier* y *Prestige* fueron de residuos de destilación (fuel-oil pesado N.6). Los vertidos del *Exxon Valdez* y del *Haven* fueron también de crudos de petróleo, aunque de características distintas, Prudhoe Bay (Alaskan light) e Iranian heavy, respectivamente.

En la Tabla 2 se describe la composición por familias de hidrocarburos de algunos vertidos representativos y en la Figura 5 se muestran cromatogramas de los productos transportados por el *Aegean Sea* y el *Prestige*, en los que se ponen en evidencia las diferentes características de un crudo ligero y de un fuel-oil pesado.

Buque	Densidad (Kg/L)	Hidrocarburos alifáticos	Hidrocar aromáticos	Resinas	Asfaltenos
<i>Amoco Cadiz</i>	0,866	51	39	6	3
<i>Aegean Sea</i>	0,865	61	32	5	2
<i>Braer</i>	0,867	60	35	5	1
<i>Exxon Valdez</i>	0,866	75	15	6	4
<i>Haven</i>	0,868	53	30	11	6
<i>Baltic Carrier</i>	0,975	41	38	11	10
<i>Prestige</i>	0.995	22	49	17	12
<i>Erika</i>	1,002	22	56	16	6

Tabla 2.- Composición de diversos vertidos de petróleo*

* Propiedades de otros crudos de petróleo y derivados puede obtenerse en la base de datos de Environment Canada (<http://www.etc-cte.ec.gc.ca/databases/oilproperties/default.aspx>)

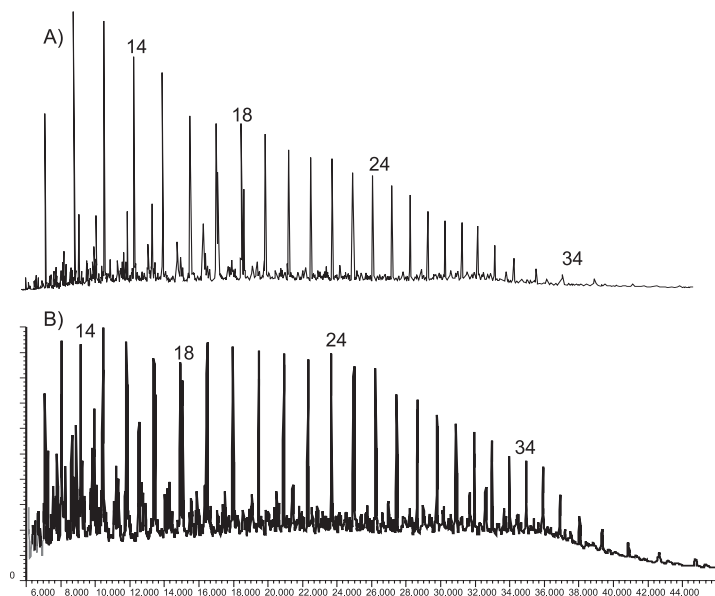


Figura 5. Perfiles cromatográficos de los cargamentos del *Aegean Sea* (A) y del *Prestige* (B). (se indican el número de átomos de carbono de la serie de los *n*-alcanos)

COMPORTAMIENTO DEL PETRÓLEO EN EL MEDIO MARINO

Un producto petrolífero vertido al mar sufre una serie de procesos físicos (p. ej. disolución, evaporación, dispersión y emulsión), químicos (p. ej. foto-oxidación) y biológicos (p. ej. degradación), que conducen a su distribución entre los distintos compartimentos bióticos y abióticos del medio y a su ulterior acumulación y/o degradación (Figura 6).

Estos procesos, conocidos como de envejecimiento («weathering»), son secuenciales en el tiempo y afectan de forma distinta a los distintos componentes del petróleo. Aunque como ya se ha indicado, cada vertido tiene una dinámica propia, de forma general puede señalarse que los procesos de tipo físico ocurren durante las primeras semanas posteriores al derrame, los procesos foto-oxidativos empiezan a ser evidentes al cabo de varias semanas y, finalmente, la biodegradación precisa de varios meses para dejar sus huellas en el producto.

El conocimiento de la dinámica ambiental de un vertido de petróleo, a través del estudio de la evolución de la composición química del mismo, es fundamental para evaluar su impacto en el medio, la extensión y duración del mismo y la forma de acelerar los procesos naturales de restauración.

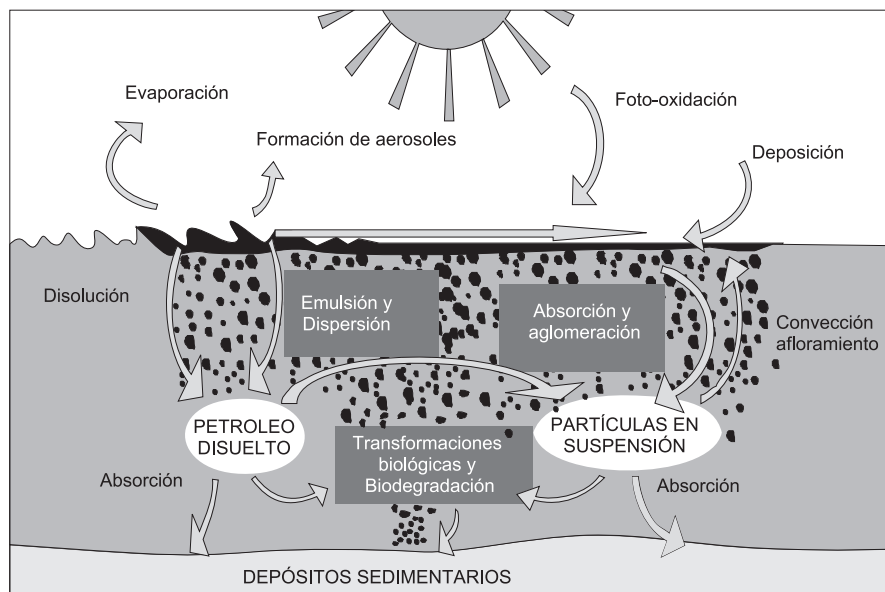


Figura 6. Comportamiento del petróleo en el mar (adaptado de refs. 4 y 7)

Procesos físicos

La evaporación es, en general, el proceso que tiene una mayor incidencia sobre el producto vertido. Naturalmente, este proceso dependerá de la temperatura ambiente, existiendo diferencias significativas entre los vertidos en aguas tropicales (p.ej. *Ixtoc-1*) o circumpolares (p.ej. *Metula* o *Exxon Valdez*). A 15°C, la fracción de punto de ebullición inferior a 200°C (< 10 átomos de carbono), que corresponde a la gasolina, se pierde completamente al cabo de un par de días, lo que puede representar hasta un 40% del producto, en el caso de un crudo ligero.

A medida que la evaporación progresa, el producto se vuelve más denso y viscoso, favoreciéndose la formación de emulsiones aceite-agua («chocolate mousse»), que fueron caracterizadas por primera vez durante el accidente del *Torrey Canyon*, en 1976. El mecanismo de formación de estas emulsiones es poco conocido, pero la presencia de resinas y asfaltenos en el producto parece ser que actúa de elemento estabilizador. En particular, concentraciones por encima del 15% contribuyen a la estabilidad de dichas emulsiones durante meses. El aceite emulsionado, que puede contener hasta un 70% de agua, aumenta de volumen y densidad, facilitando su entrada en la columna de agua. En el accidente del *Arrow*, en Canadá (1970), se detectaron fragmentos de estas emulsiones hasta 80 m. de profundidad. En la superficie del mar, el producto emulsionado se va fragmentando en trozos de aspecto semi-sólido, lo que dificulta su recuperación mediante «skimmers», o incluso su combustión.

Otros procesos físicos que transcurren en las primeras fases del derrame son la disolución y la dispersión. La disolución sólo afecta a los componentes más polares, de bajo peso molecular, principalmente hidrocarburos aromáticos, que resultan ser también muy volátiles. Por su parte, la dispersión sólo es efectiva con productos ligeros y en mares de alta energía. Este fue el principal proceso que contribuyó a la desaparición del crudo vertido en el accidente del *Braer*, en las costas escocesas, en 1993.

A la vista de estas consideraciones puede deducirse que el fuel-oil del *Prestige* se vió muy poco afectado por los procesos de evaporación o disolución. De hecho, los hidrocarburos de menos de 10-12 átomos de carbono, que serían los más afectados por estos procesos, son minoritarios en el fuel. Los análisis efectuados sobre muestras recogidas en el mar o en la costa a lo largo del primer año indicaron que las pérdidas por estos procesos no alcanzaron el 5% de la composición inicial del producto.

En cambio, por su elevado contenido de resinas y asfaltenos (Tabla 2), el fuel forma fácilmente emulsiones estables con el agua de mar, pudiendo acomodar hasta un 50% en peso. Con el tiempo, estas emulsiones se van fragmentando, dando lugar a las pequeñas bolas de alquitrán («tar balls») que el mar lleva a las playas como resultado final de este proceso, que es común a todos los vertidos de petróleo accidentales o intencionados. De ahí la importancia de establecer redes de vigilancia después de un derrame, para identificar la existencia de nuevos vertidos en la zona, como veremos más adelante.

Por otra parte, la elevada densidad de estas emulsiones propicia su hundimiento en la columna de agua y deposición en los fondos. Además, el fuerte dinamismo de la zona litoral puede contribuir a que parte del fuel depositado en la zona intermareal o infralitoral pueda ser enterrado a cierta profundidad en el sedimento, un proceso que es distinto al de la simple difusión o penetración en el mismo, cuando el producto es más fluido, como se observó en el caso del *Aegean Sea*⁸ o, recientemente, en las zonas afectadas por el *Exxon Valdez*⁹, diez años después del derrame.

Procesos de degradación

Aparte de los procesos mencionados de tipo físico, cuya principal consecuencia es la redistribución del producto vertido en los distintos compartimentos del medio, otros procesos producen modificaciones estructurales de los distintos componentes, como paso previo a su completa degradación. Estos procesos, de tipo oxidativo, son en general procesos lentos y pueden ser de naturaleza química o biológica, por acción de la radiación solar o de las bacterias existentes en el medio marino, respectivamente⁷. Dichos procesos transcurren preferentemente en las interfases aceite-aire y aceite-agua, por lo que la degradación es mucho más lenta cuando el producto está en forma de aglomerados, depositados en la superficie o en el fondo, que cuando está en forma dispersa.

De las diversas clases de compuestos químicos que constituyen los crudos de petróleo, la fotooxidación afecta particularmente a los hidrocarburos aromáticos, sus-

ceptibles de oxidación por fotólisis directa, dando lugar a una amplia gama de compuestos oxigenados, más polares, más solubles, y con ello más biodisponibles y tóxicos. Estudios *in vitro* han demostrado que se produce un incremento muy significativo de la toxicidad aguda de fracciones petrolígenas en bacterias y crustáceos, después de la irradiación, atribuible a la formación de fotoproductos, hoy día de naturaleza desconocida.

Asimismo, la fotooxidación, al ser un proceso de tipo radicalario, también induce la formación de productos de condensación (resinas y asfaltenos), más persistentes en el medio. En este sentido, la elevada radiación y temperatura del verano incrementa la formación de residuos asfálticos, lo que está de acuerdo con la variación estacional de las concentraciones de «tar balls» encontradas en las playas del Mediterráneo oriental por diversos autores. De todas formas, no está clara la importancia relativa de estos procesos en la degradación final del petróleo.

Por otra parte, en el medio marino existe una gran variedad de bacterias aerobias, capaces de mineralizar hidrocarburos alifáticos y aromáticos de peso molecular medio, y también de formar productos de oxidación intermedia con los más pesados, que pueden ser finalmente degradados por la intervención secuencial de varios microorganismos (co-metabolismo). Obviamente, en el medio marino los procesos de oxidación fotoquímica y microbiológica del petróleo se producen simultáneamente y pueden tener efectos sinérgicos. Sin embargo, la toxicidad de los productos intermedios, a veces superior a la de los productos de partida, puede también inhibir el crecimiento bacteriano.

Estos procesos de biodegradación tienen lugar en escalas de tiempo de varios meses o años y afectan de forma desigual a los distintos componentes del petróleo. De las cuatro fracciones que componen el petróleo (alifática, aromática, resinas y asfaltenos), la fracción alifática es la más fácilmente degradable y dentro de esta fracción los *n*-alcanos son degradados más rápidamente que los iso-alcanos, si bien la velocidad disminuye al aumentar el número de átomos de carbono, probablemente por la menor solubilidad de los compuestos.

Sigue en biodegradabilidad la fracción aromática, condicionada por el tamaño molecular de los compuestos y el número y posición de los sustituyentes alquílicos. Así, los hidrocarburos de dos y tres anillos, como el naftaleno y fenantreno, son fácilmente degradados, los de cuatro anillos como el criseno lo hacen con mayor dificultad y los de más de cuatro anillos son particularmente recalcitrantes. Las resinas y asfaltenos, en condiciones naturales, se degradan con mucha dificultad.

El potencial metabólico de las poblaciones microbianas en la degradación de hidrocarburos está muy relacionado con el historial previo de la zona. Diversos estudios han permitido comprobar la relación existente entre el nivel de la contaminación por hidrocarburos y los porcentajes de las poblaciones microbianas degradadoras de hidrocarburos, respecto a las poblaciones totales heterótrofas. En este sentido, en las aguas de Galicia es de esperar que existan poblaciones microbianas adaptadas a la presencia de este tipo de contaminantes, por los antecedentes de otros vertidos.

En el medio marino, y en condiciones favorables, los microorganismos pueden degradar el 30-50% de un crudo, quedando el residuo más resistente. En el caso del

fuel del *Prestige* es evidente que nos encontramos ante un producto especialmente refractario a la degradación, por su elevado contenido de fracciones aromáticas, resinas y asfaltenos (un 78%). Ensayos de laboratorio, que conducen normalmente a una degradación de un crudo de petróleo ligero del 50-80% al cabo de un mes, no llegan al 12% con este tipo de productos.

En las muestras recogidas en el campo durante los meses siguientes al derrame, no se empezaron a evidenciar los primeros indicios de biodegradación hasta transcurridos cuatro meses. Sin embargo, un año después del vertido, aquella no había avanzado de modo significativo. Por el contrario, en el caso del vertido del *Aegean Sea*, al cabo de un año se observaron ya perfiles de degradación muy importantes en los sedimentos, debido a la naturaleza del producto, un crudo muy fluido, que se dispersó en el medio y lo hizo más disponible al ataque bacteriano. El caso más sorprendente fue el del accidente del pozo *Ixtoc*, en el Golfo de México (1979), que vertió 800.000 toneladas de crudo y, al cabo de un año, la contaminación era prácticamente imperceptible en la región.

Una ilustración de los procesos de envejecimiento del petróleo en el mar se muestra en la Figura 6, para el caso del *Exxon Valdez*, durante los primeros tres años del vertido, al cabo de los cuales, como puede observarse, alrededor de un 15% del crudo aún estaba impregnando el sedimento¹⁰.

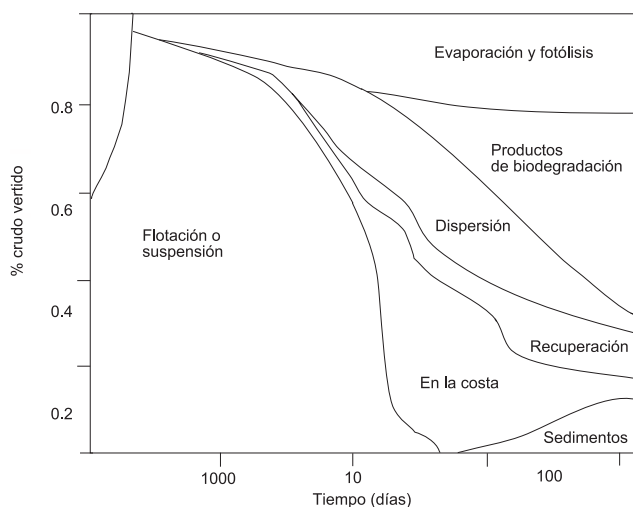


Figura 7. Procesos de envejecimiento del crudo vertido por el *Exxon Valdez* entre 1989 y 1992

PARÁMETROS INDICADORES DEL ORIGEN Y ENVEJECIMIENTO DE UN VERTIDO. REDES DE VIGILANCIA

La correlación inequívoca de muestras de hidrocarburos recogidas en el medio marino con un producto derramado es uno de los aspectos críticos en la gestión de un vertido. Esta cuestión es fundamental para evaluar la extensión de la zona impactada y para la determinación de responsabilidades, y resulta más compleja a medida que transcurre el tiempo, por la existencia de otras fuentes de hidrocarburos que contaminan de manera crónica el medio marino. En consecuencia, después de la fase aguda de un vertido de petróleo, e incluso después de transcurrido un cierto tiempo, es importante establecer redes de vigilancia para esclarecer la procedencia de dichas muestras.

Las metodologías para la identificación del origen de un derrame han ido evolucionando progresivamente, desde la utilización de parámetros singulares obtenidos mediante distintas técnicas (p. ej. contenidos de S, Ni, V, hidrocarburos, etc.), a la utilización de varios parámetros obtenidos con una misma técnica (p. ej. metales por ICP-MS o hidrocarburos por CG-EM), con el fin de establecer la «huella digital» del producto¹¹. Particular interés tiene la determinación de distribuciones de marcadores moleculares presentes en el petróleo y la utilización de diversos tratamientos numéricos y estadísticos para establecer el grado de coincidencia con las muestras de referencia. Esta aproximación es hoy día la aceptada, tanto en EEUU¹² como en Europa¹³, y ha sido utilizada en el seguimiento de los mayores derrames de la última década, incluidos los del *Aegean Sea* y del *Prestige*^{8,14}.

Por otra parte, a través del estudio de la evolución de la composición química de las muestras recogidas, puede evaluarse el alcance de los procesos de envejecimiento («weathering»), cuestión de suma importancia para valorar las posibilidades de remediación de la contaminación y los efectos sobre el ecosistema. De esta forma, el grado de envejecimiento de las muestras puede estimarse a partir de las distribuciones relativas de *n*-alcanos (evaporación), derivados naftalénicos (disolución) y de la relación *n*-C18/fitano (biodegradación).

Desde las primeras fases del accidente del *Prestige*, la Sociedad de Salvamento Marítimo SASEMAR procedió a la recogida sistemática de muestras a lo largo de la costa, para el posterior estudio de su origen y grado de envejecimiento, a cargo del Instituto de Investigaciones Químicas y Ambientales (CSIC) de Barcelona. Aunque la mayor parte de las muestras recogidas correspondieron a fuel-oil del *Prestige*, se observaron algunos episodios significativos de llegada de residuos del lavado de tanques o sentinas, principalmente frente a las costas de A Coruña, lo que confirma la oportunidad de las tareas de vigilancia.

Por otra parte, los análisis de las muestras identificadas como procedentes del *Prestige* mostraron, todas ellas, un grado de envejecimiento acorde con su permanencia en el mar durante el tiempo transcurrido desde el vertido inicial. En las primeras semanas se observó la pérdida de los compuestos más solubles (p. ej. naftaleno y metil-naftalenos) y al cabo de 1-2 meses una ligera disminución de las fracciones más volátiles (alcanos hasta 12-14 átomos de carbono). A partir de los seis meses, las

muestras presentaron leves indicios de biodegradación, más evidentes en las recogidas en la costa que en alta mar, si bien no significativos desde el punto de vista de la reducción de la cantidad de material vertido. Se consideró que estos procesos pudieron afectar a menos del 10% de la masa total de fuel.

La principal conclusión de estas observaciones fue que la recogida manual o mecánica del fuel era la solución más eficaz para limpiar la costa en un tiempo razonable. Por otra parte, las labores de vigilancia deberían seguir, para identificar otros vertidos y para detectar una posible aceleración de los procesos de envejecimiento, principalmente en lugares inaccesibles, como los fondos de la plataforma.

DISTRIBUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL DE LOS HIDROCARBUROS EN LA ZONA DEL VERTIDO

Para llevar a cabo las tareas de cartografiado de un vertido, desde el punto de vista de la delimitación del área geográfica y de su incidencia en el medio, se procede al establecimiento de una red de estaciones de muestreo de los compartimentos biótico y abiótico, que se recorren con una periodicidad determinada.

En la Figura 8 se muestran las que se establecieron en la costa gallega, después del accidente del *Prestige*, por parte del Instituto Español de Oceanografía (IEO) de Vigo y de la Universidad de Santiago, en el marco de dos Acciones Especiales^{15,16}. En este sentido, el IEO efectuó cuatro campañas de muestreo de agua (superficie, medio y fondo) y de sedimentos superficiales de la plataforma, cubriendo las costas gallega y cantábrica (diciembre 2002 y febrero, marzo, septiembre 2003)¹⁷. Asimismo, se recogieron muestras de percebe (*Polycipes cornucopia*), navaja (*Ensis ensis*) y erizo (*Paracentrotus lividus*) en las zonas más afectadas (enero-septiembre 2003) y de mejillón silvestre, a lo largo de las 40 estaciones de la red de vigilancia del Instituto (febrero-marzo y junio-julio 2003). Por su parte, un equipo multidisciplinar, liderado por la Universidad de Santiago de Compostela, procedió a la recogida de muestras en fondos rocosos y sedimentarios costeros, en ocho localidades de la costa oeste de Galicia, durante el período primaveral del 2003.

Para estimar el impacto del fuel sobre las comunidades costeras se estudiaron la zona costero-terrestre en acantilados y dunas, los fondos intermareales e infralitorales hasta una profundidad de 30 m, el seston y tres especies de interés comercial (percebe, semilla de mejillón y erizo). El mayor impacto se detectó en la zona intermareal donde se produjeron los mayores acúmulos de fuel y en el sistema costero-terrestre, muy afectado como consecuencia de las tareas mecánicas de limpieza¹⁶.

Las estaciones de Caldebarcos, Camelle, Cíes y Oia fueron las que presentaron niveles más elevados de hidrocarburos (más de 200 µg/kg peso seco Σ16 HAPs), mientras que Caión y Esteiro presentaron valores más bajos. Algunas estaciones, como O Segao, presentaron valores elevados, pero probablemente derivados de fuentes de contaminación distintas al resto de estaciones.

El análisis de las muestras de agua ofreció concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos comprendidas entre 0.2 y 25 µg/L eq. de fuel, observándose los mayores niveles frente a la Costa da Morte, en la primera campaña. Los valores, en

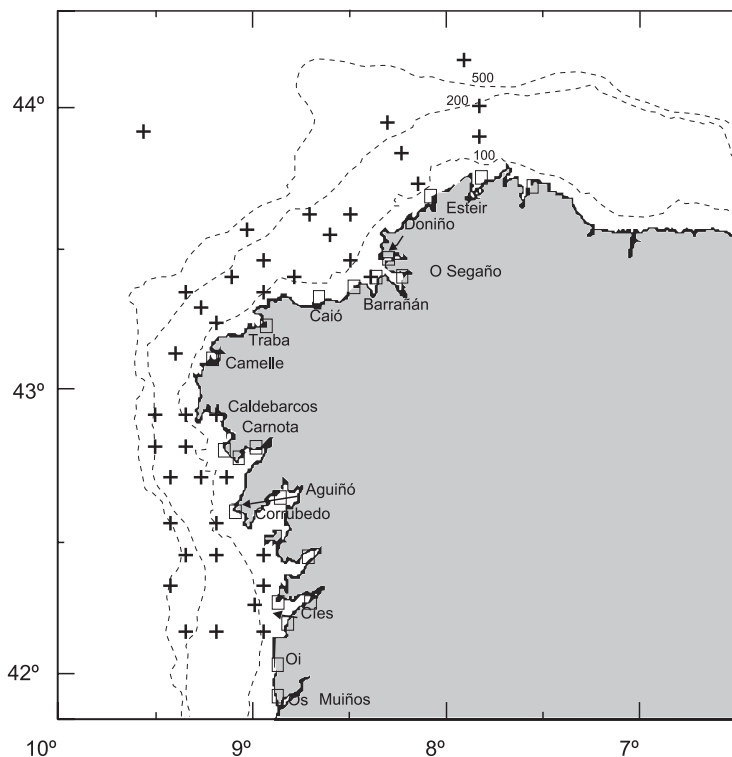


Figura 8. Red de estaciones de muestreo para el seguimiento del vertido del *Prestige*. Se indican los 13 lugares donde se efectuó el muestreo costero, así como los correspondientes al muestreo de mejillón silvestre (·). Los muestreos en la plataforma se indican con un signo (+).

general, fueron inferiores a los que cabía esperar por la cantidad de fuel vertido y en comparación con otros accidentes. Esto fue debido, fundamentalmente, a las características físico-químicas del fuel derramado, cuya proporción de componentes solubles en agua es mucho menor que en otros productos. Además, en prácticamente todas las estaciones se detectaron disminuciones de las concentraciones de hasta 5-10 veces entre las campañas de diciembre 2002 y febrero 2003.

Los sedimentos mostraron valores de hidrocarburos comprendidos entre 4 y 125 µg/kg eq. de fuel. Estos valores se encuentran dentro de los niveles que presentan zonas relativamente alejadas de aportes antropogénicos. Su presencia fue mayor frente a las rías de Pontevedra y A Coruña, tradicionalmente afectadas por aportes urbanos y portuarios. Las áreas próximas a Muxía y Finisterre mostraron también valores ligeramente por encima de la media, pero en ninguna muestra se observó de forma clara la huella molecular del fuel del *Prestige*, lo que viene a confirmar la escasa difusión del mismo en el medio. Por el contrario, en el accidente del *Aegean Sea*, los sedimentos de la ría de A Coruña aún contenían crudo, a 5 cm de profundidad, un año después del derrame⁶.

La distribución espacial de hidrocarburos en mejillón silvestre recogido en febrero-marzo 2003 reflejó el impacto del vertido en las estaciones de Corrubedo y Costa da Morte (Muxía, Corme y Caión) (hasta 8 $\mu\text{g/kg}$ peso seco $\Sigma 13$ HAPs), si bien en el muestreo posterior los valores ya disminuyeron sensiblemente (valores entre 500 y 1000 $\mu\text{g/kg}$ peso seco) y descendieron de forma significativa a los pocos meses del vertido. Las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en las muestras de percebe, navaja y erizo se situaron por debajo del valor guía (200 $\mu\text{g/kg}$ peso seco de los 6 HAPs), a partir de marzo-mayo 2003.

Estas tendencias temporales son comunes a todos los vertidos. En la Figura 9 se muestran las tendencias observadas en los del *Aegean Sea*, *Erika* y *Prestige*.

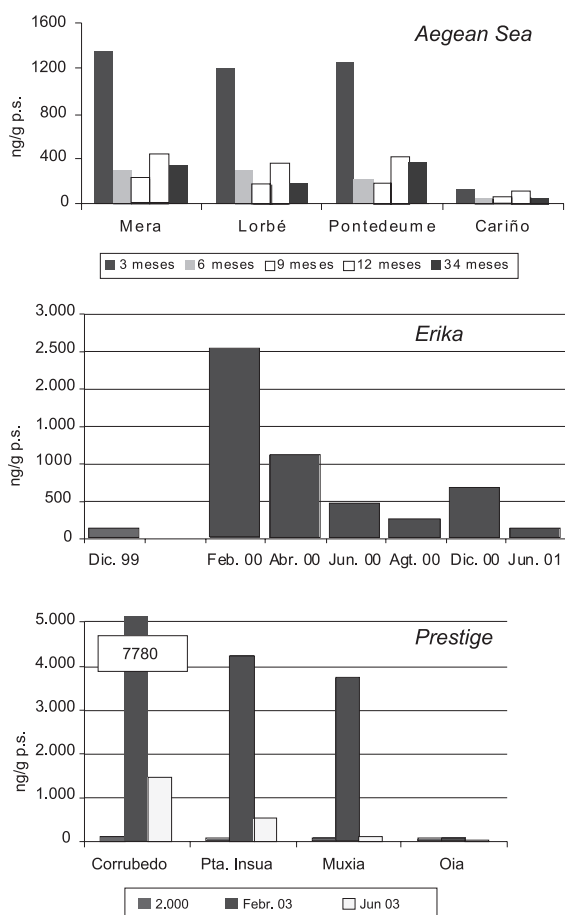


Figura 9. Concentraciones de HAPs en mejillones recogidos en puntos de las costas afectadas por los vertidos del *Aegean Sea*, *Erika* y *Prestige* (15, 18, 19).

ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE EL IMPACTO DE UN VERTIDO DE PETRÓLEO SOBRE LOS ORGANISMOS MARINOS

Un accidente como el sufrido por el *Prestige* plantea numerosas cuestiones sobre el impacto que va a causar en el ecosistema marino. Este incluye un amplio abanico de efectos sobre las comunidades bióticas, que van desde los agudos e inmediatos, hasta efectos a medio y largo plazo, en ocasiones difíciles de cuantificar porque no pueden separarse de otros efectos que puedan sufrir los organismos como consecuencia de la propia dinámica ambiental.

Aunque esta temática se trata más extensamente en otro capítulo, nos limitaremos a hacer algunas consideraciones derivadas de lo expuesto en éste. Tanto el fuel que se encontraba flotando en la superficie del océano como el que se depositó en la costa pudo causar, en las primeras semanas del derrame, la muerte de aves por hipotermia y de organismos intermareales por asfixia, al entrar en contacto directo con el producto. Algunos organismos bentónicos (p. ej. almejas, caracoles, etc.) pueden sobrevivir, pero acumularán en sus tejidos concentraciones importantes de hidrocarburos, que pueden ser transferidos a sus depredadores inmediatos. Ésta ha sido una de las hipótesis barajadas para explicar que, al cabo de diez años del accidente del *Exxon Valdez*, algunos organismos depredadores de invertebrados bentónicos (p.ej. el «harlequin duck» y el «pigeon guillemot») todavía no se hayan recuperado⁹.

Los organismos que viven en la columna de agua en la zona del vertido pueden verse también afectados, al dispersarse y solubilizarse una fracción del fuel. La cantidad y toxicidad de esta fracción soluble varía con el tipo de fuel, si bien los organismos móviles (peces) tienden a alejarse del producto tóxico. En el caso del *Prestige*, la escasa concentración de fracciones de bajo peso molecular redujo notablemente la presencia de hidrocarburos disueltos y, por tanto, su incidencia en la biota pelágica. En este sentido, según los estudios realizados, no parece que tuviera un efecto significativo sobre el «bloom» planctónico primaveral⁵. Estudios sobre otros vertidos también han puesto en evidencia su escasa incidencia sobre este nivel de la cadena trófica marina²⁰.

A corto-medio plazo, y dadas las características de persistencia de algunos de los componentes del petróleo, se produce su acumulación en los órganos de la fauna expuesta. Por su especial toxicidad y potencial carcinogénico, los trabajos de vigilancia (monitoring) se centran, entre otros, en la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs). Investigaciones realizadas tras el vertido del *Aegean Sea* en las costas de A Coruña, y en otros accidentes de similares características, los mejillones, organismos filtradores que viven suspendidos en la columna de agua, muestran una rápida acumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos, si bien esta acumulación es reversible, en el sentido de que son excretados cuando la contaminación del medio desciende o desaparece (Figura 9).

El vertido de petróleo no sólo afecta la columna de agua sino también el sedimento. Los HAPs, dada su hidrofobicidad, se adhieren a pequeñas partículas, que acaban

acumulándose en el sedimento. Esto conlleva una mayor exposición de los organismos bentónicos, que buscan su alimento en los fondos marinos. Sin embargo, los bivalvos que viven en contacto con el sedimento, como almejas y berberechos, muestran un comportamiento diferente al de los mejillones y la acumulación de HAPs en sus tejidos es más «errática», variando de una zona a otra. En un periodo de estudio de 3 años después del accidente del *Aegean Sea*, difícilmente llegó a verse una variación temporal clara¹⁸. Probablemente, no es la presencia de estos hidrocarburos sino su biodisponibilidad el factor determinante en este comportamiento.

Desde el punto de vista del ingreso de estos compuestos en la cadena trófica, es importante señalar que los HAPs se acumulan de modo significativo en bivalvos, pero no en vertebrados (peces, aves, etc.), que son capaces de metabolizarlos y excretarlos. Los crustáceos tienen también un sistema enzimático más eficiente que el de los bivalvos para metabolizar estos hidrocarburos y presentan menores niveles de acumulación. Sin embargo, en sus fases iniciales del desarrollo, estos organismos pueden ser proclives a experimentar efectos tóxicos (peroxidación de lípidos, carcinogénesis, alteraciones del sistema inmune y otras patologías).

Estudios realizados tras el accidente del *Exxon Valdez* mostraron una menor viabilidad de huevos y malformaciones en las larvas de arenque de las zonas afectadas por el vertido. Se observó también una mayor incidencia de enfermedades víricas, que, junto con una disminución de la producción de plancton, contribuyeron a una fuerte disminución de la población en los años siguientes al vertido⁹. Ciertamente, no pueden extrapolarse estos resultados, y esperar el mismo tipo de efectos en otras especies y escenarios; pero hay que tener en cuenta que huevos y fases larvarias, independientemente de que sean pelágicas o bentónicas, son más sensibles a la exposición a compuestos tóxicos, que los organismos adultos.

Finalmente, y en base a las investigaciones realizadas tras otros accidentes de estas características, es preciso señalar que, a largo plazo, es extremadamente difícil distinguir entre lo que son posibles efectos del vertido de los causados por la contaminación de distinto origen que ya sufren los ecosistemas marinos, o por otras alteraciones del hábitat litoral.

AGRADECIMIENTOS

Los antiguos Ministerios de Obras Públicas (1993) y de Ciencia y Tecnología (2003) contribuyeron decisivamente a la realización de los trabajos sobre los vertidos del *Aegean Sea* y del *Prestige*. La Sociedad SASEMAR colaboró eficazmente en la recogida de muestras del *Prestige*. El equipo del IEO de Vigo, dirigido por el Dr. J. José González, llevó a cabo, en ambos vertidos, una importante labor de estudio sobre el terreno, que deseo resaltar. Finalmente, deseo agradecer a los Drs. Cinta Porte y Josep M. Bayona su cooperación en estos trabajos.

REFERENCIAS

1. L. Stake (ed) (2001). State of the World 2001. Worldwatch Institute, Washington, USA, p. 89.
2. L. Stake (ed) (2004). State of the World 2004. Worldwatch Institute, Washington, USA, p. 29.
3. D. Walker, K. Michel, J.C. Coleman, J. Michel. (2003). Oil in the Sea: Changes in the nature of sources and inputs since 1985. Proceedings of the 2003 International Oil Spill Conference, API, Washington, 4pp.
4. International Tankers Owners Pollution Federation (ITOPF). <http://www.itopf.com>
5. Oficina Técnica de Coordinación del Programa de Vertidos Marinos. <http://otvm.uvigo.es/investigacion/aeus/aeurgentes.html>
6. B. P. Tissot, D.H. Welte (1978). Petroleum formation and occurrence, Springer, Berlin, 538 pp.
7. J. Albaigés (1989). Marine Pollution. Hemisphere Publ. Co., New York. 367 pp.
8. D. Pastor, J. Sánchez, C. Porte, J. Albaigés (2001). The *Aegean Sea* oil spill in the Galicia Coast (NW Spain). I. Distribution and fate of crude oil and combustion products in subtidal sediments. Mar. Pollut. Bull., 42, 895-904.
9. C. H. Peterson et al. (2003). Long-term ecosystem response to the *Exxon Valdez* oil spill. Science, 302, 2082-2086.
10. P. G. Wells, J. N. Butler, J. S. Hughes (eds.) (1995). *Exxon Valdez* Oil Spill: Fate and effects in Alaskan waters, ASTM STP 1219, American Society for Testing and materials, Philadelphia.
11. J. Albaigés, P. Albrecht (1979). Identification of marine hydrocarbons by computerized gas chromatography-mass spectrometry. Intern. J. Environ. Anal. Chem., 6, 171-190.
12. ASTM (1990). Standard practice for oil spill identification by gas chromatography and positive ion electron impact low resolution mass spectrometry. D-5739-95. American Society for Testing and Materials, W. Conshohocken, PA, USA.
13. NORDTEST (1991). Nordtest method for oil spill identification. NT CHEM 001, Nordic Innovation Center, Espoo, Finland.
14. J. Albaigés, J.M. Bayona (2003). El fuel. En La huella del fuel. Ensayos sobre el *Prestige*. Fundación Santiago Rey (Coruña, España), 80-103.
15. Acción Especial «Análisis y cartografía del fuel en aguas, sedimentos y organismos y niveles de contaminación. Inventario de los resultados previos obtenidos en Galicia y Cantábrico». <http://otvm.uvigo.es/investigacion/aeus/aeu6/aeu.html>
16. Acción Especial «Evaluación del impacto en las comunidades y especies de interés comercial y ecológico en las zonas costeras. Período primavera». <http://otvm.uvigo.es/investigacion/aeus/aeu8/aeu.html>
17. Instituto Español de Oceanografía. <http://www.ieo.es/prestige/resultados.htm>
18. C. Porte, X. Biosca, D. Pastor, M. Solé, J. Albaigés (2000). The *Aegean Sea* oil spill in the Galicia Coast (NW Spain). II. Temporal study of the hydrocarbons accumulation in bivalves. Environ. Sci. Technol., 34, 5067-50
19. IFREMER. <http://www.suivi-erika.info/etudes/accueil.php>
20. R.F. Lee, D.S. Page. Petroleum hydrocarbons and their effects in subtidal regions after major oil spills, Mar. Pollut. Bull., 34, 928-940 (1997).

EL VERTIDO DEL *PRESTIGE*. IMPACTO SOBRE LOS SERES VIVOS

ANTONIO FIGUERAS

INTRODUCCIÓN

Es bien sabido que la vida en la tierra comenzó en el mar y todavía provee más del 95% de la biosfera; que el océano configura las condiciones y naturaleza del clima, estabiliza la temperatura, genera la mayor parte del oxígeno atmosférico y en general hace que la tierra sea hospitalaria para los frágiles humanos que respiramos aire. Sin embargo, existe la curiosa convicción de que el mar es tan enorme que nada que podamos hacer llegará a causar algún daño a su naturaleza básica. Como consecuencia, una profunda y peligrosa complacencia nos atonta mientras destruimos el océano.

Principalmente a partir de finales de la Segunda Guerra Mundial, la creciente expansión de las actividades humanas, sobre todo industriales, ha provocado profundas alteraciones en los ambientes naturales terrestres, pero también en los marinos. El impacto de los diferentes tipos de contaminación marina ha tenido como consecuencia el empobrecimiento de los recursos, sobre todo de los naturales; la modificación de amplios ambientes geológicos y de ecosistemas litorales; la introducción de especies no autóctonas en diferentes regiones geográficas y la liberación de sustancias de diferente naturaleza y toxicidad, capaces de producir transformaciones anormales en los organismos y situaciones anómalas en el funcionamiento de los ecosistemas.

La degradación del medio marino puede deberse a una amplia variedad de fuentes. Las fuentes terrestres representan el 70% de la contaminación marina, mientras que las actividades del transporte marítimo y los vertidos en el mar representan el 10%.

Los contaminantes que suponen la mayor amenaza para el medio marino, en orden variable de importancia son los siguientes: las aguas residuales, constituidos por materia orgánica biodegradable procedente de vertidos urbanos; los nutrientes, sustancias biodegradables de diferente naturaleza producidas por determinadas industrias como papeleras, conserveras, azucareras, fábricas de piensos, etc.; los sedimentos o residuos particulados, que son materiales inertes de tamaño variable y de distinta procedencia como dragados, rellenos realizados con materiales terrígenos; también son materiales no particulados, no biodegradables los materiales plásticos, los metales pesados, las sustancias radioactivas y los compuestos organohalogenados que contienen los insecticidas y los plaguicidas y otros compuestos de amplia aplicación industrial. Los hidrocarburos saturados, los insaturados y los aromáticos, todos ellos procedentes del petróleo, pueden considerarse contaminantes biodegradables, aunque muy a largo plazo. Por último se debe considerar también la contaminación producida por el vertido al mar de agua caliente empleada por las centrales térmicas y nucleares para la refrigeración de sus circuitos. Muchas de las sustancias contaminantes que provienen de fuentes terrestres son de interés particular para el medio marino puesto que se caracterizan simultáneamente por su toxicidad, su persistencia y la posible bioacumulación en la cadena trófica.

AGENTES CONTAMINANTES

Aguas residuales

Las aguas residuales constituyen un elemento de contaminación biodegradable. Para ello es necesaria la presencia de microorganismos que mineralicen la materia orgánica. Generalmente son bacterias aeróbicas, y una de sus principales necesidades es la buena oxigenación de las aguas. Cuando las aguas tienen poca cantidad de nutrientes y están bien oxigenadas, un aporte adicional de materia orgánica produce una fertilización de las mismas. Sin embargo, si las aguas están poco oxigenadas por cualquier razón (aguas someras, poco efecto de mareas y corrientes, etc.) la materia orgánica no puede mineralizarse por completo produciéndose una situación de eutrofización, creando condiciones de anoxia, que influyen negativamente en las comunidades vegetales y animales. Por otra parte, estos vertidos incluyen enormes cantidades de bacterias, hongos, virus y larvas o huevos de diferentes especies de parásitos, algunas de ellas patógenas. Cuando estas aguas son vertidas sin purificar directamente en zonas donde hay playas aptas para el baño tienen una influencia altamente negativa, ya que convierte a las aguas y a las arenas en focos potenciales de infección. Las afecciones más comunes son enterocolitis, paratífus, tifus, cólera y hepatitis vírica en casos extremos. Estos casos de vertidos de aguas residuales de origen urbano son todavía relativamente frecuentes en algunas zonas de las costas españolas. En otras, donde se han instalado depuradoras, no siempre son suficientes o en algunos casos, desafortunadamente, los emisarios no cuentan con todas las medidas de seguridad necesarias y

llegan a romperse. Los límites estándar para permitir el baño en todos los países de la Unión Europea son de 100 coliformes fecales por 100 ml de agua de mar. La bandera azul que otorga la Unión Europea a determinadas playas identificándolas como totalmente aptas para el baño se basa, entre otros factores, en análisis de este tipo. Pero además, para la sanidad pública supone un problema mayor el consumo de productos pesqueros de zonas sometidas a este tipo de contaminación. Entre estos productos los más peligrosos son los moluscos bivalvos por ser filtradores. Por ello es totalmente necesario su previa purificación antes de comercializarlos. La depuración de estos productos es obligatoria en España antes de su consumo en fresco.

Metales pesados

Algunos metales pesados, como el cobre, el zinc, el cromo, el magnesio, el níquel o el cobalto son componentes naturales del medio marino y los organismos los necesitan en cantidades ínfimas para determinadas funciones metabólicas, es decir son esenciales. Sin embargo, se desconoce la función biológica del mercurio, el cadmio o el plomo. Todos ellos pueden ser tolerados por los organismos pero cuando su nivel alcanza valores relativamente elevados resultan tóxicos.

Los organismos han desarrollado diferentes sistemas para neutralizar los efectos tóxicos debidos a concentraciones anormales de este tipo de contaminantes en las aguas. Las más comunes son mecanismos homeostáticos que permiten regular la concentración interna de metales frente a las variaciones en el medio ambiente. Otras veces hay mecanismos de detoxificación que se basan en la presencia de moléculas quelantes de los metales en los fluidos corporales. Sin embargo, vertidos importantes de mercurio procedentes de industrias de plaguicidas, pilas alcalinas, empresas electrolíticas relacionadas con industrias papeleras que utilizan electrodos de mercurio, etc., provocan el vertido de altas concentraciones de este metal. La presencia de mercurio en los componentes básicos de la cadena trófica es sobre todo peligrosa porque este metal es bioacumulable, de manera que en los grandes depredadores puede llegarse a cantidades superiores a los niveles permitidos por la Organización Mundial de la salud, que son 0,7 partes por millón para los países de la Unión Europea, e inferiores en otros países.

El mayor envenenamiento por mercurio tuvo lugar en la Bahía Minamata (Japón) en 1952. La compañía química Chisso vertía mercurio en el puerto de Minamata. Durante varios años, la población de la Bahía de Minamata comió pescado contaminado de este puerto. 397 personas fueron afectadas. 68 murieron, incluyendo 22 niños antes de nacer. Es importante señalar que tan solo se elimina el 1% de la cantidad de mercurio del cuerpo, por lo que la recuperación de los individuos afectados es prácticamente imposible. Los resultados de esta intoxicación consisten en pérdida de la memoria, gran incapacidad de concentrarse en actividades intelectuales, disminución de la capacidad de aprendizaje, irritabilidad, depresión, apatía, indiferencia. En los estadios más avanzados se produce una disfunción total del sistema nervioso central, pérdida de sensibilidad en los miembros, parálisis, debilidad muscular, pérdida de visión y daños renales.

Conviene citar aquí la contaminación que producen determinadas sustancias contenidas en las pinturas antiincrustantes, usadas en las pinturas de los cascos de los barcos. La mayoría de ellas contienen arsénico que, incluso en pequeñas cantidades, es una sustancia extremadamente tóxica.

Compuestos organoclorados

En cuanto a los compuestos organoclorados como los clorobifenilos, procedentes de insecticidas, plaguicidas y herbicidas, también se ha descrito la importancia de determinar sus niveles en el sedimento y en matrices biológicas, debido a su persistencia en el medio marino, utilidad como indicadores de actividad humana (concentración urbana e industrial), y toxicidad. Hay que tener en cuenta que son sustancias insolubles en agua y la mayoría resistentes a la acción bacteriana. El compuesto más conocido es el DDT (diclorodifeniltricloroetano), actualmente prohibido por la legislación de muchos países. Derivados menos tóxicos del DDT son el DDE (diclorodifenildicloroetilo) y el DDD (diclorodifenildicloroetano). En Galicia, debido a su peculiar régimen agrícola, la presencia de estos compuestos en aguas fluviales y marinas no es tan alta como en otras regiones de España. Sin embargo, su control es necesario, así como también lo es la de los compuestos policlorobifenilos o PCBs, que son sustancias ampliamente utilizadas en la industria de plásticos, pinturas antiincrustantes y aceites lubricantes. Estas sustancias se van acumulando en la cadena trófica, pudiendo llegar a ser tóxicas en los depredadores de niveles altos como aves y mamíferos marinos.

Hidrocarburos poliaromáticos

Los hidrocarburos poliaromáticos (PAHs) están ampliamente distribuidos en el medio marino como consecuencia de dos tipos de procesos: naturales o biogénicos (plantas, bacterias, actividad volcánica, incendios forestales o procesos geoquímicos) y antropogénicos (consecuencia de actividades humanas: vertidos urbanos, industriales, accidentes, «mareas negras», o simplemente goteo permanente por pérdidas en los depósitos, oleoductos, refinerías, limpieza de fondos de los barcos, etc.). Son compuestos hidrofóbicos, por lo que permanecen poco tiempo en el agua, generalmente, se adsorben sobre la materia particulada y acaban depositándose en el fondo, pasando a formar parte del sedimento para, posteriormente reincorporarse lentamente a la columna de agua por un proceso de desadsorción. Por ello, es muy importante determinar la distribución de PAHs en el sedimento, especialmente en un área semicerrada como las rías y ensenadas en las que suele haber un aporte permanente de contaminantes debido a la actividad portuaria de la zona, comercial, pesquera y urbana. Es necesario mantener una vigilancia constante respecto a estos PAHs, ya que la mayoría son cancerígenos. Los PAHs de este grupo que se suelen estudiar con más frecuencia son el benzo (a)pireno, que tiene una actividad carcinogénica muy alta y cu-

yos productos de degradación, son aún más peligrosos que él mismo, el benzo(b)fluoranteno, con una actividad carcinogénica media y el antraceno que se considera inactivo. Corresponden además a compuestos que contienen en su molécula 5, 4 y 3 anillos aromáticos respectivamente. Todos los tipos de petróleos son susceptibles de biodegradación por bacterias y levaduras marinas, pero el proceso es bastante lento.

Las consecuencias de una contaminación por petróleo sobre las comunidades marinas adquieren gran notoriedad cuando se trata de vertidos masivos. Los efectos de esta clase de contaminantes son de dos tipos: en primer lugar los derivados de sus propiedades físicas, que contribuyen a la formación de capas en la superficie que impiden el paso de la luz, repercutiendo negativamente en la producción primaria fotosintética; en segundo término, sus efectos tóxicos.

Tanto el fuel que se encuentra flotando en la superficie del océano como el que se encuentra ya en la costa pueden causar, en las primeras semanas del derrame, la muerte de organismos bentónicos (por asfixia) y de aves (hipotermia), que entren en contacto directo con el producto. Algunos organismos bentónicos (p.ej. almejas, caracoles, etc.) pueden sobrevivir, pero acumularán en sus tejidos concentraciones importantes de hidrocarburos, que pueden ser transferidos a sus depredadores inmediatos.

Los organismos que viven en la columna de agua en la zona del vertido pueden verse también afectados, al dispersarse y solubilizarse una fracción del fuel. La cantidad y toxicidad de esta fracción soluble varía con el tipo de fuel, si bien los organismos móviles (peces) tienden a alejarse del producto tóxico.

A corto-medio plazo, y dadas las características de persistencia de algunos de los componentes del petróleo, se produce su acumulación en los órganos de la fauna expuesta. Por su especial toxicidad y potencial carcinogénico los trabajos de vigilancia (monitoring) se centran, entre otros, en la presencia de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs).

La recuperación de las comunidades bentónicas destruidas es bastante lenta, mientras que las planctónicas se recuperan con mayor rapidez. Son muy evidentes los efectos en las aves y los pinnípedos, pero también en otros mamíferos marinos.

La contaminación marina también es causada por el transporte marítimo y las actividades marinas. Como resultado de operaciones habituales del transporte marítimo, accidentes y descargas ilegales se vierten aproximadamente cada año en los océanos 600.000 toneladas de petróleo. Debido a su índole y alcance, el efecto ambiental de las actividades de exploración y extracción de petróleo frente a las costas por lo general representa una proporción bastante reducida de la contaminación marina.

Los organismos acuáticos pueden acumular HAPs del agua, sedimentos y alimento. La bioconcentración de HAPs es muy variable según la especie (WHO 1998). Las especies que no metabolizan HAPs o que lo hacen con dificultad, (algas, oligoquetos y moluscos) y los invertebrados más primitivos (protozoos, poríferos y cnidarios) acumulan concentraciones elevadas de HAPs lo cual repercute tanto sobre la biología de estas especies como en la potencial toxicidad para su consumo para el ser humano y sus depredadores naturales. Los organismos que metabolizan HAPs como los peces y vertebrados superiores no los acumulan o lo hacen muy limitadamente. Se ha demostrado una cierta biomagnificación de HAPs a través de la cadena trófica

(por ejemplo de anélidos a peces) pero la mayor capacidad de degradación de HAPs por parte de organismos más complejos reduce la eficiencia del transporte.

La situación actual en Galicia es preocupante en lo referente a los vertidos de petróleo y derivados. Por una parte, la costa gallega está apenas a diez millas de una de las rutas de tráfico marítimo, con muchos petroleros circulando por ella, más transitadas del mundo. El peligro que esto representa, dada la posibilidad de accidentes, la limpieza de sentinas de buques frente a nuestras costas, y que la mayoría de los barcos petroleros carecen de doble casco, es grande. Por otra parte, prácticamente la totalidad de los barcos pesqueros y mercantes gallegos limpia sentinas en puerto sin control alguno. A estos factores hay que añadir los vertidos de aceites de algunas industrias. Todo ello insta nítidamente a elaborar planes urgentes de lucha contra la contaminación por petróleo en aguas litorales y puertos. Sin embargo, hay grupos económicamente poderosos que se están planteando la instalación de depósitos de derivados del petróleo en costa para servir de surtidores a parte de la flota, más de 50.000 barcos anuales, que pasan por delante de nuestras costas camino de los puertos del norte de Europa. Por muy segura que pueda parecer una instalación de este tipo, es siempre un gran riesgo por los potenciales accidentes. Pero aún estableciendo sistemas de seguridad altamente sofisticados, es prácticamente imposible evitar el goteo diario derivado del vertido de mangueras, sentinas, y otros tipos de escapes incontrolados.

El fuel del *Prestige*

El producto transportado por el *Prestige* era un fuel-oil pesado, del tipo M-100 (terminología rusa), N°. 6 (terminología anglosajona) o N°. 2 (terminología francesa). Se trata de un producto residual de destilación del petróleo, sometido a tratamiento térmico («visbreaking») y/o mezcla con algún destilado ligero («cutter stock») para reducir su viscosidad. La carta de transporte especifica una densidad de 992,1 kg/m³ a 15°C (11,04° API) y una viscosidad de 615 cSt a 50°C. Medidas efectuadas por el CEDRE sobre una muestra de referencia indican 995 kg/m³ y 30.000 cSt a 15°C. Ensayos encargados por el CCA con muestras tomadas en el pecio han determinado que la densidad a 3° C y 350 atm.: 1.012 kg/m³ Su composición es: C, 85,8 %; H, 11,0%; S, 2,28 % y N, 0,69 %. Contiene un 22% de hidrocarburos saturados, 50% de hidrocarburos aromáticos y un 28% de resinas y asfaltenos. Se trata, de un residuo de tipo naften-aromático. La concentración de los 16 hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) prioritarios de la EPA. (Naftaleno, acenaftileno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, criseno, benz[a]antraceno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno, dibenzo[ah]antraceno, indeno[123-cd]pireno, benzo[ghi]perileno) es de 1.264 mg/kg, con un índice de toxicidad equivalente de 49,7. La toxicidad equivalente se define como S (Índice de toxicidad de cada PAH x Concentración en el fuel-oil). La carga de toxicidad equivalente del fuel-oil del *Erika* era de 165,8. Forma fácilmente emulsiones en el mar, con contenidos del 45-50% de agua. A los dos meses de permanencia en el mar, las pér-

didadas por evaporación y disolución, no alcanzan el 5%. Su biodegradabilidad en el medio es desconocida, pero se estima no superior al 10% en los primeros meses.

Impacto del vertido del *Prestige*

La Unión Europea no tiene límites establecidos para los residuos de HAP. En consecuencia, la Xunta de Galicia, en colaboración con la Agencia Española de Seguridad Alimentaria (AESA) y expertos de la Organización Mundial de la Salud, estudiaron los niveles de referencia de contaminación por HAPs de acuerdo con estándares internacionales y con la experiencia reciente (*Erika*). Los valores guía que se propusieron en zonas de producción son de **200 microgramos/kilo de peso seco** para los **moluscos**, de 6 HAP que se relacionan a continuación:

- Benzo(a)antraceno.
- Benzo(b)fluoranteno.
- Benzo(k)fluoranteno.
- Benzo(a)pireno.
- Dibenzo(a,h)antraceno.
- Indeno (1,2,3-cd) pireno.

La materia seca equivale a un 20% del peso fresco, por lo que la cifra anterior equivaldría a 40 microgramos/kilo de peso de tejido fresco (parte comestible). Para los peces, este valor guía se reduce a **20 microgramos/kilo de peso seco**, o su equivalente en peso fresco para los mismos hidrocarburos.

En general la concentración de hidrocarburos en plancton, sedimento y agua era muy baja. A 9 de abril del año 2003 los valores de HAPs de mejillón en distintos puntos de las Rías bajas estaban entre los 50 y los 100 $\mu\text{g/kilo}$ de peso seco. Sin embargo en la Ría de Corme y Laxe, lugares en los que llegaron «mareas negras» procedentes del Prestige a lo largo de varios meses, los valores en mejillón eran de 1500 a 2000 $\mu\text{g/kilo}$ de peso seco. Estos datos son preocupantes ya que se han descrito daños en organismos bentónicos con concentraciones entre 6 y 150 microg. kg^{-1} (peso seco).

Las mayores concentraciones en sedimento aparecen asociadas a grandes ciudades: Pontevedra, A Coruña, Gijón, Avilés, Bilbao, Donosti, y poblaciones gravemente afectadas por las sucesivas oleadas de llegada de fuel de Prestige: Muxía y Fisterra.

A continuación se recoge información sobre estudios de impacto del vertido del Prestige en los ecosistema litorales de Galicia, financiados mediante Acciones Urgentes y Proyectos de Investigación tomada de la Web de la Oficina de Coordinación del Programa de Intervención Científica para la Acción Estratégica contra vertidos Marinos Accidentales.

Impacto sobre la flora

En las plantas que crecen adyacentes a la costa (p. ej. dunas) se observa pérdida de biodiversidad y reducción del tamaño de las poblaciones, así como fragmentación de la cobertura, con desaparición incluso de especies del primer cinturón de playa. En algunas zonas las actividades de limpieza y la apertura de pistas tuvieron un impacto más negativo que el producido por el fuel. En la zona rocoso-intermareal se encuentran también zonas desnudas debido a la acción de las hidrolimpiadoras.

Impacto sobre el plancton

Tanto los valores de concentración total de clorofila como la distribución de clases de tamaño del plancton en mayo del 2003 fueron muy similares a los registrados en la misma estación de años anteriores, o sea, el plancton no se ha visto afectado. Sin embargo, las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el plancton en mayo de 2003 fueron anormalmente elevadas.

El plancton no constituye el mejor indicador de impacto de fuel en el medio marino, ya que la comunidad planctónica está poco expuesta a los efectos del vertido debido a la baja solubilidad del mismo, la baja toxicidad de la fracción soluble, las altas tasas de reproducción planctónica, la rápida sustitución de las comunidades afectadas por otras nuevas poblaciones procedentes de zonas limpias o sin contaminar (transportadas por las masas de agua) y la selección natural de cepas resistentes ocasionada por la contaminación crónica de baja intensidad de zonas costeras (tráfico marítimo de gran intensidad y crecimiento industrial y urbano).

Impacto sobre la fauna

En general los organismos de mayor tamaño que habitan las playas, presentan pérdida de abundancia, biomasa y diversidad.

En la zona **intermareal** se ha observado una disminución del número de especies de macrofauna, abundancia y biomasa con respecto a estudios anteriores realizados en las mismas áreas de muestreo, siendo el grupo de anélidos e insectos los más afectados. Esto puede ser debido al efecto tóxico del fuel depositado en la zona supralitoral y a las labores de limpieza en las que se retiró el fuel junto con restos contaminados y los primeros centímetros de sedimento, eliminándose también las algas de arribazón, hábitat típico de insectos, anfípodos de la familia Talitridae e isópodos de la familia Tylidae.

En el estudio del sustrato **sedimentario infralitoral**, está presente una comunidad faunística relativamente pobre en cuanto a densidad y variación específica. Esto ha sido descrito en sedimentos similares en situaciones de normalidad en diversos puntos de las costas gallegas y peninsulares.

La presencia de grupos sensibles a la contaminación por hidrocarburos, como los crustáceos anfípodos, en los sedimentos en los que se detectó visualmente la presencia de fuel, parece sugerir que el impacto de éste sobre la macrofauna en los fondos estudiados no ha tenido una relevancia aparente.

Hay que señalar que los sedimentos no mostraron una toxicidad alta, ya que transcurrieron 6 meses desde la marea negra hasta la recogida de muestras, y que se trata de arena donde el tiempo de residencia de los hidrocarburos es menor si se compara con los sedimentos finos.

Impacto sobre especies comerciales

Las poblaciones de las tres especies comerciales (percebe, mejillón y erizo) estudiadas se encuentran afectadas en diverso grado, y a distintos niveles, principalmente de forma subletal en el caso de *Mytilus edulis* y de *Pollicipes pollicipes*. Experimentos realizados en laboratorio demuestran que la respuesta inmune de mejillones expuestos al vertido es inferior a la de los no expuestos.

El reclutamiento de la semilla de mejillón podría haberse visto reducido. En el caso del erizo de mar, se ha constatado la desaparición casi total de ejemplares de *Paracentrotus lividus* en áreas afectadas.

En general, los niveles de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) en organismos son muy superiores en la zona intermareal con relación a la infralitoral y están concentrados en los niveles más bajos de la cadena trófica (fundamentalmente herbívoros y suspensívoros).

Otro aspecto a señalar es que uno de los parámetros analizados, el factor de condición, no parece reflejar cambios debidos al vertido del *Prestige*.

La confirmación de las tendencias observadas sobre el efecto del vertido sólo será posible con un seguimiento durante los próximos años.

No hay que olvidar la gran variabilidad biológica de los recursos vivos marinos. No es lo mismo estudiar especies sésiles (percebe, mejillón) que especies móviles, entre las que a su vez cabe distinguir aquellas que efectúan desplazamientos relativamente cortos (pulpo, nécora, centolla, erizos) de otras que recorren grandes distancias (sardina, merluza). Tampoco es igual analizar lo que ha ocurrido en una especie pelágica y en otra bentónica. Incluso dentro de las especies pertenecientes a un mismo ecosistema, hay que distinguir entre aquellas que tienen fases larvarias planctónicas y las que carecen de ellas. Del mismo modo, no se puede equiparar el tratamiento de especies de vida breve (pulpo, calamar, sardina), al propio de otras cuya esperanza de vida sobrepasa los cinco años (merluza, rape). Ni menos aún se puede mezclar el estudio de especies cuya biomasa se renueva anualmente (cefalópodos), con el de otras cuya estructura demográfica está constituida por individuos de varios grupos de edad.

Ni siquiera en un espacio tan reducido en términos relativos como el de Galicia, con 1.150 kilómetros de costa, se puede estudiar el impacto en los recursos naturales del *Prestige* sin tener en cuenta las diferencias entre distintas áreas. El vertido no fue



Figura 1. Dos aspectos de la costa del Parque Nacional de las Illas Cies en diciembre del año 2003 y en julio del año 2004.



Figura 2. Fuel en la playa de Cantareiras del Parque Nacional de las Illas Cies en diciembre del año 2003 y aspecto de la misma en julio del año 2004.

homogéneo, hay zonas muy afectadas y otras sin apenas daño, por no incidir en que las características oceanográficas y ecológicas varían considerablemente de un lugar a otro.

Las poblaciones de recursos vivos marinos muestran variaciones naturales de su abundancia, generalmente ligadas a modificaciones en el éxito de su reclutamiento, muy relacionadas a su vez con variaciones en las condiciones medioambientales, que pueden ser favorables o desfavorables. Es por ello esencial tener en cuenta largas series históricas de datos de capturas y esfuerzos pesqueros, que permitan distinguir entre variaciones naturales y variaciones que pueden haber sido provocadas por cualquier agente contaminante.

Todo lo expuesto hasta ahora explica por qué un trabajo científico riguroso requiere un gran número de datos fidedignos, así como tiempo y sosiego suficientes para su elaboración, hasta conseguir resultados contrastados. Se comprende que esta aparente parsimonia de la ciencia contraste con la exigencia de algunos sectores sociales por tener resultados cuanto antes, pero la realidad en lo referente al estudio de la dinámica de las poblaciones explotadas es así, y no de otra manera.

Esto no significa, ni mucho menos, que la ciencia se mantenga mientras tanto de brazos cruzados. Entre las diferentes acciones puestas en marcha desde el CSIC para comprender y disminuir el impacto negativo del accidente cabe destacar dos, por lo que tienen de aplicación de conocimientos científicos, en apariencia de investigación básica, a la resolución inmediata de problemas reales. Una de estas respuestas ha servido para identificar el origen de los vertidos en alta mar y conocer su potencial toxicidad. La otra, está permitiendo finalizar el proceso de limpieza del vertido mediante un método respetuoso con el medio ambiente, fomentando el crecimiento de bacterias autóctonas que degradan el fuel.

IMPACTO DE VERTIDOS DE PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS. ACCIDENTES ANTERIORES: *AEGEAN SEA* Y *EXXON VALDEZ*

Aegean Sea

Las investigaciones realizadas tras el vertido del *Aegean Sea* en las costas de A Coruña mostraron una rápida acumulación de hidrocarburos aromáticos policíclicos en los bivalvos, organismos filtradores, aunque esta acumulación es reversible, ya que son excretados cuando la contaminación del medio desciende o desaparece. Sin embargo estos hidrocarburos no se acumulan en vertebrados (peces, aves, etc.), que son capaces de metabolizarlos y excretarlos. Los crustáceos tienen también un sistema enzimático más eficiente que el de los bivalvos para metabolizar estos hidrocarburos y presentan menores niveles de acumulación. Sin embargo, en sus fases iniciales del desarrollo, estos organismos pueden ser proclives a experimentar efectos tóxicos (peroxidación de lípidos, carcinogénesis, alteraciones del sistema inmune y otras patologías).

En el caso del *Aegean Sea*, los máximos de concentración (1200-2400 ng/g en peso seco de mejillón) en las zonas directamente afectadas por el vertido se detectaron a los tres meses del vertido, mientras que a los seis meses, las concentraciones habían descendido considerablemente, hasta niveles comprendidos entre 200 y 300 ng/g en peso seco. A los nueve meses, los niveles eran del mismo orden que los que se observaron tres años después del vertido.

Exxon Valdez

Diez años después del derrame de petróleo del *Exxon Valdez*, es evidente que muchas especies afectadas no se han recuperado totalmente. Sin embargo, es menos evidente el papel que la contaminación causada por el petróleo vertido juega en la dificultad que las poblaciones tienen para recuperarse. Estudios realizados tras el accidente mostraron una menor viabilidad de huevos y malformaciones en larvas de arenque de las zonas afectadas por el vertido. Se observó también una mayor incidencia de enfermedades víricas, que junto con una disminución de la producción de plancton, contribuyeron a una fuerte disminución de la población en los años siguientes al vertido.

El Consejo Asesor (Trustee Council) creado para evaluar en el tiempo el impacto del *Exxon Valdez* identificó 30 recursos o especies afectadas por el vertido. Dependiendo de su situación diez años después se han clasificado en las siguientes categorías:

No se están recuperando. Son recursos que o no se han recuperado o no han mostrado mejoría desde el vertido. Entre éstas se encuentran varias especies de cormoranes, patos, otras aves, la foca y el arenque del Pacífico. Los daños a los habitats que habitualmente utilizan estas especies así como la desaparición o disminución de la abundancia de sus presas habituales han imposibilitado su recuperación.

Recuperándose. Son recursos que están alcanzando los niveles anterior al vertido. Entre estas se encuentran los sedimentos, varias especies de moluscos bivalvos (almejas, mejillones), comunidades intermareales, la orca y la nutria marina.

Recuperados. Se ha alcanzado la situación anterior al vertido. La especie son el águila americana, el ostrero negro, una especie de alca, la nutria de río, dos especies de salmón del Pacífico.

Recuperación desconocida. Los datos anteriores al vertido que existían sobre estas especies no permiten establecer conclusiones. Entre éstas se encuentran algunos peces, aves exclusivas de Alaska y las comunidades sublitorales. Por lo general son especies poco abundantes y poco estudiadas.

Uso humano. Las actividades humanas que dependían de los recursos naturales fueron dañadas por el vertido. En general se están recuperando sin haber alcanzado su nivel anterior al vertido. Entre éstas se cuentan la pesca comercial, el turismo y la subsistencia de las poblaciones litorales.

Muchos recursos todavía no se han recuperado totalmente del vertido. Las poblaciones litorales que dependían de estos recursos se quejan de la escasez de los mismos



Figura 3. Fijación de juveniles de mejillón en el Parque Nacional de las Illas Cies en julio del año 2004

y esta impresión ha sido corroborada por estudios científicos financiados por el Consejo asesor (Trustee Council).

Ciertamente, no pueden extrapolarse estos resultados, y esperar el mismo tipo de efectos en otras especies y escenarios; pero hay que tener en cuenta que huevos y fases larvianas, independientemente de que sean pelágicas o bentónicas, son más sensibles a la exposición a compuestos tóxicos, que los organismos adultos.

Finalmente, y en base a las investigaciones realizadas tras otros accidentes de estas características, es preciso señalar que, a largo plazo, es extremadamente difícil distinguir entre lo que son posibles efectos del vertido de los causados por la contaminación de distinto origen que ya sufren los ecosistemas marinos, o por otras alteraciones del hábitat litoral.

CRITERIOS A EMPLEAR EN ACCIONES DE LIMPIEZA POSTERIORES A VERTIDOS DE PETRÓLEO Y SUS DERIVADOS EN ECOSISTEMAS MARINOS

Un vertido accidental de petróleo en el mar, a pesar de su espectacularidad e impactos ecológico y socioeconómico, es un proceso reversible que la propia naturaleza, tarde o temprano, se encargará de restaurar. La intervención humana debe ir encaminada, por tanto, a facilitar estos procesos, intentando no causar más daños al ecosistema que los que ya ha causado el vertido.

A pesar de la presión de la opinión pública para acelerar las labores de limpieza, un primer criterio básico es el de **no precipitarse en la toma de decisiones**. El proceso de restauración es un proceso lento y si por esperar unos días más, se toma la medida adecuada y se evita un daño mayor (típico resultado de medidas precipitadas), bienvenido sea el retraso.

El objetivo prioritario de la operación de limpieza ha de ser la **seguridad de las personas** que trabajan en ella. Esta seguridad debe centrarse, fundamentalmente, en evitar resbalones, tropiezos y caídas. Las medidas de protección personal para evitar el contacto directo y continuado con el fuel ya han sido descritas en otros informes. A este respecto, conviene señalar que, con el paso del tiempo, el fuel que está en la costa ha envejecido y ha perdido la práctica totalidad de los componentes volátiles peligrosos.

Un tercer aspecto a considerar es el de la **minimización de residuos** relacionados con la operación de limpieza, tanto del propio producto recogido como de los trajes y herramientas empleadas en la recogida. Conviene establecer las estrategias de reducción de estos residuos, así como de descontaminación, y reutilización o eliminación de los mismos, cuando sea necesario. La excavación de balsas para depositar el fuel u otros residuos no es aconsejable, salvo de forma transitoria y una vez asegurada la no existencia de impacto en la capa freática. Hay que tener en cuenta que el terreno afectado deberá luego ser sometido a una tarea de limpieza. En las operaciones de limpieza, deberá evitarse también esparcir o enterrar los residuos de forma involuntaria.

Desde el hundimiento del *Torrey Canyon*, y de forma general, siempre se ha considerado que la mejor manera de conseguir una recuperación rápida del ecosistema era la recogida manual del fuel, por pesada y laboriosa que resulte.

En el caso del *Exxon Valdez* (un caso extremo por las condiciones ambientales) la limpieza requirió años, y el último «lavado» del litoral rocoso se hizo con ayuda de agua caliente a presión. En algunos lugares, se aplicaron procesos de biorremediación que tuvieron una eficacia relativa ya que siempre quedan residuos (p. ej. asfaltos) que las bacterias no son capaces de degradar.

ACCIONES DE LIMPIEZA Y REPOBLACIÓN (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE E INICIATIVAS PRIVADAS)

En la actualidad hay en marcha y financiadas tanto por fondos públicos como privados una serie de acciones encaminadas a acelerar la limpieza y la repoblación de zonas del litoral afectadas por la contaminación del fuel oil del *Prestige*.

Entre los objetivos se cuentan:

Eliminar la contaminación por petróleo en una zona preestablecida del *Parque Nacional das Illas Atlánticas* que incluya sustratos tanto rocosos como arenosos, y recuperar la estructura de la comunidad biológica previa al accidente del *Prestige*.

Utilizar los resultados para definir un protocolo de actuación transferible a contingencias semejantes y, si procede, iniciar la creación de un banco de especies petro-leolíticas con utilidad real (no sólo la potencial demostrada en cultivos convencionales de laboratorio) en tareas de biorremediación.

La acciones a realizar son:

Hidrolimpieza a presión y temperatura compatibles con la conservación de la vida adherida al sustrato.

Biorremediación, o adición de fertilizantes que equilibren el exceso de carbono aportado al medio por el petróleo, facilitando su degradación por la microbiota petro-leolítica. Dicha microbiota puede limitarse a la que coloniza espontáneamente el espacio afectado, o reforzarse con siembras procedentes de cultivos masivos preparados *ad hoc* con recursos muy simples. A su vez, el refuerzo puede contener únicamente especies autóctonas o incluir alóctonas que cumplan las siguientes restricciones: 1) no modificadas genéticamente, 2) no fotosintéticas, 3) no parásitas, 4) no productoras de esporas u otras formas de resistencia.

La biorremediación es aplicable a roquedos, así como a sustratos arenosos una vez agotada la eficacia de los métodos de recogida. En este último caso es posible que, aún aparentemente limpia, la arena contenga restos no detectables visualmente de los hidrocarburos más persistentes (poliaromáticos), con efectos nocivos aún a niveles sólo detectables por métodos analíticos finos.

Repoblación, que puede llevarse a cabo con dos diferentes objetivos:

Como variante de la biorremediación o en paralelo con ella, puede implicar la dispersión de especies aptas para absorber los residuos de los métodos de hidrolava-

do o las posibles escorrentías de la biorremediación. Potentes filtradores como el mejillón, o sedimentívoros de conocida resistencia a la contaminación por petróleo, como los poliquetos, constituyen las opciones más adecuadas a este respecto.

Como repoblación en sentido estricto, es decir como recurso para acelerar la recuperación de la estructura biótica de los sustratos afectados. Puede implicar desde la dispersión de propágulos vegetales (las algas bentónicas resultan, en general, poco afectadas por el petróleo) que proporcionen la adecuada heterogeneidad espacial, hasta el dragado de sedimentos de zonas libres de impacto y traslado a las áreas objetivo.

REFERENCIAS

- Información sobre Acciones Urgentes. Primeros proyectos de investigación financiados por la Acción Estratégica que se están realizando tras el vertido del *Prestige*.
<http://otvm.uvigo.es/invesprestige.html>
- Informe Técnico CSIC 'Prestige' Número 15 Impacto de un vertido de petróleo sobre los organismos marinos. Algunas lecciones del vertido del *Aegean Sea*. <http://csicprestige.iim.csic.es/>
- Programa de intervención científica en relación con el vertido y hundimiento del buque *Prestige*. Ministerio de Ciencia y Tecnología. <http://otvm.uvigo.es/invesprestige.html>
- Status of Injured Resources and Services adopted August 6, 2002 by the *Exxon Valdez* Trustee Council. <http://www.oilspill.state.ak.us/facts/status.html>.
- Xunta de Galicia. Información sobre o vertido provocado polo petroleiro *PRESTIGE*
<http://www.cmmm-prestige.cesga.es/>

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto del MEC VEN-2003-20068-C05-01.

SEGUIMIENTO DEL IMPACTO DE LOS VERTIDOS DEL *PRESTIGE* SOBRE LAS COMUNIDADES DE PLATAFORMA Y SUS RECURSOS

DR. FRANCISCO SÁNCHEZ

Una serie de circunstancias medioambientales y un conjunto de hechos acaecidos como consecuencia de la catástrofe del petrolero *Prestige* dieron lugar a un particular escenario de importantes consecuencias para el ecosistema marino. Primero, durante las maniobras de remolque lejos de la costa (13-18 de Noviembre de 2002) y posteriormente durante su rotura y hundimiento a 250 millas de la misma (19 de Noviembre), se vertieron grandes cantidades de fuel-oil pesado (tipo M-100) en aguas sobre la plataforma continental de Galicia y zona oceánica. Durante los meses posteriores a esta fase aguda de la catástrofe, un importante contingente de manchas de fuel estuvieron derivando en la superficie del mar, sometidos a los avatares de vientos y corrientes, alcanzando una gran amplitud geográfica, que incluye a toda la región Norte de la Península Ibérica y al Golfo de Vizcaya, afectando tanto a la zona litoral como a la plataforma continental y zona oceánica.

La confirmación del hundimiento del fuel y sus derivados a través de la columna de agua y su sedimentación sobre los fondos de la plataforma continental provocó la necesidad de acometer estudios dirigidos a conocer sus efectos sobre este ecosistema marino. El Instituto Español de Oceanografía, en colaboración con el CSIC (Instituto de Investigaciones Marinas de Vigo y el Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona) y la Secretaría General de Pesca Marítima, puso en marcha una serie de estudios multidisciplinarios cuyo objetivo general fue realizar una estimación del impacto sobre las principales comunidades de fondo, las cuales están sometidas a una explotación pesquera considerable y sostienen la economía de numerosas localidades costeras de Galicia y mar Cantábrico.

A finales del año 2002 y durante todo el 2003 y 2004 se realizaron una serie de campañas multidisciplinarias a bordo de los B/O *Cornide de Saavedra* (IEO) y *Vizconde de Eza* (SGPM), en distintas épocas del año y que cubrieron una gran parte de los fondos comprendidos entre los 30 y 500 m de profundidad. Se utilizaron toda una serie de diferentes sistemas de muestreo dirigidos a obtener gran cantidad de información y muestras biológicas para diferentes análisis en las fases inmediatamente posteriores a la catástrofe y su posterior seguimiento en el tiempo.

DISTRIBUCIÓN DEL FUEL Y SUS DERIVADOS SOBRE EL FONDO DE LA PLATAFORMA

Durante la primera campaña, efectuada en diciembre de 2002, y utilizando un sistema de muestreo dirigido a cuantificar pequeños organismos que viven sobre el fondo (un bou de vara de 3.5 m), se pudo confirmar la presencia de fuel en un amplio espectro de profundidades. Este fuel pesado, apareció formando aglomeraciones (las llamadas «galletas») con tamaños comprendidos entre 1 y 15 cm de diámetro. Las mayores concentraciones (mas de 300 kg por km²) se dieron en la plataforma situada frente a la Costa da Morte y en profundidades de 100-200 m (Figura 1). Según los análisis efectuados por el IIQAB-CSIC de Barcelona, este fuel presenta una «huella digital» que indica una escasa o nula permanencia en la superficie del mar. Ello permite suponer que esta distribución obedece principalmente a un fuel de mayor densidad que sedimentó en los primeros días del accidente, y no por degradación y emulsión de las sucesivas mareas negras que llegaron a la costa. Es por ello, por lo que su localización coincide en gran manera con la deriva del barco durante las maniobras de remolque sobre la plataforma antes de su hundimiento y también por la ausencia de fuel sedimentado en la plataforma frente a las Rias Baixas, a pesar de que su costa si recibió importantes mareas negras.

La campaña de abril de 2003 ofreció un patrón de distribución similar al obtenido en invierno (Figura 1), con un ligero desplazamiento hacia el norte en consonancia con las corrientes imperantes en la zona durante la época invernal. La progresiva disminución de las concentraciones de fuel en la plataforma de Galicia, que se puso mas en evidencia en el otoño del 2003 y la primavera del 2004, es debido probablemente a que está siendo cubierto por los procesos naturales de acumulación de sedimentos y a que no se han repetido nuevos eventos de aportación de fuel sobre el fondo. De cualquier forma no hay que olvidar que durante una campaña realizada en marzo de 2003 en el mar Cantábrico se pudo determinar la presencia de fuel sedimentado en su plataforma, con una mayor incidencia en la región oriental (Cantabria y País Vasco), lo que es significativo de la magnitud de la catástrofe. El origen del fuel sedimentado en el Cantábrico está en la deriva y posterior sedimentación por pérdida de elementos mas ligeros y emulsión con el agua, de las manchas arrastradas por la Corriente de Navidad y vientos dominantes a finales de diciembre y enero. En la plataforma situada entre las verticales del cabo de Estaca de Bares y el cabo de Peñas no ha aparecido fuel debido a que las trayectorias de las manchas que entraron en el

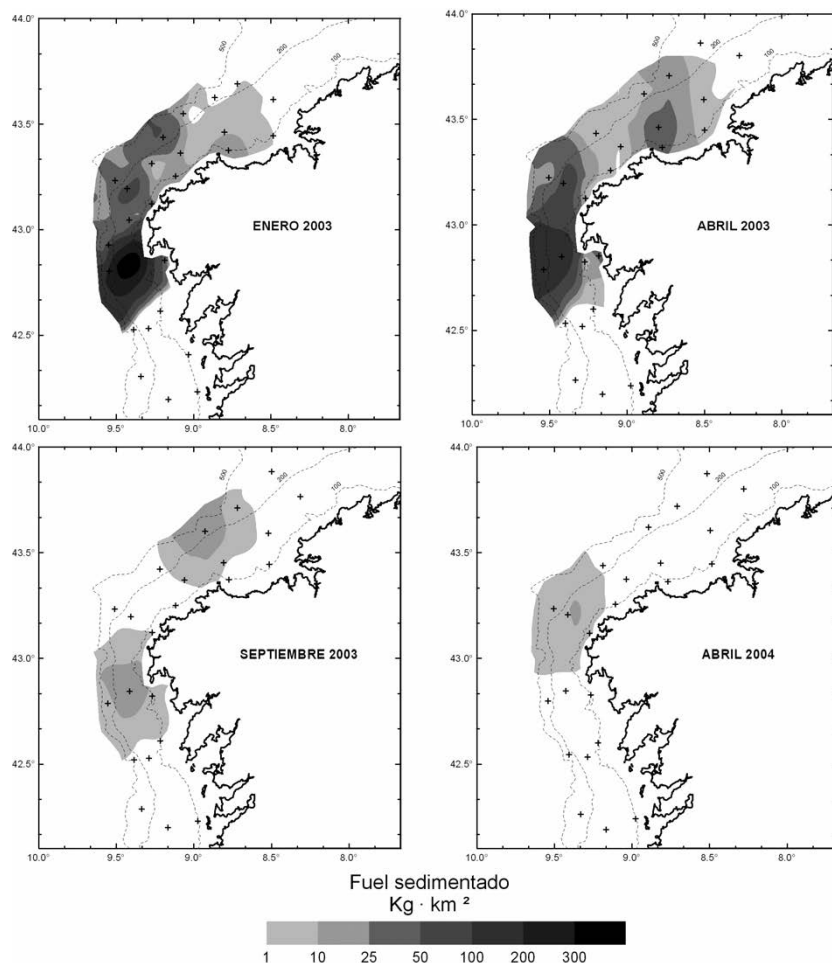


Figura 1. Concentraciones de fuel sedimentado ($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$) en la plataforma de Galicia a partir de los datos proporcionados por un bou de vara en cuatro sucesivas campañas.

Golfo de Vizcaya se situaron lejos de la misma. Posteriormente, vientos de componente NW empujaron las manchas de fuel hacia la zona oriental del Cantábrico.

Como resumen, las principales conclusiones obtenidas hasta la fecha en relación a la presencia de fuel sobre el fondo de la plataforma son:

- Las mayores concentraciones de fuel sedimentado se encontraron en invierno del 2003, entre 100 y 200 m de profundidad frente a Finisterre: $300 \text{ kg} / \text{km}^2$
- La zona mas afectada es la plataforma de Galicia situada entre Muros y Malpica (frente a la Costa da Morte).

- El fuel sedimentado aparece en forma de agregados de tamaños comprendidos entre 1 y 15 cm.
- En primavera ha disminuido ligeramente la concentración frente a Finisterre pero ha aparecido fuel en la plataforma del mar Cantábrico, estando mas afectada su región oriental.
- La región comprendida entre el cabo de Estaca de Bares y el cabo Peñas no muestra presencia de fuel.
- El fuel se encuentra semienterrado en el sedimento dado que es poco accesible al arrastre de baca y a los sistemas visuales directos.

Hay que resaltar que en realidad las cantidades encontradas no son alarmantemente altas, ya que las mayores concentraciones del invierno del 2003 equivaldrían a unas 10 galletas de 10 cm repartidas por toda la superficie de un campo de fútbol. Sin embargo, la presencia de fuel en el fondo sí influyó sobre la operatividad de los artes de pesca, particularmente el arrastre. Por ello, toda la información obtenida durante estas campañas tuvo especial trascendencia para la correcta aplicación de medidas de gestión (zonas cerradas) dirigidas a evitar el petroleado de las capturas.

El tamaño y composición de las galletas de fuel pesado encontrado en los fondos de la plataforma indican una biodisponibilidad relativamente baja, es decir que sus efectos sobre los seres vivos no deberían de ser destacables. Sin embargo, su presencia implica que tuvo que haber hidrocarburos procedentes de la superficie en la columna de agua, ya sea en agregados de baja biodisponibilidad o bien en forma de pequeñas partículas. Este componente mas peligroso debió estar constituido tanto por productos de degradación del fuel como por organismos planctónicos muertos y/o aglutinados, si bien no ha podido ser cuantificado ya que no se realizaron campañas específicas para ello. Los estudios sobre los niveles de los peligrosos hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) en sedimentos de la plataforma realizados pocos meses después de la catástrofe mostraron una distribución espacial de los mismos que reflejaba más un estado crónico asociado a actividades portuarias que a los propios efectos del *Prestige*. Sin embargo, durante nuestros muestreos de pequeños organismos que viven nadando cerca del fondo (el llamado suprabentos), utilizando un trineo dotado de malla de 0.5 mm, se observaron pequeñas gotas de fuel tanto en ejemplares de anfípodos, como en las redes. Esta hipótesis del aporte de fuel al fondo de la plataforma en forma de pequeñas partículas también se ve apoyada por haberse encontrado organismos planctónicos con fuel en el exoesqueleto y en el interior del cuerpo, en aguas frente a La Coruña en noviembre de 2002.

EL ECOSISTEMA DE LA PLATAFORMA CONTINENTAL

La plataforma continental constituye la región sumergida próxima a la costa que abarca desde el litoral hasta el perfil del talud continental. Sus profundidades alcanzan hasta los 300-400 m y a partir de aquí, los fondos se precipitan mediante la fuerte pendiente del talud (llamado cantil por los pescadores) hacia la llanura abisal

(4000-5000 m de profundidad). El borde de la plataforma continental se encuentra a unos 75 km de la costa en el caso de Galicia Norte y a tan solo a 10 km frente a Cabo Ajo en Cantabria, y su superficie en el Norte de España es de unos 30 000 km².

En sentido general, las aguas situadas sobre la plataforma continental forman parte de lo que se denomina el ecosistema nerítico. En comparación con las aguas oceánicas próximas es mucho mas rico y diverso en cuanto a especies y las interrelaciones entre las mismas son mas complejas. Al mismo tiempo dispone de una mayor biomasa, debido a los diferentes sistemas de producción que le caracterizan (aportes de nutrientes por afloramientos y ríos), por lo que aquí se asientan las principales pesquerías. Un esquema resumido de las principales interacciones tróficas en el ecosistema de las plataformas de Galicia y Mar Cantábrico se muestra en la Figura 2. El dominio pelágico engloba aquellas especies que nadan entre dos aguas y normalmente cerca de la superficie. La cadena trófica comienza en la producción primaria (el fitoplancton) y se canaliza a través de los organismos zooplanctónicos y los pequeños peces pelágicos (sardina y anchoa) hasta los bonitos y atunes que constituyen

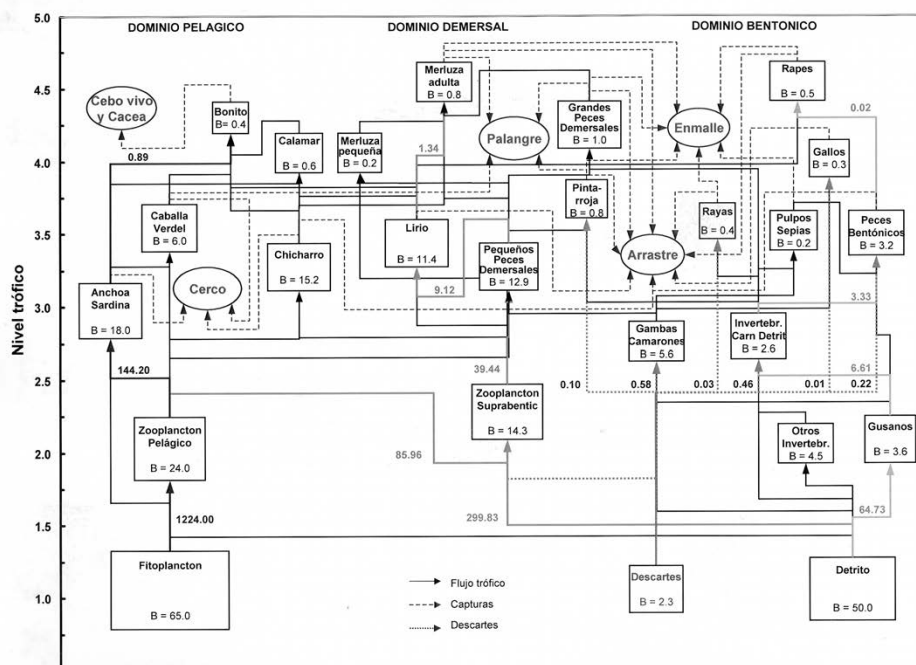


Figura 2. Principales interacciones tróficas en el ecosistema de las plataformas de Galicia y mar Cantábrico. Los grupos de organismos y las pesquerías están ordenados en el eje vertical en función de su nivel trófico y en el eje horizontal según su pertenencia a los dominios pelágico, demersal o bentónico

los predadores pelágicos apicales. En el dominio demersal se encuentran aquellas especies que si bien nadan entre dos aguas dependen del fondo para su alimentación. Aquí se encuentran especies tan importantes como el lírio o su depredador la merluza. Por último, el dominio bentónico es el mas complejo y depende en primera instancia de la «lluvia» de partículas orgánicas (detrito) que procede de la productiva superficie bien iluminada. Aquí habitan especies fijas en el fondo (sésiles, como los corales) o que se desplazan sobre él (como los cangrejos o las cigalas). Algunas viven enterradas (como gusanos y moluscos) y otras nadan en sus proximidades (suprabentos, gambas). El rape es el predador apical de las comunidades bentónicas de Galicia y mar Cantábrico. Estas comunidades son mas estables en el tiempo que las pelágicas al no ser tan dependientes de los ciclos estacionales de producción primaria ni de las migraciones de muchas especies. Las diferentes pesquerías están especializadas en cada uno de los tres dominios y forman parte del ecosistema, actuando como si fueran predadores aplicando mortalidad sobre sus especies objetivo y aportando alimento a las especies carroñeras mediante sus descartes (Figura 2). Dado que las pesquerías llevan actuando durante mucho tiempo en la zona, el ecosistema de la plataforma se encuentra profundamente modulado por las mismas y su estado actual es probablemente muy distinto que el que pudo tener hace un siglo.

Los diferentes estudios realizados sobre los niveles de hidrocarburos presentes en la columna de agua sobre la plataforma durante la fase aguda de la catástrofe indicaron valores inferiores a lo esperado, dada la magnitud del vertido, probablemente debido a las características físico-químicas del pesado oil derramado. También es posible que por esta misma razón tampoco se detectaran efectos importantes sobre las comunidades planctónicas, a pesar de que éstas son buenas indicadoras de impactos por hidrocarburos. Estos hechos hacen suponer que los posibles efectos subletales inmediatos, debidos al stress oxidativo producido por los PAHs a través de las branquias, tampoco hayan afectado gravemente a las especies de plataforma y por ello se haya estimado más conveniente en nuestros estudios seguir los efectos acumulativos a medio y largo plazo a través de la red trófica que se inicia partiendo de los organismos suspensivos y detritívoros de las comunidades de fondo. La ingestión de hidrocarburos, en particular los PAHs, en estos organismos puede ser que no cause efectos letales (si la dosis no es alta) pero si alteraciones genéticas, bioquímicas o fisiológicas que pueden reducir su viabilidad y eficacia biológica.

LAS COMUNIDADES DE FONDO DE LA PLATAFORMA

En el tema que nos ocupa, las especies mas vulnerables son aquellas que tienen una menor movilidad y en cuyo hábitat puede permanecer mas tiempo la presencia de hidrocarburos y por tanto estar sometidos a efectos crónicos y a los procesos de bioacumulación. Ello hace que las especies demersales y particularmente las bentónicas exijan un mayor seguimiento de lo ocurrido en sus poblaciones con motivo de la catástrofe del *Prestige*. Al mismo tiempo, los hidrocarburos tienen mayor afinidad por los sedimentos con alto contenido en materia orgánica que por los fondos de

arena o roca. Debido a su gran productividad, la plataforma de Galicia tiene un porcentaje importante de fondos fangosos, lo que implica un potencial peligro de entrada de contaminantes a través de la red trófica de los organismos bentónicos que allí habitan, alcanzando en última instancia a las especies de interés comercial, de mayor nivel trófico.

La presencia de hidrocarburos en el fondo puede producir numerosos impactos sobre las comunidades bentónicas y demersales, tanto directos en forma de intoxicación y mortalidad, como indirectos a través de cambios en los flujos de biomasa a través de la red trófica. Los primeros afectados son los organismos suspensívoros (que se alimentan filtrando la lluvia de partículas) y detritívoros (que se alimentan filtrando el sedimento), base de la cadena trófica de las comunidades allí presentes. La mayor parte de la producción procedente del detritus que sedimenta se canaliza hacia los niveles tróficos superiores a través del plancton suprabentónico, los pequeños crustáceos y los gusanos poliquetos. El siguiente eslabón afectado en la cadena trófica son los organismos planctófagos y bentófagos. Por último, y a más largo plazo es previsible que los efectos alcancen a los peces ictiófagos. Muchas de estas especies y en diferentes niveles tróficos, como la cigala, bacaladilla, gallos, merluza y rapes, etc., tienen extraordinaria importancia comercial y forman parte del consumo humano, constituyendo una de las principales bases que sostienen la economía de Galicia y mar Cantábrico.

Teniendo en cuenta todo lo antedicho, es evidente que para poder interpretar si los efectos observados en las poblaciones de especies de interés comercial con posterioridad al accidente del *Prestige* son debidos al impacto de los hidrocarburos o a otras causas (medioambientales, variabilidad natural, efectos de las pesquerías, etc.) era necesario realizar el seguimiento de lo acontecido en los principales compartimentos que estructuran el ecosistema. Para ello se diseñó una red de estaciones de muestreo en fondos sedimentarios de la plataforma continental de Galicia, situados en profundidades entre 50 y 500 m, en las cuales se utilizarían diferentes sistemas de muestreo que permitieran cubrir de forma complementaria la mayor parte de las comunidades existentes. Las campañas se realizaron en las dos épocas críticas que caracterizan al ecosistema de plataforma: la primavera (época de aumento de la producción primaria y procesos de reproducción y crecimiento en las principales especies), a bordo del B/O *Vizconde de Eza* y el otoño (fase de mezcla de aguas y procesos de reclutamiento), a bordo del B/O *Cornide de Saavedra*. Durante estas campañas, debido a su carácter multidisciplinar, se pusieron a prueba toda la capacidad, tanto de tripulaciones como de científicos, de poder llevar a cabo muestreos con sistemas de características y requerimientos muy diferentes. Ello supuso todo un desafío de logística y aprovechamiento del tiempo disponible de buque que no se habían dado con anterioridad y por tanto pueden ser consideradas como pioneras en la zona.

Durante las campañas, las estaciones de muestreo estaban dispuestas en radiales y situadas en cinco sectores geográficos y cuatro estratos de profundidad (35–70, 71–120, 121–200 y 201–500 metros) que se corresponden con los de la serie histórica de campañas de arrastre del IEO (Figura 3). En cada una de las estaciones se realizaron los siguientes muestreos:

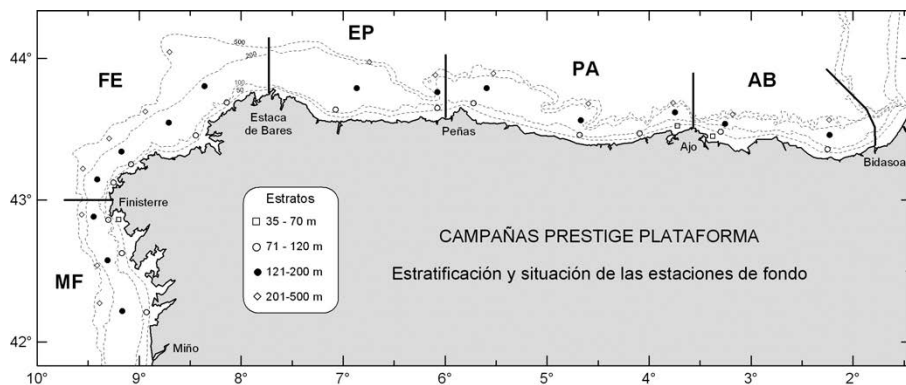


Figura 3. Diseño del muestreo de las campañas multidisciplinares para el estudio de las comunidades de fondo de la plataforma continental de Galicia y mar Cantábrico.

- Draga de fango (granulometría y endofauna, sólo en Galicia).
- Arrastre con trineo suprabentónico (solo en Galicia).
- Arrastre de bou de vara (epibentos, Galicia y Cantábrico).
- Arrastre de baca (megafauna, Galicia y Cantábrico).
- Arrastre con trineo de fotogrametría digital (sólo en determinadas zonas).

Para el estudio de los pequeños organismos que viven enterrados en el fondo y que constituyen las denominadas comunidades infaunales o endofauna, se utilizaron muestreos con draga de fango (*box corer*). Como ya dijimos antes, dado que los hidrocarburos solamente se acumulan en los sedimentos fangosos, el estudio de estos organismos, en su mayor parte detritívoros, es muy importante ya que son los primeros indicadores del posible impacto de los vertidos sobre la plataforma. Los primeros resultados de estos estudios indican una relativa baja abundancia infaunal que es característica de las comunidades de plataforma de esta zona en periodo invernal. El inventario de especies con los que se está trabajando asciende a 159 las cuales pertenecen principalmente a los grupos de los gusanos poliquetos, moluscos y crustáceos. Debemos resaltar que en todas las muestras obtenidas no se ha detectado visualmente la presencia de fuel o de iridisaciones típicas de la contaminación por hidrocarburos.

El estudio cuantitativo de la fauna (principalmente pequeños crustáceos) que vive en la capa de agua inmediatamente adyacente al fondo y que constituyen las comunidades suprabentónicas se realizó mediante un trineo suprabentónico, diseñado en el laboratorio del IEO de La Coruña. Se muestrearon las tres estaciones situadas en el transecto frente a la Ría de La Coruña. Se han recolectado hasta la fecha un total de 136 especies diferentes distribuidas en 9 grupos zoológicos. El tipo de comunidades encontradas presenta una estructura similar a las de otras zonas de plataforma continental del NE Atlántico. Como se puede ver en la Figura 2, estos organismos constituyen el principal flujo de biomasa hacia el dominio demersal y especies tan

importantes como el lírio se alimenta de ellos. En dos estaciones realizadas en invierno se encontraron pequeños residuos de fuel en los colectores (partículas de 2 a 3 mm), aunque hasta la fecha no se han detectado impactos sobre estas comunidades, que suelen ser buenas indicadoras de la presencia de hidrocarburos en el medio.

Para el estudio de los pequeños organismos que viven sobre el fondo, y que constituyen las comunidades epifaunales, se utilizan los datos procedentes del muestreo con un bou de vara de 3.5 m diseñado en el IEO de Santander. Este sistema de muestreo se ha mostrado muy eficiente y hasta la fecha el inventario de especies diferentes asciende a 277, pertenecientes a los grupos zoológicos de los moluscos, crustáceos y peces principalmente. Se han realizado análisis estadísticos de comparación de los valores por estación de los índices ecológicos (riqueza, biomasa, número y biodiversidad) entre invierno y primavera, para cada estrato de profundidad. Hasta la fecha no se han encontrado diferencias significativas que mostraran alteraciones importantes en la estructura de las comunidades observadas respecto a estudios precedentes realizados en la plataforma Cantábrica. Al mismo tiempo, se consideraron grupos sensibles a la contaminación por fuel como son bivalvos, gasterópodos de gran tamaño, y cangrejos de gran tamaño, equinodermos y poliquetos en los cuales se realizaron análisis de comparación entre la abundancia por estación de muestreo entre ambos periodos para cada grupo, no encontrándose diferencias significativas. Tampoco se ha detectado la dominancia de especies oportunistas como las descritas en sedimentos contaminados por hidrocarburos.

El seguimiento sobre la megafauna y especies demersales, incluyendo las de interés comercial, se está realizando mediante análisis de estaciones con arte de pesca de arrastre tipo baca. Dado que el IEO dispone de una serie de mas de 20 años de campañas realizadas con esta metodología, esto permite realizar el seguimiento con una mejor perspectiva histórica. La comparación de los índices ecológicos entre campañas por estrato de profundidad muestra un aumento global de todos ellos en la campaña de primavera del 2003 respecto a la de otoño del 2002 previa a la catástrofe, evidenciando una fuerte componente estacional. Analizando los índices por estrato, la riqueza promedio de los estratos 70-120 m y 121-200 m de la campaña de primavera es significativamente superior a la encontrada en el otoño de 2002. Por el contrario no existen diferencias significativas en la riqueza promedio entre las dos campañas en el estrato más profundo. Respecto al resto de índices, no se encontraron diferencias significativas en la biomasa, número de individuos, diversidad en peso ni diversidad en número entre campañas. Al igual que en el caso de la epifauna, se han realizado análisis sobre los cambios en la abundancia de algunos grupos de especies indicadores de impacto entre la campaña de otoño previa a la catástrofe y la de primavera del 2003. Se observaron aumentos generalizados de abundancia de todos los grupos, excepto los erizos, teniendo estos resultados un componente estacional importante.

Estos primeros análisis sirven únicamente para dar una idea general del inicio del seguimiento, que debe de ser continuado a medio y largo plazo, ya que las diferencias estacionales otoño-primavera y el corto espacio de tiempo transcurrido impiden sacar conclusiones hasta ahora sobre los posibles efectos de los vertidos procedente del *Prestige*.

VARIACIONES ESPACIO-TEMPORALES EN LA DISTRIBUCIÓN Y ABUNDANCIA DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE INTERÉS COMERCIAL

Considerando la enorme importancia que tienen las pesquerías en la zona afectada por la catástrofe del *Prestige*, se ha dirigido un especial esfuerzo en el seguimiento sobre especies de interés comercial y que en principio puedan ser mas vulnerables a sus efectos. Los criterios a tener en cuenta han sido: 1) especies de amplia distribución geográfica y con suficiente abundancia en la zona para obtener datos significativos; 2) comportamiento relacionado con una posible mayor exposición crónica a los hidrocarburos y 3) especies de las que se disponga de una buena información previa a la catástrofe para poder realizar las comparaciones entre periodos anteriores y posteriores a la situación de impacto. Las principales especies sobre las que se está haciendo un especial seguimiento son la merluza (*Merluccius merluccius*), el gallo (*Lepidorhombus boscii*) y la cigala (*Nephrops norvegicus*).

La merluza es una de las principales especies de las pesquerías de fondo de Galicia y Mar Cantábrico. Sin embargo, debido a la sobrepesca, la población de esta especie se encuentra fuera de los límites biológicos de seguridad y el nivel de biomasa de los reproductores se encuentra en niveles mínimos históricos. Ante esta alarmante situación de inestabilidad de su población, efectos subletales producidos por los hidrocarburos, como daños en su sistema inmunológico, alteraciones en su crecimiento o disminución de su potencial reproductivo podrían tener consecuencias desastrosas. Al mismo tiempo, la zona que ha sufrido un mayor impacto de los vertidos del *Prestige* coincide con la principal *nursery* del stock sur de esta especie, en donde cada otoño se reclutan un importante número de juveniles que han nacido en el año y que abandonan su vida pelágica para acercarse al fondo.

Los resultados obtenidos en las campañas anterior y posterior a la catástrofe no parecen mostrar efectos importantes sobre la distribución y abundancia de los juveniles de merluza. El índice de reclutamiento fue ligeramente mejor en la campaña del 2003 con respecto a la del 2002, previa a los vertidos, y las concentraciones frente a La Coruña en otoño del 2003 alcanzaron valores mas próximos a lo obtenido en la serie histórica que en el 2002 (Figura 4). De cualquier forma, es todavía pronto para sacar conclusiones sobre esta especie, que es la que tiene el mayor nivel trófico del dominio demersal (Figura 2), y en la cual, de producirse efectos subletales como consecuencia de los hidrocarburos, tardarán años en hacerse evidentes. El proyecto de investigación en el que estamos involucrados incluye estudios dirigidos a determinar si la presencia de hidrocarburos ha quedado reflejada en los otolitos y utilizar esta información para evaluar el efecto que la contaminación ha tenido sobre el crecimiento de los individuos. Al mismo tiempo se están realizando estudios sobre parámetros condicionantes del potencial reproductor, como son la fecundidad, los niveles de atresia, el desarrollo gonadal y la calidad de los huevos.

El gallo es una de las principales especies objetivo de la flota de arrastre que opera en la zona. Su población se encuentra a niveles de biomasa bajos pero relativa-

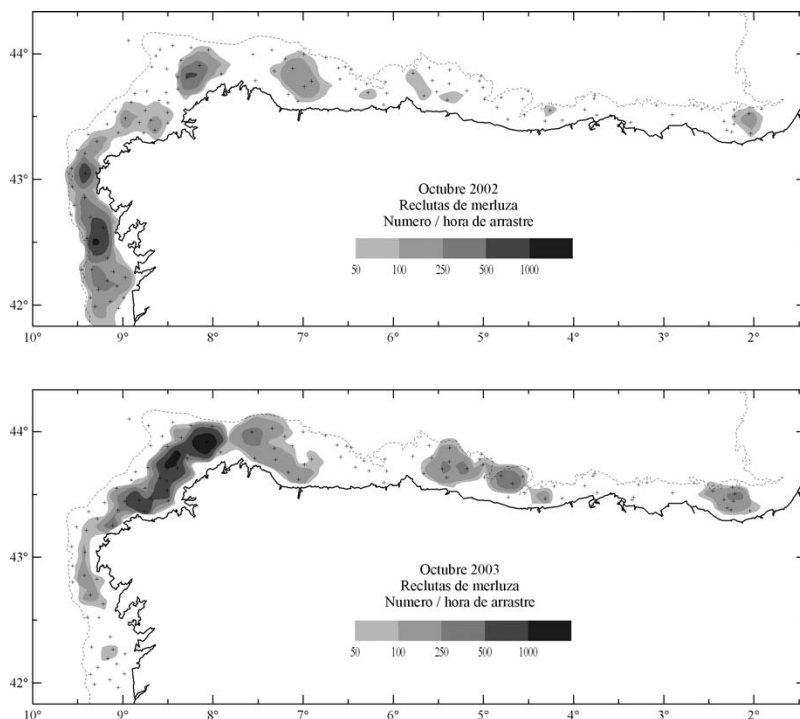


Figura 4. Distribución de las concentraciones de reclutas de merluza (número · hora de arrastre) durante las campañas de otoño anterior y posterior a la catástrofe del *Prestige*.

mente estable en los últimos años. Este pez plano habita en fondos de fango y se alimenta de organismos detritívoros, lo que le hace ser un candidato potencial a recibir impactos producidos por los hidrocarburos. La campaña de la serie histórica de otoño posterior al *Prestige* mostró un notable descenso de la abundancia de esta especie, muy por debajo de la variabilidad observada en los últimos 20 años, que no ha podido ser explicada teniendo en cuenta únicamente los parámetros de su población. Al mismo tiempo, se están realizando análisis sobre el grado de afectación de ejemplares capturados durante las campañas mediante el estudio de biomarcadores. Los primeros resultados ofrecen evidencias de efectos provocados por el *Prestige* sobre los peces analizados ya que existen correlaciones significativas entre los ejemplares más afectados y la presencia de fuel en el fondo.

La cigala se caracteriza por vivir en fondos fangosos y excavar madrigueras en donde se refugia. Este comportamiento, junto con su bajo nivel trófico, la sitúan como una especie muy vulnerable, con el agravante de que al ser un crustáceo cuenta con menores mecanismos de detoxificación que los peces. Al igual que la merluza, la población de la zona afectada por el *Prestige* se encuentra en unos niveles de biomasa muy delicados que ha llevado a iniciar drásticas medidas en la gestión de su pesquería, en un intento de recuperar la población a límites adecuados. Tanto las campañas

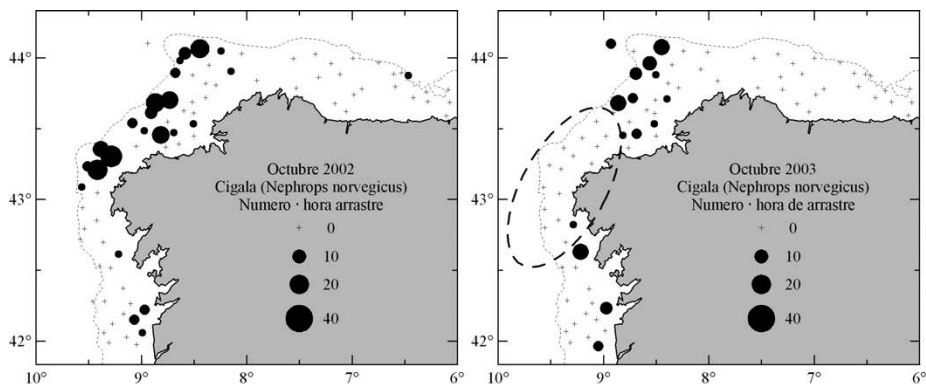


Figura 5. Distribución de la cigala (número · hora de arrastre) en la plataforma de Galicia durante las campañas de otoño anterior y posterior a la catástrofe del *Prestige*.

inmediatamente posteriores al accidente, como la de otoño del 2003 han mostrado un alarmante descenso de la abundancia de esta especie en la plataforma que mas ha sido afectada por los vertidos, frente a la Costa da Morte (Figura 5).

ECOLOGÍA TRÓFICA DE LAS PRINCIPALES ESPECIES DE PECES Y CRUSTÁCEOS

El estudio de las redes tróficas, su dinámica y modelización, es un aspecto básico para conocer cómo funcionan los sistemas ecológicos. La capacidad productiva de las especies explotadas (normalmente situadas en los niveles superiores de la cadena trófica) depende de como se optimiza la energía entre los distintos componentes (o niveles tróficos) que componen el ecosistema, siendo los posibles receptores de tóxicos acumulativos. La alteración de la comunidad bentónica puede modificar los hábitos alimenticios (tasas de repleción y dietas), y en consecuencia la dinámica del ecosistema y de los recursos. Estos aspectos están siendo evaluados en peces e invertebrados de fondo, tanto comparando con los resultados de la serie histórica de análisis de contenidos estomacales (peces) como comparando entre zonas impactadas/no impactadas (crustáceos decápodos).

En los estudios realizados hasta la fecha no se encontró fúel observable en ningún contenido estomacal de peces ni de crustáceos decápodos. Tampoco se han observado efectos destacables del vertido que hayan afectado a la composición de las dietas de los peces y crustáceos de fondo. La posible relación causal entre estos resultados y el impacto producido por el vertido del *Prestige*, es por ahora imposible de determinar debido a la variabilidad estacional y la falta de una serie histórica de comparación en el caso de los crustáceos.

IMPACTOS DIRECTOS E INDIRECTOS SOBRE LAS PRINCIPALES PESQUERÍAS

Los estudios puestos en marcha se refieren al análisis de la situación de los recursos vivos explotados por la flota litoral, antes y después del vertido y sus implicaciones en los actuales modelos de gestión. Para ello se utilizarán la descripción y caracterización de las pesquerías que se desarrollan en el área afectada antes, durante y después del vertido. Al mismo tiempo se está estudiando el efecto indirecto sobre las especies causado por las vedas espacio-temporales impuestas como consecuencia del vertido y que han supuesto alteraciones importantes del esfuerzo pesquero. Se ha puesto en marcha un especial seguimiento de la dinámica de los principales stocks, basados en los resultados de los Grupos de Trabajo de Evaluación, de aquellas especies que o por encontrarse fuera de los límites biológicos de seguridad o por ser la zona afectada área de reclutamiento, pueden verse potencialmente más afectadas por el vertido.

MODELIZACIÓN DEL IMPACTO

Los resultados de los diferentes estudios de este proyecto multidisciplinar serán integrados en un modelo trofodinámico de balance de masas que permitirá describir y seguir el posible impacto a través de la red trófica y su efecto en cascada hacia los recursos pesqueros. Al mismo tiempo puede permitir estimar la influencia del impacto indirecto causado por la disminución de la mortalidad pesquera provocada por la paralización de determinadas flotas sobre las especies objetivo. Por último, permitirá analizar el grado de alteración del ecosistema provocado por la catástrofe en referencia al modelo ya publicado del periodo anterior a la catástrofe.

Todos estos estudios siguen actualmente en curso ya que es necesario un seguimiento a medio y largo plazo debido a que las posibles consecuencias necesitarían más tiempo para extenderse a través de la red trófica y los posibles efectos subletales tardarían años en hacerse evidentes. La experiencia previa adquirida durante la marea negra producida por el petrolero *Exxon Valdez* en Alaska indica que los efectos son más duraderos que lo inicialmente previsto. Una inesperada persistencia de los tóxicos en los sedimentos y las exposiciones crónicas a los mismos por los organismos que allí habitan, han continuado afectando a la vida marina, retrasando considerablemente su recuperación. Faltan aún años de estudio para poder sacar conclusiones de cómo afectó la catástrofe del *Prestige* al ecosistema de la plataforma y a sus recursos pesqueros.

BIORREMEDIACIÓN. PSEUDOPROBLEMAS, PROBLEMAS Y UNA EXPERIENCIA

M. ANXO MURADO GARCÍA

En el contexto de caos informativo subsiguiente al siniestro del *Prestige*, pocas nociones relacionadas con la problemática de los vertidos de petróleo se libraron del vapuleo de los *mass media*, los políticos, los vendedores de remedios e –incluso– de los científicos. Y la biorremediación fue, naturalmente, una de estas nociones ahogadas en ruido. Lo que no es raro, dado que su vinculación a la actividad microbiana la rodea, en la actual cultura mediática, de la confusión suscitada por diferentes modas publicitarias: las maléficas bacterias que debemos destruir con sutiles detergentes, las benéficas bacterias que debemos ingerir para activar nuestro sistema inmunitario –quizá atrofiado–, entre otras razones, por la ausencia de contacto con las bacterias que destruimos con los detergentes. En las páginas que siguen intentaremos aportar algo de claridad al tema, discutiendo: (1) los muy simples principios de la biorremediación, (2) los resultados de un conjunto de ensayos de este recurso llevados a cabo en un roquedo supramareal de la isla de Sálvora, muy afectado por el vertido del *Prestige*, así como su ulterior extensión a otras áreas costeras, (3) los criterios para un balance del procedimiento. Nos gustaría creer que ello puede contribuir a mejorar la racionalidad de la respuesta a eventuales contingencias de este tipo –muy probables–, ciertamente, dada la realidad del transporte de petróleo por el corredor de Fisterra.

LA NOCIÓN DE BIORREMEDIACIÓN

La biorremediación –o biorreparación, con palabra menos exótica– puede definirse en general como la utilización de seres vivos para restablecer el equilibrio de los ciclos materiales en un espacio perturbado por la acción humana. Un ejemplo común sería la realización de una plantación vegetal en el espacio asolado que deja –pongamos– una cantera, actuación que acostumbramos a llamar repoblación y en la que implícitamente –debe señalarse– confiamos a la naturaleza la tarea de completar la ocupación del medio con otras entidades biológicas (desde bacterias hasta mamíferos). En un sentido más usual, la idea suele asociarse a la eliminación de contaminantes a través de procesos de bioacumulación, biodegradación, o ambos. Así un suelo contaminado por metales pesados puede biorrepararse mediante la plantación y cosecha de vegetales capaces de acumularlos en sus órganos subterráneos (e incapaces de transportarlos a los aéreos, para evitar su paso a los herbívoros), recurso que suele calificarse de fitorreparación. Con todo, la acepción más frecuente del término biorreparación alude a la potenciación de la capacidad microbiótica para la degradación de contaminantes orgánicos, por adición al espacio afectado de nutrientes auxiliares (bioestimulación o, más llanamente, fertilización), coordinada o no con la siembra de microorganismos cultivados *ad hoc* (bioaumentación o, más correctamente, biorrefuerzo). En este ámbito, el ejemplo más popular es quizá el del tratamiento de vertidos de petróleo, aquí nuestro objeto.

En primera aproximación, que luego matizaremos, la contaminación con petróleo supone una sobrecarga del medio con carbono orgánico, por lo que, si existen especies capaces de usarlo como alimento, cabría facilitarles la tarea proporcionándoles otros nutrientes que equilibrasen la dieta. Tales especies existen, conociéndose un buen número de bacterias, levaduras y microhongos que, en el laboratorio, asimilan hidrocarburos cuando se añaden a sus medios de cultivo. Por otra parte, aproximadamente desde los años 50 del siglo pasado y desde diversas fuentes, vienen ingresando (sólo en el mar) cantidades de petróleo del orden de los 5 millones de toneladas anuales, situación que hubiera sido indisimulable desde hace tiempo si el petróleo, muy resistente a los factores físicos y químicos, fuese tan poco biodegradable como, por ejemplo, los plaguicidas clorados, o los bifenilos, terfenilos y naftalenos policlorados.

Así pues, ayudar a las especies petroleolíticas equilibrando su dieta parece una idea razonable. Y como los elementos esenciales a este respecto son, para todo ser vivo, nitrógeno, fósforo y –en menor medida– hierro (otros están disponibles prácticamente en todo hábitat), el recurso más obvio es el de suministrarles estos complementos en las formas, por ejemplo, en que se encuentran en los fertilizantes agrícolas convencionales (nitratos, sales amónicas, urea, fosfatos). Dando un paso adelante, parece asimismo lógico suponer que el proceso puede acelerarse añadiendo un biorrefuerzo, esto es, sembrando al mismo tiempo alguna especie petroleolítica conocida, libre de posibles contraindicaciones.

Aquí, sin embargo, surge un problema: la degradación hasta moléculas inocuas del amplio muestrario de hidrocarburos que contiene el petróleo requiere secuencias de reacciones catalizadas por enzimas no necesariamente presentes en una única especie microbiana. De hecho, el sostenimiento de las secuencias de reacciones implicadas en una petroleolisis eficiente constituye una propiedad colectiva característica de las poblaciones microbianas complejas que se desarrollan en espacios crónicamente contaminados con petróleo, un efecto de las interacciones entre las diferentes especies que las componen. Por lo demás, estos consorcios microbianos aparecen de modo espontáneo en cualquier ambiente contaminado accidentalmente, a los pocos días del accidente. Entre otras razones porque las bacterias gozan de una sexualidad notablemente promiscua (orgiástica, dice Lynn Margulis), que permite lo que suele llamarse difusión horizontal de genes, esto es, el intercambio de material genético durante los frecuentes acoplamientos –no ligados a la reproducción– entre dos o más individuos, no necesariamente de la misma especie. De este modo, en un ambiente caracterizado por la presión selectiva que impone la presencia de petróleo, se hace muy probable que las especies capaces de acomodar información genética relacionada con la petroleolisis se hagan predominantes al cabo de unas cuantas generaciones (y en un día pueden darse varias decenas de generaciones bacterianas).

Ello sugiere, pues, la posibilidad de preparar biorrefuerzos en principio más conformes con la naturaleza que los derivados de especies cultivadas aisladamente. En efecto, el subcultivo reiterado, en un medio con petróleo como única fuente de carbono, de una población bacteriana mixta procedente de un entorno contaminado, acaba llevando a un consorcio estable, en el que después de un periodo de oscilaciones, se mantienen constantes las proporciones de especies presentes y la capacidad petroleolítica del conjunto. Aunque técnicamente viable, la obtención de un tal sistema es tarea tediosa, que exige tiempo y un mantenimiento constante del consorcio evitando procedimientos de crioconservación, que facilitarían la labor, pero que podrían comprometer la viabilidad de algunos de los componentes del grupo.

De ahí que, con otro paso adelante, haya surgido otra alternativa: la de intervenir en el genoma de ciertas especies que ya en estado silvestre son buenas comedoras de hidrocarburos, para aumentar su eficiencia. Cita obligada a este respecto es el caso de la bacteria cosmopolita *Pseudomonas putida*, muchas de cuyas cepas contienen un interesante plásmido, es decir, un pequeño paquete cíclico de ADN, independiente del gran paquete, también cíclico, que constituye el único cromosoma que alberga su citoplasma. Este plásmido, que se conoce con el nombre de TOL, codifica un útil conjunto de enzimas. Algunas de ellas, relativamente comunes, catalizan varias oxidaciones que, en los organismos aerobios, representan los pasos iniciales del metabolismo de los hidrocarburos; pero otra (metapirocatecasa, codificada por el gen *xyl de TOL*) es capaz de romper anillos aromáticos previamente oxidados a difenoles por acción de las primeras, lo cual constituye una capacidad más singular.

Como el número de plásmidos por célula puede aumentarse artificialmente (amplificación) con cierta facilidad, las *Pseudomonas* enriquecidas en TOL podrían representar un interesante biorrefuerzo. Pero el conocimiento de la secuencia del plásmido abre además otras posibilidades, ya que permite recursos como la síntesis

de sondas para detectar el gen *xyl* o análogos en microorganismos quizá preferibles a *Pseudomonas*, o la modificación del promotor del operón (es decir, el mecanismo desencadenante de la transcripción del conjunto de genes) para potenciar la actividad petroleolítica. Enseguida veremos, sin embargo, que algunos de estos recursos son desaconsejables por motivos de prudencia.

LOS PSEUDOPROBLEMAS

Cuando una marea negra se hace noticia, la información sumariada en el apartado precedente –a menudo una información mucho menor–, es suficiente para que los medios de comunicación oscilen entre el entusiasmo y el anatema. Ninguna de estas actitudes teatrales tiene fundamento, pero lo peor del caso es que las razones que suelen aducirse guardan por lo común poca relación con los problemas reales del recurso. Los argumentos entusiastas derivan en general de posiciones acríticas, indiscriminadamente favorables a cualquier cosa que pueda calificarse –justamente o no– de innovación. Como a lo largo de este escrito sostendremos una posición críticamente favorable a la biorreparación, ahorraremos ahora el comentario. Las razones que inducen a la alarma, más susceptibles a lo sensacional, pueden resumirse en dos tipos de interrogantes que la retórica mediática suele formular con acentos amenazadores:

- a) ¿Qué hacen las bacterias del biorrefuerzo (en especial si son alóctonas) una vez agotado el petróleo?
- b) ¿No puede la fertilización eutrofizar el medio y favorecer a especies indeseables?

Aunque ambas interrogantes están relacionadas, podemos comenzar por la primera para señalar que a los organismos del biorrefuerzo se les imponen, en práctica ecológicamente prudente, las cuatro restricciones siguientes: (1) no modificados genéticamente, (2) no fotosintéticos, (3) no parásitos, (4) no formadores de esporas o propágulos resistentes. Las tres últimas implican, naturalmente, que una vez desaparece el exceso de nutrientes del medio (petróleo o fertilizantes), el exceso de microbiota –sea o no autóctona– desaparece simplemente por inanición o regresa a los niveles normales en el hábitat de que se trate, ya que si no es fotosintética requiere materia orgánica (petróleo), si no es parásita no puede refugiarse en otro organismo vivo y si no produce formas de resistencia ni siquiera puede esperar en estado latente el eventual advenimiento de nuevas condiciones favorables (de ahí que el periodismo entusiástico haya hablado a veces de ‘bacterias suicidas’).

Cabría incluso decir que el veto a las formas esporuladas es excesivo, ya que excluye algunas bacterias nada problemáticas, así como a los microhongos, especialmente aptos para crecer en medios con baja actividad de agua (humedad relativa) y que prestan útiles servicios biorreparadores en ambiente terrestre. Parece un tanto hipócrita, por otra parte, sobre todo cuando se trata de ambientes litorales, escandalizarse ante el riesgo de introducir microbiota alóctona, olvidando que los barcos trasladan aguas de las tre con toda libertad de unos a otros océanos; que en nuestras costas tratamos pesca

ajena a nuestra plataforma, liberando a las aguas litorales su microbiota intestinal, parásita o no; cuando se sabe que las emisiones de granjas y piscifactorías contienen abundantes microorganismos, a menudo resistentes a los antibióticos que se añaden abusivamente a los piensos, y cuando las últimas modas alimentarias diseminan generosas cantidades de bacterias lácticas por todo tipo de medios.

Restringir el uso de organismos modificados genéticamente puede parecer otro exceso cuando se trata simplemente de células con plásmidos supernumerarios. Después de todo, no parece que la difusión horizontal de la capacidad petroleolítica, que como hemos dicho constituye una respuesta espontánea de la microbiota que habita un espacio contaminado, represente mayor problema. Diferente, sin embargo, es el caso de intervenciones en el mecanismo que dispara la transcripción de genes plasmídicos. Algunas características poco deseables, como ciertas capacidades infectivas o la resistencia a antibióticos, se localizan también en plásmidos, por lo que la facilidad de las bacterias para hibridar informaciones genéticas obliga sin duda a extremar las cautelas en esta otra vertiente.

Con respecto a la segunda interrogante, debe decirse, en primer lugar, que la eutrofización no es sino el exceso de nutrientes en un determinado hábitat, situación que beneficia a los organismos (oportunistas, o estrategias de la *r*) capaces de una inversión más eficiente de los recursos así disponibles en procesos de reproducción. Puesto que existen organismos petroleolíticos, la contaminación con petróleo es ya una eutrofización que los favorece y que, como ya vimos, no se resuelve en un rápido consumo de los hidrocarburos a causa del desequilibrio nutricional de la situación. Al corregir este desequilibrio, la fertilización no hace sino acelerar el proceso natural que, en cualquier caso, pone inevitablemente en marcha la presencia de petróleo, transformando una eutrofización larga, desequilibrada e incontrolada, en una eutrofización equilibrada, controlada y más breve. Lo cual es deseable no sólo porque la presencia de petróleo entorpece el uso normal del ecosistema, sino porque cuanto más se acorte el periodo transitorio, más fácilmente puede lograrse la reconstitución del hábitat, por recolonización natural desde las áreas vecinas, minimizando el riesgo de deriva hacia otros posibles estados.

Sin duda el referente de este temor es la eutrofización debida al ingreso continuo de efluentes domésticos e industriales en numerosos entornos, lo que, ciertamente, constituye un serio problema ambiental. La fertilización biorreparadora, sin embargo, en absoluto puede asimilarse al caso de los efluentes, ya que se trata de un ingreso puntual, transitorio y muy moderado de materiales que, aun si migrasen a espacios no afectados, serían rápidamente agotados. De hecho, las potenciales proliferaciones de organismos fotosintéticos que suelen aducirse como objeción no han sido nunca confirmadas.

Si hemos dedicado este apartado a lo que consideramos pseudoproblemas, no es sólo porque éstos llenan el discurso mediático habitual en el contexto que sigue a los accidentes. Es sobre todo porque las decisiones políticas –parece ocioso señalarlo– son mucho más sensibles al ruido mediático que a los argumentos del conocimiento, lo que entorpece y retrasa las respuestas racionales a la contingencia. Sin embargo, los problemas reales de la biorreparación, aquellos que deberían de sopesarse para tomar decisiones

cuya envergadura económica las hace claramente políticas, son mucho más prosaicos y se relacionan mucho más con la eficiencia del recurso y su balance de costos y beneficios en diferentes condiciones concretas. Entrar en tales problemas reales exige algo más de información, que discutiremos en los apartados subsiguientes.

EL PETRÓLEO COMO CONTAMINANTE A MEDIO CAMINO ENTRE LO HOMIOBIÓTICO Y LO XENOBIÓTICO

Algunas claves de la respuesta biológica a los compuestos xenobióticos

El petróleo es, como se sabe, una mezcla de hidrocarburos (junto con algunos análogos estructurales que contienen átomos de oxígeno, nitrógeno y azufre, fundamentalmente), cuya interacción con las entidades biológicas se comprende mejor si antes definimos los extremos del estatus metabólico que cabe atribuir a las estructuras moleculares.

En términos generales puede decirse que existen moléculas cuya arquitectura facilita, cuando penetran en la célula, su ingreso en rutas de conversiones que acaban por incorporar sus fragmentos a la estructura celular, o por degradarlos hasta formas muy simples (al cabo agua y dióxido de carbono) con producción de energía. Tal es el caso de materiales como los presentes en los alimentos, aptos para integrarse en la dinámica del sistema receptor y por ello calificables de homiobióticos. Otras arquitecturas moleculares, sin embargo, se integran dificultosamente en aquella dinámica, tendiendo a quedar marginadas de las principales rutas metabólicas. Así ocurre, por ejemplo, con algunas estructuras lipófilas y poco reactivas, que se acumulan pasivamente en compartimentos o tejidos ricos en lípidos, o con agentes como los alquilantes, que dejan fragmentos extraños anclados covalentemente en los ácidos nucleicos. Los compuestos con estos comportamientos se califican de xenobióticos.

La categoría de lo homiobiótico se vincula, en esencia, a las arquitecturas moleculares que surgen en las suaves condiciones (medio acuoso, pH próximo a la neutralidad, baja fuerza iónica, temperatura y presión moderadas, radiación de baja longitud de onda amortiguada) propias de la dinámica viviente. Las enzimas, que permiten la síntesis de estructuras muy improbables en su ausencia, son las garantes básicas de este principio de suavidad. Porque son muy vulnerables a condiciones extremas y porque, en la formación o ruptura de enlaces químicos que implican altos desniveles energéticos, acoplan reacciones de necesidades opuestas y, a menudo organizadas en cadenas, reducen los desniveles a series de mansas cascadas, energéticamente más eficientes. Por su parte, la categoría de lo xenobiótico se vincula a la síntesis química que cabe llamar cultural, en condiciones que, lejos de las ambientales, pueden generar estructuras moleculares poco probables en la química viviente.

La frontera entre lo homio y lo xenobiótico es difusa y puede variar con la entidad biológica considerada (las hay que degradan compuestos inatacables por otras) e

incluso las condiciones del entorno (hay compuestos que ciertos organismos sólo degradan en presencia de otros tipos moleculares o cosustratos: cometabolismo). La xenobiosis tampoco implica inactividad biológica (muchos fármacos son xenobióticos), ni total inercia metabólica (a menudo la eliminación exige transformaciones previas). La distinción, con todo, es pertinente entre otras razones por las peculiaridades de los procesos que actúan en uno y otro caso.

Las rutas metabólicas de los xenobióticos, que llevan a su eliminación directa si son hidrófilos, tienden, si son lipófilos y no quedan retenidos por reparto o covalencia, a dar carácter hidrosoluble a la molécula a través de mecanismos que suelen actuar en dos etapas. Las enzimas que actúan en la primera –no sintética, o de funcionalización– catalizan típicamente reacciones de oxidación (las mayoritarias: vivimos en un planeta de atmósfera oxidante), reducción e hidrólisis. Los metabolitos así producidos pueden pasar a vías de eliminación o acumulación, pero por lo común ingresan en una segunda fase –sintética o de conjugación– donde la reacción con una molécula endógena (ácido glucurónico, aminoácidos, glutatión, sulfatos orgánicos) genera un conjugado, en general con un carácter ácido que facilita su eliminación en forma hidrosoluble. Aún eliminado, el conjugado puede hidrolizarse en el medio, o en un espacio orgánico distinto de aquel donde se formó, y quedar así accesible a un nuevo proceso de absorción.

Las enzimas que actúan sobre los xenobióticos, y que suelen calificarse de fármaco-metabólicas, o EFM, en alusión al ámbito inicial de su estudio, presentan ciertas peculiaridades que sin duda responden a una sólida lógica funcional, pero algunas de las cuales pueden articularse de modos problemáticos.

Una primera peculiaridad es su localización preferente en lo que podríamos llamar fronteras metabólicas de la entidad biológica con su entorno: en general son enzimas ligadas a la cara interna de la membrana celular (procariotas) o a los sistemas de membranas del retículo endoplásmico liso (eucariotas). Como tal retículo constituye lo que suele denominarse fracción microsómica en la rutina analítica de componentes celulares, es frecuente hablar de las EFM como de enzimas microsómicas. El carácter fronterizo, que puede verse como un aspecto de la compartimentación que se da en toda célula entre espacios ana y catabólicos, tiene asimismo traducción en el nivel pluricelular, y así el tubo digestivo o cuerpo graso (artrópodos), hepatopáncreas (moluscos) e hígado (vertebrados) son sistemas especialmente ricos en estas enzimas. En cualquier caso, por lo demás, son catalizadores esencialmente intracelulares, cuya actividad queda gravemente mermada o destruida si se desorganizan los sistemas de membranas a los que se asocian y que, por lo tanto, hacen difícil –o económicamente inviable– pensar en preparados estables libres de células, similares a los que se obtienen en el caso de numerosas enzimas extracelulares.

Dos peculiaridades adicionales de las EFM con importantes implicaciones son su carácter inducible y su baja especificidad de sustrato. El carácter inducible significa que la presencia de sus sustratos estimula su biosíntesis, ahorrándole así a la célula un superávit superfluo de estructuras complejas. La baja especificidad es a menudo

consecuencia del carácter apolar de la interacción entre sustrato y centro activo (de ahí que los disolventes apolares retiren a veces el sustrato del centro activo, lo que explica, al menos en parte, la potenciación por el alcohol de los efectos de ciertas drogas de estructura poco afín), y su lógica es asimismo clara, ya que una alta especificidad sería poco eficaz si la clave selectiva es la capacidad para transformar moléculas variadas, con estructuras imprevisibles, quizá alejadas de las que circulan en el metabolismo ordinario. Además, ello permite un ahorro adicional si algunas enzimas del metabolismo ordinario con papeles metabólicos que no requieren una alta especificidad pueden aprovecharse, en caso necesario, para actuar sobre moléculas intrusas. Lo cual es precisamente lo que sucede en muchas oxidaciones importantes, y también en algunas hidrólisis y reducciones.

Existen xenobióticos que parecen burlar a las EFM, como algunos que ganan toxicidad en la primera fase de su metabolismo (la oxidación potencia los efectos de muchos plaguicidas órganofosforados, por ejemplo). Pero aun dejando aparte estos casos, la conjunción en estas enzimas del carácter inducible y la baja especificidad puede tener consecuencias indirectas indeseables, cuando la respuesta a la presencia de una molécula intrusa eleva los niveles de enzimas que actúan también sobre sustratos endógenos, desajustando así balances metabólicos. De este modo, la propia respuesta detoxificante puede constituir el principal efecto perturbador. Algunos de los graves problemas que los insecticidas órganoclorados (DDT, lindano, heptacloro, aldrín, dieldrín...) causaron en las aves, derivaron de la interferencia de las enzimas inducidas en el mecanismo de depósito de calcio en la cáscara del huevo, así como en el metabolismo de los esteroides endógenos, desacoplando la relación entre puesta y sucesión estacional.

Algunas EFM tienen interés como bioindicadores, ya que sus niveles o sus productos típicos pueden ser indicios de presión tóxica en casos dudosos. Un ubicuo bioindicador es el citocromo P-450, oxigenasa que actúa en el paso final de una cadena de transporte electrónico diferente de la respiratoria, transfiriendo un átomo del O₂ al sustrato y consumiendo el otro en la formación de agua (el diferente destino de los dos átomos de O₂ es la causa de que las enzimas de este tipo se califiquen de monooxigenasas, u oxidasas de función mixta: OFM). Otros bioindicadores son varias enzimas antioxidantes (que desactivan radicales debidos a la acción de las OFM), otras responsables de las conjugaciones con glutatión, o los lípidos peroxidados por los radicales que escapan a las enzimas antioxidantes. La noción de bioindicador, sin embargo, debe tomarse con precaución y no tenerse por una suerte de señal amplificadora de una contaminación quizá no detectable por otros medios. Como acabamos de señalar, los mecanismos de respuesta a los xenobióticos son, por su lógica funcional, poco específicos y de ningún modo ajenos a los estados intrínsecos del organismo que los desencadena. Por lo que, cuando se utilizan en contexto ambiental, sometidos a la acción de otras muchas variables (especialmente la sucesión de estados fisiológicos que se asocian al ciclo estacional), suelen traducir la interacción de todos los factores que los afectan, a menudo difícilmente discernibles en condiciones observacionales, no controladas.

Algunas claves del metabolismo de los hidrocarburos

Como también se sabe, el petróleo deriva de la transformación de restos orgánicos de lejanos pasados en las condiciones que presiden la formación de las rocas sedimentarias. Así, aunque con materia prima homioibiótica, su transformación transcurrió muy lejos de las suaves condiciones bióticas, de ahí que entre sus componentes se encuentren moléculas de diferente, y a veces ambiguo, estatus metabólico. En términos generales, el petróleo contiene cuatro familias de componentes (figuras 1 a 3) en proporciones que varían con el origen geográfico del crudo y, por supuesto, con su grado de refinado: (1) hidrocarburos básicamente saturados o alcanos (pueden contener insaturaciones: dobles y triples enlaces que definen a alquenos y alquinos), con estructuras lineales, ramificadas, cíclicas y cíclicas condensadas, estas últimas

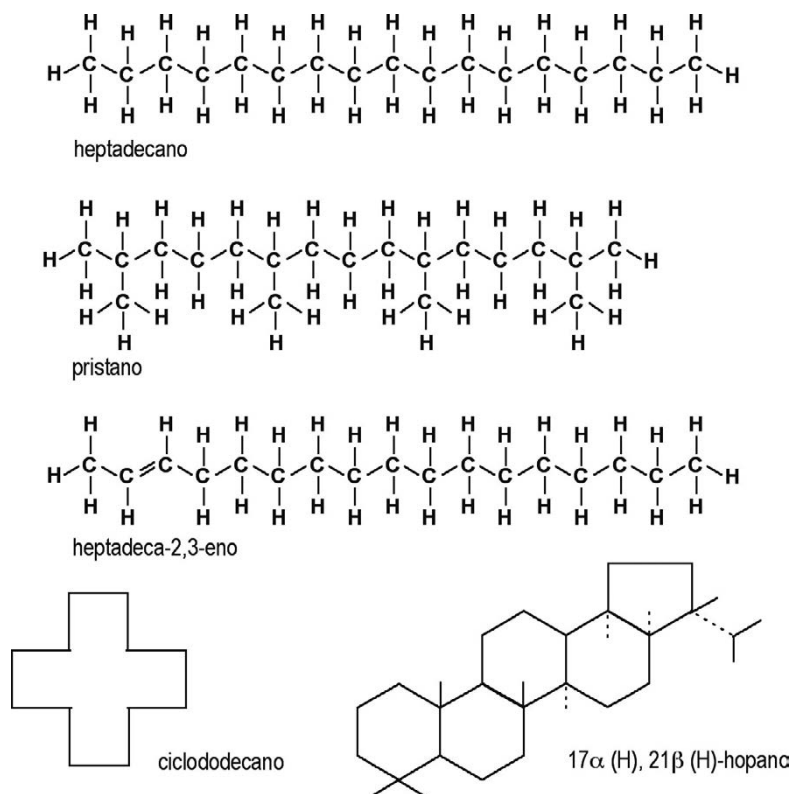


Figura 1. Ejemplo de alcano lineal (heptadecano), ramificado (pristano), alqueno (heptadeca-2,3-eno), cicloalcano simple (ciclododecano) y cicloalcano condensado (un hopano).

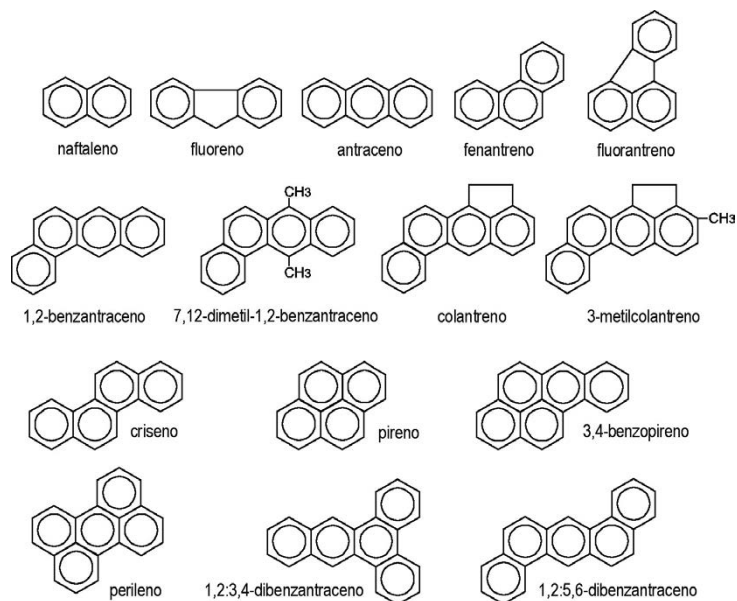


Figura 2. Ejemplos de hidrocarburos poliaromáticos condensados (HPA).

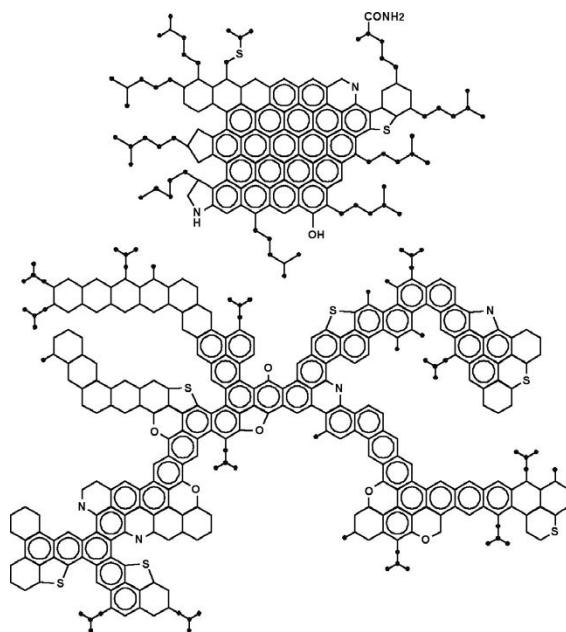


Figura 3. Dos estructuras (hipotéticas) características de la familia de los asfaltenos.

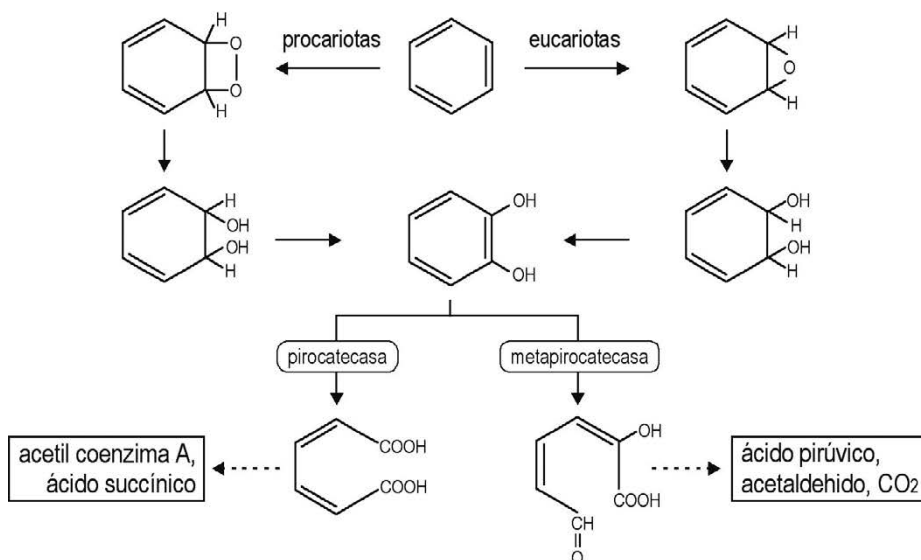
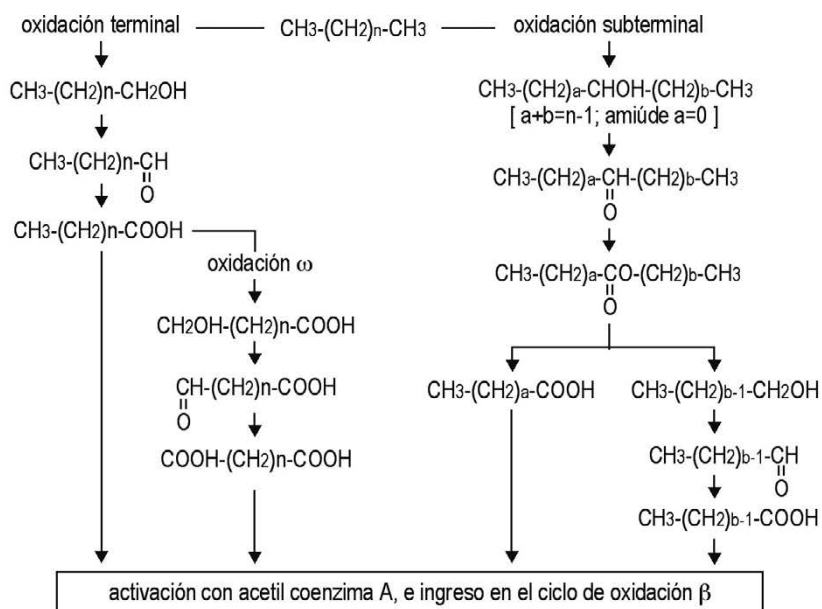


Figura 4. Biotransformaciones típicas de los hidrocarburos lineales (arriba) y aromáticos mononucleares (abajo), previas a su ingreso en el metabolismo ordinario.

presentes en la subfamilia de los hopanos, (2) hidrocarburos aromáticos, monocíclicos o policíclicos (poliaromáticos: HPA) condensados, (3) resinas, (4) asfaltenos.

Conviene señalar que asfaltenos y resinas son fracciones –las más pesadas del petróleo– de estructuras mal conocidas, variables de unos a otros crudos, con proporciones variables de oxígeno, nitrógeno, azufre e incluso metales, y que resultan dudosamente separables cuantitativamente por métodos simples, ya que se adsorben mutuamente con fuerza y forman micelas y agregados de notables dimensiones. De hecho, se definen de modo puramente operacional por sus solubilidades: los asfaltenos constituyen la fracción insoluble en alcanos ligeros (típicamente pentano); las resinas la soluble en alcanos ligeros e insoluble en ácidos o álcalis en medio alcohólico. Ambas fracciones son solubles en benceno y se encuentran relacionadas entre sí y con los hidrocarburos poliaromáticos (HPA) más pesados. En efecto, los asfaltenos (con pesos moleculares en el intervalo 103–25106) parecen haberse formado naturalmente por oxidación de las resinas, mientras la hidrogenación de los agregados de asfaltenos y resinas produce mezclas de HPA, o de análogos de los HPA que difieren de ellos por la presencia de O, N o S.

Aunque las rutas metabólicas de los componentes del petróleo pueden presentar numerosas variaciones de detalle, sus claves esenciales pueden resumirse en los términos de la figura 4, donde se recogen los pasos básicos que requieren las moléculas lineales y las aromáticas de un solo anillo antes de integrarse en las vías catabólicas ordinarias. En los hidrocarburos lineales las primeras transformaciones, catalizadas por oxigenasas, implican una oxidación progresiva muy convencional: alcohol, aldehído, ácido si es terminal, o alcohol, cetona, éster e hidrólisis a ácido y alcohol si es subterminal (a veces tienen lugar oxidaciones en ambos carbonos terminales). En cualquier caso, los productos de esta primera etapa son ácidos grasos que, como los de cualquier otro origen, ingresan en el ciclo de la oxidación beta, con eliminación recurrente de acetato. Análogas enzimas son las que preparan a los hidrocarburos aromáticos, si bien aquí con ligeras diferencias entre procariotas y eucariotas. La etapa crucial, como ya se dijo más atrás, es precisamente la que rompe el anillo fenólico al que conducen los primeros pasos oxidativos, produciendo un ácido mucónico, ya integrable en el catabolismo ordinario.

La presencia de ramificaciones entorpece la ruta de los alcanos, las cadenas laterales en los compuestos aromáticos pueden requerir vías mixtas, la presencia de átomos de O, N o S puede introducir detalles adicionales. Pero ninguna de estas variantes altera sustancialmente el esquema, y en todos los casos existen entidades biológicas, en especial las bacterias, que pueden crecer utilizando los correspondientes compuestos como única fuente de carbono. Procede señalar aquí que las diferentes susceptibilidades de diferentes estructuras a diferentes agentes puede proporcionar indicios interesantes de los mecanismos que intervienen en los procesos de descontaminación. Un ejemplo común es el del par heptadecano y pristano (figura 1). El punto de ebullición de los alcanos aumenta con el peso molecular y se reduce con las ramificaciones, que dificultan el empaquetamiento de las moléculas; de ahí que, si bien más pesado, el pristano tenga el mismo punto de ebullición que el heptadecano. Por otra parte, la biodegradación de los alcanos ramificados es más dificultosa que la de

los lineales, ya que las enzimas de la oxidación beta quedan bloqueadas en los nudos, requiriendo procesos adicionales para eliminar las ramas. De este modo, los efectos evaporativos tienden a dejar constante el cociente heptadecano/pristano, en tanto que la biodegradación tiende a reducirlo, proporcionando así un indicio de la acción biológica (lo mismo ocurre, por lo demás, con otro par: el octadecano y el fitano).

Otras arquitecturas moleculares resultan, sin embargo, mucho más recalcitrantes que los alcanos y los hidrocarburos aromáticos sencillos, degradándose sólo muy lentamente y por rutas mal conocidas, que posiblemente requieren la presencia de cosustratos carbonados o la interacción con factores abióticos, como la radiación ultravioleta. Los cicloalcanos, en especial los condensados, como los hopanos, son notablemente estables, utilizándose a veces como elementos de contraste para los que se suponen tasas de degradación despreciables a efectos prácticos. Algo parecido ocurre con los HPA, donde la necesaria reiteración de las roturas anulares hace su degradación muy lenta, en especial cuando se condensan más de tres anillos. Este último caso resulta un tanto inquietante, ya que los HPA poseen propiedades carcinogénicas y mutagénicas, y en su biodegradación pueden producirse metabolitos que, sin perderlas, exhiben a veces una mayor bioaccesibilidad, o conjugados que —como señalamos antes— vuelven a hidrolizarse en el medio, quedando disponibles para nuevos procesos de absorción.

Asfaltenos y resinas son todavía más estables. Los asfaltenos se descomponen sin fusión por encima de los 300-400° C, produciendo una mezcla de compuestos volátiles y un residuo carbonoso. Su aromaticidad les permite reaccionar con el ácido sulfúrico, dando ácidos sulfónicos. Asimismo se admite que son sensibles a la fotooxidación, con resultados poco definidos. Pero en condiciones ambientales su degradación tiene lugar a tasas muy bajas, despreciables incluso comparadas con las de los HPA. Su significado en tanto que contaminantes es, pues, ambiguo. Por una parte sus propiedades de solubilidad, su pobre reactividad, su elevado tamaño molecular y sus características estructurales hacen muy poco probable su acceso al medio intracelular, por lo que sus efectos serían puramente físicos, como, por ejemplo, los que imposibilitan el crecimiento de la hierba en una autopista. Pero lo cierto es que también podrían considerarse como una fuente o reservorio de los ominosos HPA.

A continuación veremos brevemente, en el caso de un espacio litoral afectado por el vertido del *Prestige*, cómo las propiedades de los hidrocarburos y las capacidades microbióticas interactúan con las características de un entorno concreto y la composición de la formulación fertilizante aplicada, para producir una determinada dinámica biorreparadora.

LOS ENSAYOS DE SÁLVORA

Las condiciones en las que tuvo lugar el accidente del *Prestige* (noviembre de 2002, con mareas vivas y fuerte depresión atmosférica causante de un intenso mar de fondo) llevaron el petróleo en muchas áreas costeras hasta niveles que el mar alcanza

sólo muy pocas veces al año y que se vieron así privados de la enérgica acción limpiadora del oleaje. Por otra parte, la carga del petrolero era un fuel pesado (hidrocarburos saturados: 30,5%; hidrocarburos aromáticos: 40,1%; resinas: 17,1%; asfaltenos: 12,3%), que se adhirió tenazmente a los sustratos rocosos, formando gruesas capas de gran estabilidad. En estas circunstancias, una vez los procedimientos de recogida manual o mecánica perdieron eficacia, se hizo necesario recurrir a métodos de limpieza con agua a presión y, en áreas de difícil acceso, a tratamientos de biorreparación. Así, en febrero de 2003 dio comienzo en la isla de Sálvora (dentro del Parque Nacional das Illas Atlánticas de Galicia) el ensayo de diversas formulaciones biorreparadoras sobre un roquedo supramareal muy afectado por el derrame.

Problemas de los criterios de evaluación

Si se desean datos comparativos más precisos que los derivados de la simple apreciación visual, evaluar la eficacia de un método biorreparador en un sustrato rocoso presenta dos dificultades interrelacionadas. La primera es la heterogeneidad del espacio, cuyas irregularidades determinan grandes variaciones en el grosor y adherencia de la capa de fuel (diferentes texturas, rugosidades, grado de exposición a los agentes atmosféricos). En estas condiciones (figura 5), los planes experimentales convencionales —cuadrados latinos, diseños ortogonales— son poco realistas, y el área mínima o el tamaño de muestra necesario para obtener un error estándar aceptable son de magnitudes poco viables en la práctica.

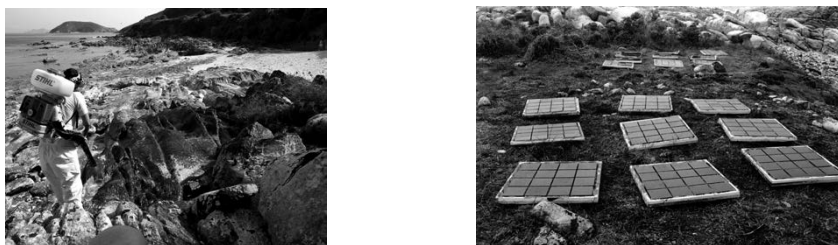


Figura 5. A la izquierda, detalle de un roquedo supramareal afectado. A la derecha, 9 de los 60 paneles de baldosa granítica impregnadas con fuel del *Prestige*, utilizadas para las cuantificaciones.

La segunda dificultad es el criterio de evaluación. La mejor opción es, naturalmente, comparar el fuel remanente en áreas tratadas y no tratadas, pero lo cierto es que la heterogeneidad espacial también afecta a este criterio. De ahí el frecuente uso de relaciones entre componentes de diferente tasa de degradación, cuyos valores en una muestra concreta pueden representar adecuadamente el espacio de interés, con independencia de su heterogeneidad. Las ya citadas relaciones heptadecano/pristano y octadecano/fitano se prestan a definir varios posibles índices útiles a este respecto, pero, como también se advirtió, su variación únicamente acusa la actuación de meca-

nismos biológicos, no siendo representativa del proceso global. Tanto los elementos lineales de cada par, como los ramificados, están lejos de ser los componentes más estables de un petróleo, por lo que su desaparición en absoluto implica la eliminación del problema. En estudios de laboratorio es común, como también se dijo, utilizar hopanos como estándares internos con tasas de degradación prácticamente nulas, comportamiento que asimismo puede atribuirse a la fracción de los asfaltenos. De este modo, una relación como:

$$Ra = \frac{\text{fuel total} - \text{asfaltenos}}{\text{fuel total}} = \frac{\text{fracción desasfaltada}}{\text{fuel total}}$$

puede representar aceptablemente la evolución de un proceso de reparación, permitiendo determinar, con el supuesto adicional de una cinética de primer orden (véase Cuadro 1), la tasa de degradación media del conjunto de los componentes degradables.

CUADRO 1: El índice R_t

Aceptando que, del fuel total (T), sólo la fracción desasfaltada (D) es degradable, manteniéndose los asfaltenos por largo tiempo en su valor inicial (A_0), puede definirse un índice normalizado R_t (siendo t un subíndice temporal) que traduciría aceptablemente el progreso de la degradación:

$$R_t = \frac{(T_t - A_0) / T_t}{(T_0 - A_0) / T_0} 100 = \frac{D_t / T_t}{D_0 / T_0} 100 \quad [1]$$

Si, como es usual, se acepta que la degradación sigue, como media, una cinética de primer orden con velocidad especificar, podemos escribir:

$$D_t = D_0 \exp(-rt) \quad [2]$$

por lo que el índice normalizado R_t obedecerá la ecuación:

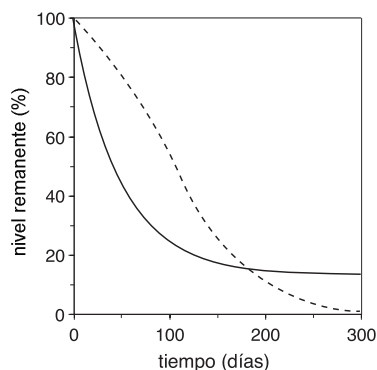
$$R_t = \frac{D_t / T_t}{b_0} 100 = \frac{100}{b_0} \frac{D_0 \exp(-rt)}{A_0 + D_0 \exp(-rt)} ; \text{ donde } b_0 = D_0 / (D_0 + A_0) \quad [3]$$

expresión utilizable, si disponemos de una serie de valores de R_t , para estimar la tasa de degradación r , así como la vida media ($t_{1/2}$), o tiempo necesario para que el valor inicial del índice ($R_t=0=100$) descienda a la mitad. En efecto, haciendo $R_t=50$ en [3] y despejando t , se obtiene:

$$t_{1/2} = \frac{1}{r} \ln \left[\frac{D_0(2 - b_0)}{A_0 b_0} \right] \quad [4]$$

Debe tenerse en cuenta que, si bien útil para suavizar el error experimental, el índice R_t es menos discriminativo que el valor del fuel remanente, ya que R_t decrece con el tiempo menos acusadamente que la fracción degradable. La figura a djunta ilustra el caso con una simulación de las caídas de T_t (línea continua) y R_t (línea de puntos) con $A_0=14$ y $D_0=86$ (valores aproximados para el fuel del Prestige en las rocas), suponiendo un valor arbitrario de $r=0,02$ para la velocidad específica.

Naturalmente, el realismo de este cálculo depende del supuesto de una cinética de primer orden para la degradación de la fracción desasfaltada (que incluye componentes de diferente estabilidad). Además, es obvio que R_t pierde validez si los asfaltenos varían como consecuencia directa o indirecta del proceso de biorreparación.



Tratamientos y resultados

Para eludir los dos tipos de problemas señalados, en los ensayos de Sálvora se recurrió a dos expedientes: (1) Utilizar, para la cuantificación del proceso, paneles de baldosas graníticas (figura 5) impregnadas con fuel del *Prestige* y situadas en el entorno afectado. La mitad de las baldosas, pintadas a rodillo, recibieron cargas sólo aproximadamente iguales de fuel, en la hipótesis de que el índice *R* es independiente de pequeñas diferencias en el nivel inicial. La otra mitad fue cargada con pesos conocidos (3-4 g por baldosa) del mismo material. (2) Basar la evaluación en la carga remanente, determinada en extractos exhaustivos de baldosas intratadas (control) y sometidas a los diferentes tratamientos ensayados. La figura 6 resume el protocolo de extracción y fraccionamiento aplicado, que proporciona información complementaria sobre componentes concretos del fuel.

Los tratamientos comenzaron en diferentes momentos a lo largo de febrero y marzo de 2003, con un intervalo aproximado de un mes entre el inicio del primero y el último. A fin de mantener niveles razonables de agentes biorreparadores sobre el sustrato, las adiciones de nutrientes, microbiota o ambos se repitieron cada 15-25 días, o –en las formulaciones comerciales– siguiendo las especificaciones de los proveedores. Los recursos ensayados fueron los siguientes:

- A. Constituyó el tratamiento más simple. Implicó la adición de fertilizantes agrícolas convencionales (nitrato amónico, fosfato amónico y un complejo de oligoelementos y factores de crecimiento). Se aplicó en solución acuosa ($\sim 0,5$ L/m²), de tal modo que, siendo *F* el fuel estimado por unidad de superficie, los nutrientes esenciales se encontrasen en las siguientes proporciones: N= $F \times 0,10$; P= $F \times 0,04$; Fe= $4 \times F \times 10^{-5}$. Además, para facilitar la retención de los agentes biorreparadores en la superficie tratada, la solución fertilizante se suplementó con un 5% de sepiolita.
- B. Como A, pero añadiendo un consorcio bacteriano ($\sim 10^{10}$ células/L) aislado de una zona afectada a las tres semanas del accidente.
- C. Como B, pero sustituyendo la sepiolita por bentonita y un 5% de fragmentos vegetales.
- D. Como C, pero en una formulación con un 10% de tensioactivos naturales.
- E. Como C, pero añadiendo un inóculo comercial con tres cepas silvestres de *Pseudomonas putida*.
- F. Como A, pero con el inóculo de *P. putida* utilizado en E.
- G. Como F, con un 5% de sepiolita.
- H. Como A, pero sin sepiolita y añadiendo un consorcio bacteriano comercial, así como un extracto vegetal con vitaminas y otros micronutrientes.
- I. Como H, pero sustituyendo el consorcio comercial por otro análogo al utilizado en B.
- J. La formulación comercial S-200 (urea, un éster fosfórico y butoxi-etoxi-etanol en emulsión de ácido oleico y agua). Dos aplicaciones de 340 mL/m².
- K. Como A, pero sin sepiolita y añadiendo un inóculo comercial con arqueobacterias en un soporte arcilloso, y suplementos adicionales de urea, Cu, Mn, B y Mo.

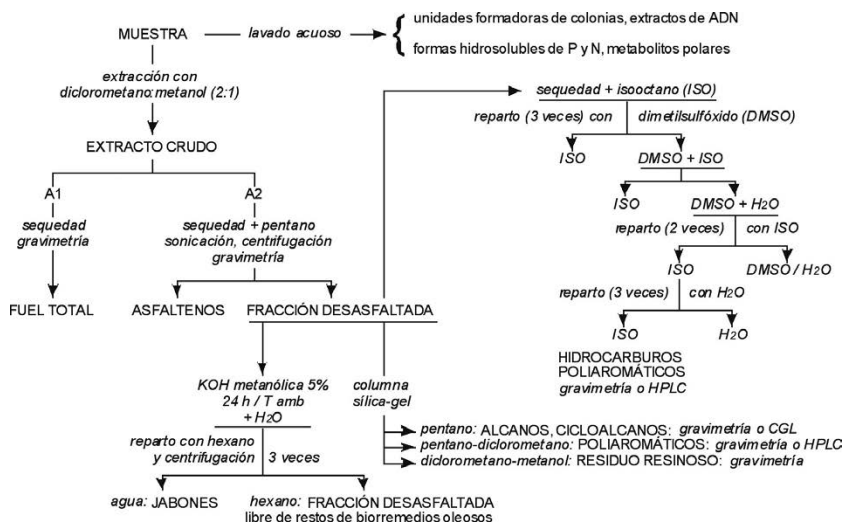


Figura 6. Tratamiento de las baldosas y fraccionamiento de los extractos de fuel en los cuatro grupos básicos de componentes (hidrocarburos alifáticos y cicloalcanos, hidrocarburos aromáticos, resinas y asfaltenos). Los extractos crudos se obtienen manteniendo las baldosas en recipientes cerrados de vidrio con diclorometano:metanol (2:1), 24 horas a 20°C con agitación rotatoria. Las vías redundantes (cromatografía en sílica-gel y reparto isooctano/dimetilsulfóxido/agua) se aplican sólo a título confirmatorio. En los tratamientos con S-200, la saponificación de la fracción desasfaltada es imprescindible para eliminar los restos de la formulación que la contaminan.

Durante los primeros 2-3 meses, el índice R_t en baldosas cargadas semicuantitativamente acusó un descenso que podría interpretarse en términos de una cinética de primer orden, con una velocidad de degradación de la fracción desasfaltada ligeramente más alta en las baldosas tratadas que en los controles. Sin embargo, la significación estadística de los ajustes al modelo [3] del Cuadro 1 no alcanzó en ningún caso el 95%, y los valores correspondientes a tiempos de alrededor de 75 días sólo permitieron atribuir una ligera –aunque significativa– ventaja al tratamiento J. Por otra parte, en algunos casos los valores de R_t contrastaban con el aspecto visual de las baldosas, lo que llevó a sospechar que el índice infraestimaba la eficacia, probablemente porque en tales casos se daba en alguna medida una pérdida de asfaltenos.

La infraestimación –precisamente de los tratamientos más efectivos– se confirmó al evaluar el fuel total remanente en baldosas con cargas iniciales conocidas, después de periodos de actuación comprendidos entre los 68 y los 83 días. Se evidenció así (figura 7) que las diferencias entre baldosas tratadas y de control sólo sobrepasaban el 20% en tres casos (F, I y J), no siendo significativas, o encontrándose en el umbral de la significación, en el resto de los tratamientos. Las pequeñas diferencias en los tiempos no eran relevantes, ya que, de hecho, las dos formulaciones más efectivas (I, J) eran las de periodos de actuación más breves. Así, y de acuerdo con la administración del Parque, en este momento se decidió continuar únicamente con los tratamientos F, I y J.

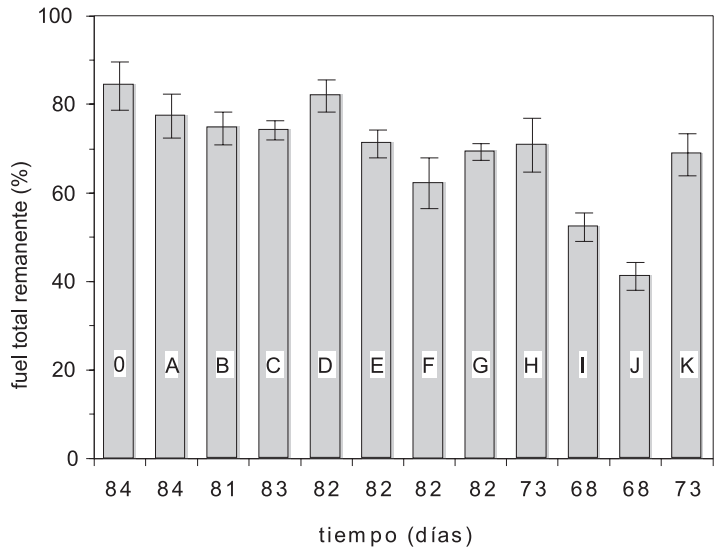


Figura 7. Fuel total remanente (% del nivel inicial) en baldosas sometidas a los diferentes tratamientos ensayados (o: control sin tratamiento), a los tiempos indicados. Las barras de error indican intervalos de confianza ($n=4$; $\alpha=0.05$).

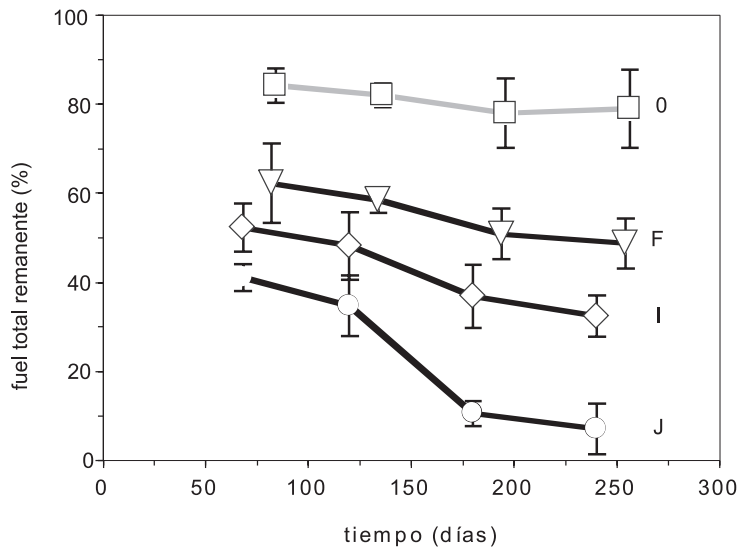


Figura 8. Descenso del fuel total remanente (% del nivel inicial) en baldosas de control (0) y tratadas con las tres formulaciones más eficaces (F, I y J) después del periodo inicial de 2-3 meses. Las barras de error indican intervalos de confianza ($n=3$; $\alpha=0.05$).

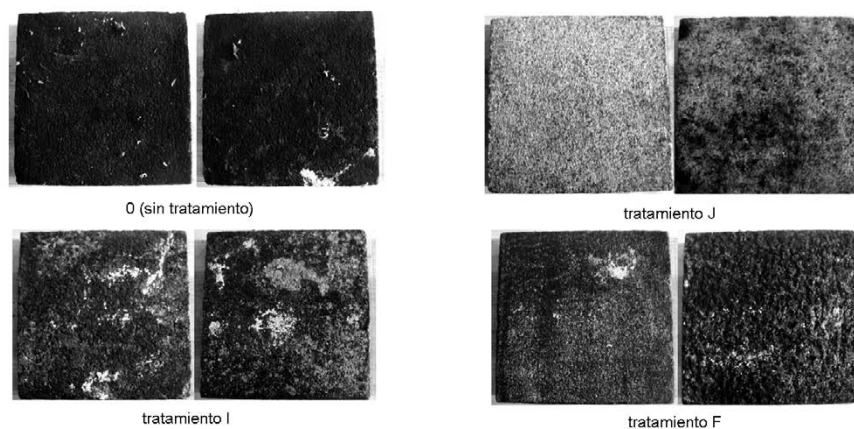


Figura 9. Aspecto de las baldosas de control y tratadas con las tres formulaciones más eficaces después de 200 días. Los estados en que se muestran corresponden con buena aproximación a los descritos cuantitativamente como puntos finales de la figura 8. Nótese la apariencia prácticamente inalterada del control (las áreas más blancas que se aprecian en algunos casos son restos excrementales de gaviota).



Figura 10. Efecto del tratamiento con S-200 sobre el espacio natural después de un periodo de 200 días.

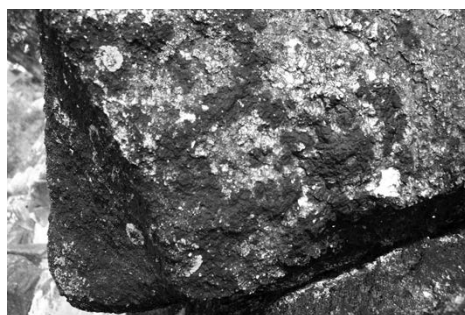


Figura 11. Rocas de la costa de Baiona afectadas por el vertido del *Polycommander*, después de un periodo de exposición de 33 años.

La ulterior evolución del fuel remanente en estos tres casos, durante un periodo cercano a los 250 días, (figura 8) confirmó las tendencias detectadas en el periodo inicial, reveló una aceleración del proceso durante el verano y puso de manifiesto definitivamente una ventaja sustancial para el tratamiento J (la formulación oleosa S-200). Las fotografías de la figura 9 muestran baldosas en estados correspondientes a los últimos puntos de la figura 8, mientras la figura 10 ofrece un aspecto, en el mismo momento, del espacio natural tratado con S-200. El proceso se encontraba ligeramente más atrasado en dicho espacio, debido a la permanencia de residuos de fuel en las concavidades de las rocas. Sin embargo, el estado general del área concordaba con los resultados obtenidos en las baldosas. Como contraste ilustrador de las consecuencias de la inacción, la figura 11 corresponde a una roca de la costa de Baiona afectada por el vertido del *Polycommander*, después de 33 años de exposición a la intemperie. Es claro que los líquenes desarrollados sobre la capa de petróleo envejecido sugieren su escasa toxicidad (estaríamos en un caso semejante al del asfalto de las autopistas), sin que en modo alguno pueda decirse que la roca recuperó su estado previo a la llegada del petróleo. El estado actual (a los dos años del accidente) de los roquedos afectados por el *Prestige* y no sometidos a tratamiento hace suponer algo muy semejante para este caso.

La formulación S-200 fue, así, la finalmente seleccionada para aplicar a otras áreas rocosas litorales de características similares a la tratada en la isla de Sálvora. Aparte de sus efectos regeneradores del hábitat, se espera que estos trabajos proporcionen información adicional sobre la dinámica de la biorreparación, tanto desde el punto de vista de la desaparición de las diferentes fracciones de fuel, como de los aspectos microbiológicos implicados en la cinética del proceso.

Debe decirse que, si bien las campañas de 2004 y 2005 confirmaron las bases establecidas en 2003, la eficacia de dosis de S-200 equivalentes a las que en 2003 promovieron los resultados descritos descendió entre un 30 y un 50%. Varios factores explican este descenso, y dos parecen muy claros. En primer lugar, el trabajo en algunas áreas con fuel en capas muy gruesas (en superficies experimentales se constató que cuando la carga inicial sube de 133 a 750 g.m⁻², el fuel remanente a los 5 meses pasa del 18 al 60%). En segundo lugar el envejecimiento del fuel. En el laboratorio se constató que la radiación UV eleva las proporciones de componentes que se adsorben a la sílica-gel —y por lo tanto a los silicatos de los roquedos graníticos—, resistiendo la elución con diclorometano:metanol (2:1). Por otra parte, tratamientos equivalentes en baldosas impregnadas con fuel del *Prestige* conservado en el laboratorio (en recipientes cerrados desde el momento do accidente), y recuperado de las rocas de la isla de Ons a finales de 2004, pusieron de manifiesto la superior recalcitrancia del primero, con diferencias significativas de un 14,4% en el fuel remanente después de 2 meses.

La eficacia de la biorreparación, pues, decae significativamente al envejecer el fuel. Así —y aun no requiriendo estrictamente acciones urgentes en caso de accidente— el recurso ofrece una ventana temporal de idoneidad. Los resultados obtenidos con el fuel del *Prestige* indican un periodo de 3-6 meses como retardo tolerable para un máximo de efectividad con S-200.

Desde el punto de vista microbiológico, puede asimismo adelantarse que las técnicas de electroforesis en gel con gradiente de desnaturalización (DGGE) están poniendo de manifiesto que la variación estacional de la microbiota en los roquedos es más importante que la presencia o no de biorremedios, si bien un biorremedio ole-

oso, con buena capacidad de captación, contribuye a elevar la densidad de la microbiota por unidad de superficie.

Así pues, y aunque las campañas de tratamiento en marcha puedan proporcionar datos adicionales, los resultados descritos, junto con la información bibliográfica disponible, permiten ya discutir con realismo algunos aspectos básicos de este tipo de acciones.

LOS PROBLEMAS REALES. ELEMENTOS PARA UN BALANCE DE LA BIORREPARACIÓN

La eficacia de la biorreparación y, muy en especial, la del biorrefuerzo, es tema en el que abundan las vacilaciones y las discrepancias, lo que induce a pensar –admitiendo la corrección operatoria en todos los casos– que los resultados concretos dependen de factores que tienden a considerarse constantes sin serlo. Tales factores pueden tener su origen en el tipo de petróleo a tratar, el entorno del proceso, la formulación fertilizante aplicada y la microbiota implicada. Aunque entre ellos se dan interacciones relevantes, a continuación los discutiremos, en la medida de lo posible, por separado y en este orden.

El tipo de petróleo

Constituye sin duda el factor más obvio. Puesto que, como ya se ha visto, los diferentes componentes del petróleo presentan muy diferentes estabilidades químicas, es claro que un material con altas proporciones de HPA, resinas y asfaltenos (como el fuel del *Prestige*) constituye un caso de tratamiento más difícil que otro con una predominancia más acusada de alcanos (digamos como el crudo Brent que el *Aegean Sea* vertió en 1992, algo más al norte en la misma costa).

El entorno del proceso

En general puede decirse que la información relativa a espacios continentales parece describir resultados más satisfactorios que los obtenidos en entornos costeros. La biorreparación constituye, de hecho, un recurso (*land farming* o, simplemente, labrado) de uso creciente en el tratamiento de suelos contaminados por roturas de oleoductos, emisiones relacionadas con los aerodromos y actividades vinculadas al almacenamiento y distribución de combustibles o similares, en las que el deterioro del medio deriva de la acumulación de pérdidas pequeñas, pero sistemáticas, durante largos periodos de tiempo. En tales casos, la fertilización convencional, los biorrefuerzos, el arado de la tierra y a veces las inyecciones de aire u oxígeno parecen aportar contribuciones todas ellas estimables y sujetas a interacciones positivas. En contraste, los tratamientos de playas y roquedos litorales generan valoraciones a menudo contradictorias, que señalan con frecuencia la superfluidad de los biorrefuerzos.

Probablemente estas diferencias derivan en alguna medida del carácter en general más planificado de las actuaciones de ámbito terrestre. Los planes biorreparadores

en el ámbito marino suelen asociarse a las condiciones de excepcionalidad que genera una marea negra, con toda la confusión a la que ya nos hemos referido. Ello crea un clima favorable a la improvisación, a las ofertas oportunistas o poco razonables y a las decisiones apresuradas. También al inicio de investigaciones que se ejecutarían con mayor precisión en un contexto normal, que suelen representar sesgos coyunturales de otras líneas, que tienden a producir resultados en buena parte ya conocidos y que por lo común carecen de continuidad.

Pero aparte de estas posibles razones culturales, sin duda tales diferencias dependen también de factores naturales, relacionados con las peculiaridades de los correspondientes entornos. Aunque los métodos biorreparadores pueden ser eficaces en aguas con poco intercambio (lagunas, dársenas), los espacios costeros en donde su aplicación resulta más pertinente son básicamente aquellos que el mar no alcanza. En primer lugar porque en las áreas batidas el oleaje ejerce una acción limpiadora que hace superfluos otros métodos; además, porque es obvio que el mar diluye rápidamente hasta la ineficacia cualquier formulación biorreparadora. Con estas premisas, es claro que los arenales, graveras y roquedos, ambientes supramareales muy frecuentes, constituyen un sustrato que dificulta la retención de los nutrientes, hace imposible o de efecto irrelevante el labrado y resulta mucho más hostil a la actividad microbiótica que un suelo vegetal. Problemas que nos introducen en los factores relativos a la formulación biorreparadora.

La formulación biorreparadora

Los resultados de los ensayos de Sálvora descritos en el apartado precedente sugieren con fuerza que, al menos en sustratos rocosos, el factor clave para el éxito de un tratamiento biorreparador se encuentra en su capacidad para captar y retener microbiota sobre las superficies contaminadas, mucho más que en la adición de biorrefuerzos. Esta capacidad resultó escasa en las fertilizaciones en solución acuosa, incluso cuando incluyeron materiales adsorbentes como arcilla, sepiolita, bentonita o fragmentos vegetales. Sin embargo, la formulación oleosa mostró una buena aptitud para incorporarse a las capas de fuel, retardar su endurecimiento y formar superficies que aumentan la bioaccesibilidad de los hidrocarburos y facilitan la captación de microbiota ambiental (véase figura 12). Tal formulación resultó asimismo mucho menos sensible que las acuosas tanto al lavado pluvial como a la desecación, proporcionando una ventaja adicional frente a los preparados que incluyen biorrefuerzos. En efecto, en estos casos los suministradores suelen señalar la conveniencia de humectar suavemente el sustrato hasta dos veces por semana, lo cual aumentaría las necesidades de recursos humanos hasta niveles poco viables en la práctica, pese a que una de las ventajas que se atribuyen a la biorreparación es precisamente la sencillez de sus requerimientos.

El efecto dispersante que ejercen los vehículos oleosos suscitó, durante estos ensayos, algunas alarmas que conviene discutir aquí. Ciertamente, la utilización de dispersantes, tensioactivos y disolventes es una práctica reconocidamente errónea, que ya ha creado graves problemas, cuando lo que se busca con ella es un efecto

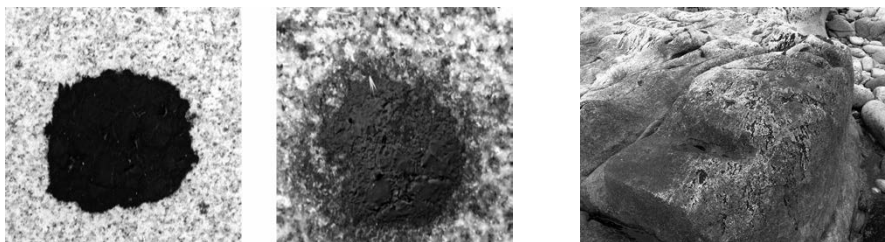


Figura 12. Baldosas impregnadas con la misma cantidad de fuel del *Prestige*, después de de un periodo de 20 días de exposición a la intemperie, en ausencia (izquierda) y presencia (centro) de S-200. A la derecha, halos limpios que produce la conjunción de efectos degradativos y dispersantes del S-200 en una roca ligeramente afectada después de 48 días.

masivo e inmediato, de mero maquillaje ambiental (la aparente desaparición de las manchas en el mar). Y ello es así porque tal dispersión facilita una penetración rápida y profunda del petróleo en todos los espacios del hábitat y la biota que lo puebla. Sin embargo, también se admite que el batir del oleaje es un excelente agente limpiador, pese a que su efecto es asimismo dispersante. ¿Cuál es la diferencia?

Naturalmente, la dispersión de una masa de fuel constituye en principio una condición favorable, ya que aumenta la superficie expuesta a los agentes degradativos del entorno. Este aumento de la exposición, sin embargo, significa un aumento de la bioaccesibilidad, lo que representa, en el fondo, un modo de hablar de dosis. Y un hecho toxicológico trivial (del que advierte, por ejemplo, la información que acompaña a numerosos fármacos) es el de que una molécula efectora, fácilmente metabolizable a una cierta dosis, puede ejercer una acción indeseable a dosis más altas. Así, la dispersión inocua debida al batir del mar es simplemente una consecuencia de la moderada dosificación de hidrocarburos que proporciona al entorno, dilatada en el tiempo, pero a concentraciones bajas, que permiten su metabolismo ininterrumpido.

Por el contrario, los dispersantes químicos (naturales o no) elevan rápidamente las dosis accesibles en el medio. Además, por sus propiedades tensioactivas o disolventes suelen ser desorganizadores igualmente eficaces de las masas de petróleo y de las bicapas lipídicas de las membranas celulares, lo que hace de ellos agentes no sólo de cierta agresividad, sino potenciadores de la toxicidad de los hidrocarburos. Podría decirse, pues, que disgregan mejor que el batir del mar, pero con serias contraindicaciones. Serían útiles en ciertos entornos, si las dosis conjuntas [dispersante+petróleo] así liberadas no excediesen la capacidad metabólica del medio. Criterio que, nunca seguido en la práctica, implicaría mantener por largo tiempo una adición continua, precisa y de bajo nivel, lo que no parece simple ni económicamente viable. De ahí precisamente la preferencia por los métodos de hidrolavado y biorreparación. Pero mientras los primeros representan un correlato del transporte natural, que deben acoplarse a recursos de recogida (tejidos hidrófugos, aspiración) y exigen mano de obra intensiva, los segundos refuerzan la acción metabólica, por lo que son realmente degradadores del petróleo y, en principio, economizan esfuerzo humano.

Tal como ilustra la figura 12, la formulación oleosa contribuye a extender muy lentamente el petróleo sobre las rocas. Las capas de fuel reducen así su espesor, tendiendo a crearse áreas periféricas más accesibles no sólo a la acción microbiana, sino también a los agentes abióticos; estos últimos probablemente los principales responsables de la desaparición o migración de los asfaltenos, en un estado finamente dividido y a velocidad incluso inferior a la que promueve la acción del mar. Aunque el efecto dispersante de los tratamientos oleosos es, pues, ingrediente esencial de su acción biorreparadora, la baja velocidad de dispersión, lo moderado del área que cubre y su acoplamiento a efectos degradativos lo aleja de la casuística típica del uso de dispersantes dirigido al rápido maquillaje ambiental.

Finalmente, es asimismo posible que los ácidos grasos presentes en la formulación oleosa desempeñen un papel importante como cosustratos. Aunque más atrás se tipificó la contaminación por petróleo como una sobrecarga del medio con carbono, y la biorreparación como un equilibrado de la dieta, se indicó también que algunos microorganismos sólo pueden degradar ciertos componentes del petróleo (como los HPA con más de tres anillos condensados) en régimen cometabólico, lo cual –aunque parezca un contrasentido– puede hacer conveniente la adición de más compuestos carbonados. Las funciones esenciales que se esperan de un cosustrato son la de actuar como inductor de enzimas útiles en la transformación del verdadero sustrato y la de proporcionar energía aplicable al proceso. Así, dadas las características de las rutas catabólicas de los hidrocarburos resumidas en la figura 4, los ácidos grasos representan en principio estructuras aptas para ambos papeles.

La microbiota implicada en el proceso

En relación con este factor llaman la atención dos constataciones empíricas frecuentes en la información bibliográfica: primeramente, el efecto a menudo poco relevante, o incluso irrelevante, del biorrefuerzo; en segundo lugar, el hecho de que la desaparición del petróleo parezca seguir en cualquier caso una cinética de primer orden (ecuación [2] del Cuadro 1), en la que el efecto del refuerzo, si realmente se da, sólo modifica el valor de la velocidad específica (r), sin alterar la forma funcional. Ambas constataciones, por lo demás, fueron básicamente confirmadas en los ensayos de Sálvora, ya que si bien la aceleración que acusan los tramos intermedios de la figura 7 podría interpretarse como una desviación de la cinética de primer orden, resulta más plausible, como se dijo, atribuirle a la temperatura del periodo de verano.

El efecto a menudo pobre de los biorrefuerzos es sin duda una consecuencia de la relativa complejidad que, de acuerdo con lo discutido en el primer apartado, pueden presentar los acoplamientos metabólicos necesarios para la biodegradación del petróleo. Con tales premisas, una petroleolisis eficiente parece, más que el resultado de un genoma concreto, la labor de un ecogenoma, esto es, de un conjunto de actividades enzimáticas distribuidas en varias especies, de tal modo que cada una realiza de modo óptimo una parte del proceso global, pero cuya viabilidad depende de otras

capacidades no necesariamente relacionadas con los hidrocarburos. Esquemáticamente, si definimos las especies E_1 y E_2 mediante los vectores:

$$E_1 = \begin{pmatrix} \text{requiere el producto } P_1 \\ \text{produce } P_2 \text{ a partir del sustrato } S_1 \\ \text{transforma el hidrocarburo } H_1 \text{ en } H_2 \\ \dots \end{pmatrix} \quad E_2 = \begin{pmatrix} \text{requiere el producto } P_2 \\ \text{produce } P_1 \text{ a partir del sustrato } S_2 \\ \text{transforma el hidrocarburo } H_2 \text{ en } H_3 \\ \dots \end{pmatrix}$$

tendríamos un consorcio binario capaz de la conversión $H_1 \rightarrow H_2 \rightarrow H_3$, que exige la presencia en el medio de los sustratos S_1 y S_2 , y que no sería sustituible por ninguno de sus elementos, aun reforzado con el genoma codificador de las enzimas que catalizan los dos pasos ($H_1 \rightarrow H_2$ y $H_2 \rightarrow H_3$), y aun estando disponibles S_1 y S_2 .

Naturalmente, las condiciones del medio ajenas a la presencia de petróleo juegan un papel importante en la formación de estos consorcios, de ahí que la baja eficacia del biorrefuerzo se explique usualmente aludiendo a las dificultades de adaptación a un ambiente natural de una microbiota –genéticamente modificada o no– habituada a condiciones de laboratorio. Cuando se considera que «adaptación» no –o no sólo– significa resistencia, sino interacción, se hacen más claras aquellas dificultades. Y se comprende también que un medio rico en nutrientes, como un suelo, o con unas condiciones relativamente estables, como un tanque o una dársena, puedan proporcionar más oportunidades a un biorrefuerzo que un roquedo supramareal. Ciertamente, la razonable eficacia en cultivo sumergido convencional que demostraron todos los biorrefuerzos ensayados en Sálvora, no se mantuvo en las rocas.

El problema se agrava si se tiene en cuenta que en los consorcios petroleolíticos naturales pueden existir especies no cultivables (que no sabemos cultivar) con papel relevante en la biorreparación y que, en el periodo de tiempo que exige el proceso, puede darse una sucesión estacional de consorcios difícilmente reproducible con un inóculo concreto. La sucesión estacional microbiana es un hecho conocido, si bien con poco detalle, y también se sabe que en numerosos ambientes naturales el número de especies aislables por los métodos tradicionales de cultivo es notablemente inferior al de especies detectables por su ADN, llegando estimarse que las primeras representan sólo un 1-5% del total. Ambos factores tienden a relativizar el valor de los biorrefuerzos, cuya eficacia –incluso cuando consisten en poblaciones mixtas estabilizadas por subcultivo– dependerá críticamente de la fertilización acompañante y las condiciones del medio. Y debe decirse que tanto la sucesión estacional, como la presencia de microbiota no cultivable, están encontrando confirmación preliminar en el trabajo actualmente en marcha (mediante electroforesis en gel con gradiente de desnaturalización: DGGE), paralelo a la extensión de las aplicaciones de S-200 en los roquedos litorales.

Esta relativización implica asimismo –y quizá de un modo especial– a los eventuales biorrefuerzos modificados genéticamente. Aun prescindiendo de los posibles riesgos biológicos, ya discutidos, muchos autores encuentran por lo menos muy dudoso que las «superbacterias» (denominación mediática que suele darse a este recurso) dispongan de suficiente capacidad metabólica como para actualizar y sostener en

condiciones ambientales las demandas energéticas implicadas en las actividades suplementarias de cuyos códigos puedan ser portadoras.

Pero aun podría haber más. Si el petróleo desaparece con una cinética de primer orden (exponencial negativa), y la adición de biorrefuerzo sólo consigue, en el mejor de los casos, aumentar la velocidad específica, se hace difícil aceptar que la combinación de petróleo, formulación fertilizante y biorrefuerzo desencadene un proceso asimilable a un cultivo microbiano, donde la desaparición de la fuente de carbono sigue la cinética (logística descendente) de un consumo autocatalítico. El papel del biorrefuerzo parece así más el de una condición del proceso, como la temperatura o el pH, que el de un reactivo autocatalítico, como la biomasa de un cultivo. De este modo, un modelo de biorreparación que explique la cinética de primer orden exige suponer que la acción microbiana se atiene a las siguientes condiciones: (1) el espacio contaminado capta al azar unidades petroleolíticas procedentes de una fuente —el entorno no contaminado— de suministro aproximadamente constante, (2) la viabilidad de las unidades petroleolíticas en el espacio contaminado es baja, el tiempo de actuación breve y la mortalidad compensa el aporte de la fuente, lo que impide la iniciación de procesos de crecimiento exponencial y mantiene una biomasa activa aproximadamente constante.

Este modelo es consistente, de hecho, con el rápido descenso de las poblaciones microbianas que se adicionan con cada aplicación de biorrefuerzo, así como con la necesidad de reiterar tales aplicaciones simplemente para conseguir un incremento en la velocidad específica (constante) de degradación. Y también, en definitiva, con la valoración del petróleo como una fuente de carbono mediocre, incluso para los microorganismos petroleolíticos.

Elementos para un balance

Finalmente, una recapitulación de los aspectos hasta aquí discutidos permite el siguiente balance de los métodos de biorreparación aplicados a la contaminación por petróleo:

Ventajas

1. Promueven la degradación real de los hidrocarburos, no limitándose a dispersarlos o a facilitar su recogida para ulterior traslado y tratamiento.
2. Eliminan polución que, por su situación topográfica o por su dispersión, resulta inaccesible o de tratamiento ineficiente por otros medios.
3. Si implican únicamente fertilización o no exigen repetidas adiciones de biorrefuerzo, su demanda de equipamiento es simple y su aplicación es poco consumidora de tiempo y mano de obra.
4. Actúan acelerando los procesos naturales, sin apenas introducir perturbaciones adicionales en el ecosistema. A este respecto debe señalarse que: (1) el riesgo de eutrofización es irrelevante, (2) el riesgo biológico nulo si la eventual microbiota de refuerzo cumple las restricciones (no modificada genéticamente, no fotosintética, no parásita, no formadora de esporas o propágulos resistentes)

que se especificaron en el apartado 2, (3) el eventual efecto dispersante es muy lento, comparable al de factores que se consideran positivos, como el batir del oleaje, y en modo alguno asimilable al de las prácticas, demostradamente erróneas, que buscan una dispersión inmediata mediante el uso masivo de compuestos tensioactivos o disolventes, (4) aunque es cierto que pueden producirse metabolitos intermedios de toxicidad o movilidad potenciada, ello es exactamente lo que ocurre también en la petroleolisis natural.

Inconvenientes

1. Implican un proceso lento.
2. Sólo son pertinentes como recurso de segunda instancia, o de acabado, cuando los procedimientos de recogida mecánica pierden eficacia.
3. El biorrefuerzo parece sólo pertinente en aquellos sustratos, como los suelos vegetales, que ya en condiciones normales presentan una rica actividad microbótica. En aquellos otros que son hostiles a dicha actividad, como las playas y los roquedos, el biorrefuerzo es ineficaz, o exigiría adiciones tan reiteradas, que su preparación y aplicación a escala ambiental implicaría una relación inaceptable entre costes y resultados.
4. La eficiencia del recurso no es algo garantizado de modo general, sino que exige una consideración del tipo de petróleo, el entorno a tratar, la formulación fertilizante y el eventual biorrefuerzo. En general, puede decirse que la biorremediación es útil en entornos privados de la acción mecánica del oleaje, superflua en aquellos lugares donde el batir del mar es intenso, y poco razonable en aguas abiertas. Los casos en que es útil comprenden espacios terrestres supramareales y espacios acuáticos de aguas tranquilas y poco intercambio. En la primera situación, si el espacio es rocoso el factor crítico es la capacidad de la formulación fertilizante para incorporarse a las capas de petróleo y captar y retener microbiota ambiental, lo que aconseja preparados oleosos y prescindir de biorrefuerzos. Los preparados acuosos, en combinación con biorrefuerzos adecuados, pueden ser útiles, sin embargo, en suelos vegetales o en espacios acuáticos con las características indicadas.
5. Los recursos realmente efectivos –como muchos otros en contexto de siniestro– pueden adquirir precios oportunistas.

Así pues, como cualquier otra técnica cuyos resultados dependen de varios factores, la biorreparación puede prestar servicios muy útiles, y puede también resultar poco razonable, ociosa o económicamente inaceptable para quien toma las decisiones (aunque de este tipo de costes no suele hablarse en los primeros momentos de un accidente, acaban por ser más determinantes incluso de lo que debieran). Puesto que en cualquier caso no se trata de un procedimiento de urgencia, sino básicamente de un recurso aplicable cuando los métodos de recogida mecánica dejan de ser eficientes, otra de sus ventajas es la de permitir una valoración meditada, al margen de los fragores mediáticos e incluso precedida de breves ensayos –siempre en los espacios reales a tratar y no necesariamente tan largos como los aquí descritos– que permitan prever su eficacia sobre una base empírica.

AGRADECIMIENTOS

El Organismo Autónomo de Parques Nacionales prestó el soporte financiero para los ensayos de Sálvora aquí resumidos, y en los que trabajaron entusiastamente J. Mirón, J.A. Vázquez y X. Fraguas. En el laboratorio fueron imprescindibles M^a P. González, M.L. Cabo, J. Pintado, A. Menduña, A. Durán y M. Nogueira. La Fundación Abertis, Caixa Galicia y Alejandro Sanz están contribuyendo a la extensión de las campañas de tratamiento y ensayo de técnicas mixtas desde junio de 2004.

BIBLIOGRAFÍA SUMARIA

- Alexander, M. (1965): Biodegradation: Problems of molecular recalcitrance and microbial fallibility. *Advances in Applied Microbiology*, 7: 35-80.
- Atlas, R. M. & R. Bartha (1992): Hydrocarbon biodegradation and oil spill bioremediation. *Advances in Microbial Ecology*, 12: 287-338.
- Atlas, R. M. (1995): Petroleum biodegradation and oil spill bioremediation. *Marine Pollution Bulletin*, 31: 178-82.
- Berg, G. G. (1969): En «Chemical fallout», px. 406. Charles C. Thomas Publ. Springfield (Illinois).
- Bergueiro, J. R. & F. Domínguez (1991): «Contaminación del mar por petróleo». Ed. J.R. Bergueiro & F. Domínguez. ISBN 84-86682-06-01.
- Bulot, J. (1990): «Le drame de L'Amocco Cadiz». Ed. J.B. Spezed (Paris).
- Jewett, S. C., T.A. Dean, R.O. Smith & A. Blanchard (1999): *Exxon Valdez* oil spill: impacts and recovery in the soft-bottom benthic community in and adjacent to eelgrass beds. *Marine Ecology Progress Series*, 185: 59-83.
- Krahn, M. M. & J.E. Stein (1998): Assessing exposure of marine biota and habitats to petroleum compounds. *Analytical Chemistry News & Features*, 186-92.
- Lee, K. & F. X. Merlin (1999): Bioremediation of oil on shoreline environments: Development of techniques and guidelines. *Pure Appl. Chem.* 71 (1): 161-71.
- Murado, M. A., J. Mirón, M^a P. González, J. A. Vázquez, M. L. Cabo & J. Pintado (2004): *Prestige* oil spill. Results of bioremediation assays on supra-tidal rocks of Sálvora Island (Galicia, Spain). *Proceedings of Interspill 2004 Conference and Exhibition* (Trondheim, Norway).
- Prince, R. C. (1993): Petroleum spill bioremediation in marine environments. *Critical Reviews in Microbiology*, 19: 217-42.
- Radwan, S. S., N.A. Sorkhoh, I.M. El-Nemr & A. F. El-Desouky (1997): A feasibility study on seeding as a bioremediation practice for the oily Kuwaiti desert. *J. Appl. Microbiol.*, 83: 353-58.
- Song, H. G., X. Wang & R. Bartha (1990): Bioremediation potential of terrestrial fuel spills. *Applied and Environmental Microbiology*, 56: 652-56.
- Sugai, S., J. E. Lindstrom & J. F. Braddock (1997): Environmental influences on the microbial degradation of *Exxon Valdez* oil on the shorelines of Prince William Sound, Alaska. *Environ. Sci. Technol.*, 31: 1564-72.
- Sveum, P. & A. LaDousse (1989): Biodegradation of oil in the Arctic: Enhancement by oil-soluble fertilizer application. En «*Proceedings of the 1989 Oil Spill Conference*», px. 439-46. American Petroleum Institute, Washington.

- Swannell, R. P. J., K. Lee & M. McDonagh (1996): Field evaluations of marine oil spill bioremediation. *Microbiological Reviews*, 60: 342-65.
- Timmis, K., R. J. Steffan & R. Unterman (1994): Designing microorganisms for the treatment of toxic wastes. *Annual Review of Microbiology*, 48: 525-57.
- U.S. Environmental Protection Agency (1990): Interim Report, Oil Spill Bioremediation Project. U. S. E. P. A., Office of Research and Development (Washington).
- Varios autores (1993): «Microorganisms to combat pollution». Rosenberg, E., Ed. Kluwer Academic Publishers (Dordrecht).
- Varios autores (1996): «Seguimiento de la contaminación producida por el accidente del buque *Aegean Sea*». Ed. Publicaciones Secretaría General Técnica. Ministerio de Medio Ambiente (Madrid). ISBN 84-498-0276-8.
- Varios autores (2002): «Oil and hydrocarbon spills. III: Modelling, analysis and control». Brebbia, C.A., Ed. Wessex Institute of Technology, UK. WIT Press, Southampton (Boston).
- Venosa, A.D., M.T. Suidan, B.A. Wrenn, K.L. Strohmeier, J.R. Haines, B.L. Eberhart, D. King & E. Holder (1996): Bioremediation of an experimental oil spill on the shoreline of Delaware Bay. *Environmental Science and Technology*, 30: 1764-76.

ACTUACIONES REALIZADAS EN EL PARQUE NACIONAL DE LAS ISLAS ATLÁNTICAS DE GALICIA CONSECUENCIA DE LA CATÁSTROFE DEL BUQUE *PRESTIGE*

EMILIO ESTEBAN RODRÍGUEZ MERINO

SITUACIÓN DE PARTIDA

A raíz del vertido producido por el petrolero *Prestige*, así como su hundimiento a unas 150 millas marinas del complejo insular de las Islas Cíes (Parque Nacional marítimo-terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia) el Organismo Autónomo Parques Nacionales puso en marcha un dispositivo especial al objeto de paliar sus posibles efectos sobre el parque. A tal efecto se redactó, con fecha 18 de noviembre de 2002, un protocolo interno «Programa de actuaciones para la prevención de los efectos de una posible incidencia de la catástrofe del *Prestige* sobre el Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia». Con posterioridad, el protocolo fue ratificado en su siguiente reunión por la Comisión Mixta de Gestión del Parque Nacional marítimo-terrestre celebrada el día 5 de diciembre en la Consejería de Medio Ambiente de la Xunta de Galicia en Santiago de Compostela.

A la vista de la evolución de las manchas de fuel, con fecha 1 de diciembre, se inició un programa de vigilancia específica de la zona marítima del Parque Nacional, en especial la zona occidental del archipiélago de Sálvora, al ser, según las informaciones proporcionadas por la Consejería de Pesca y Asuntos Marítimos de la Xunta

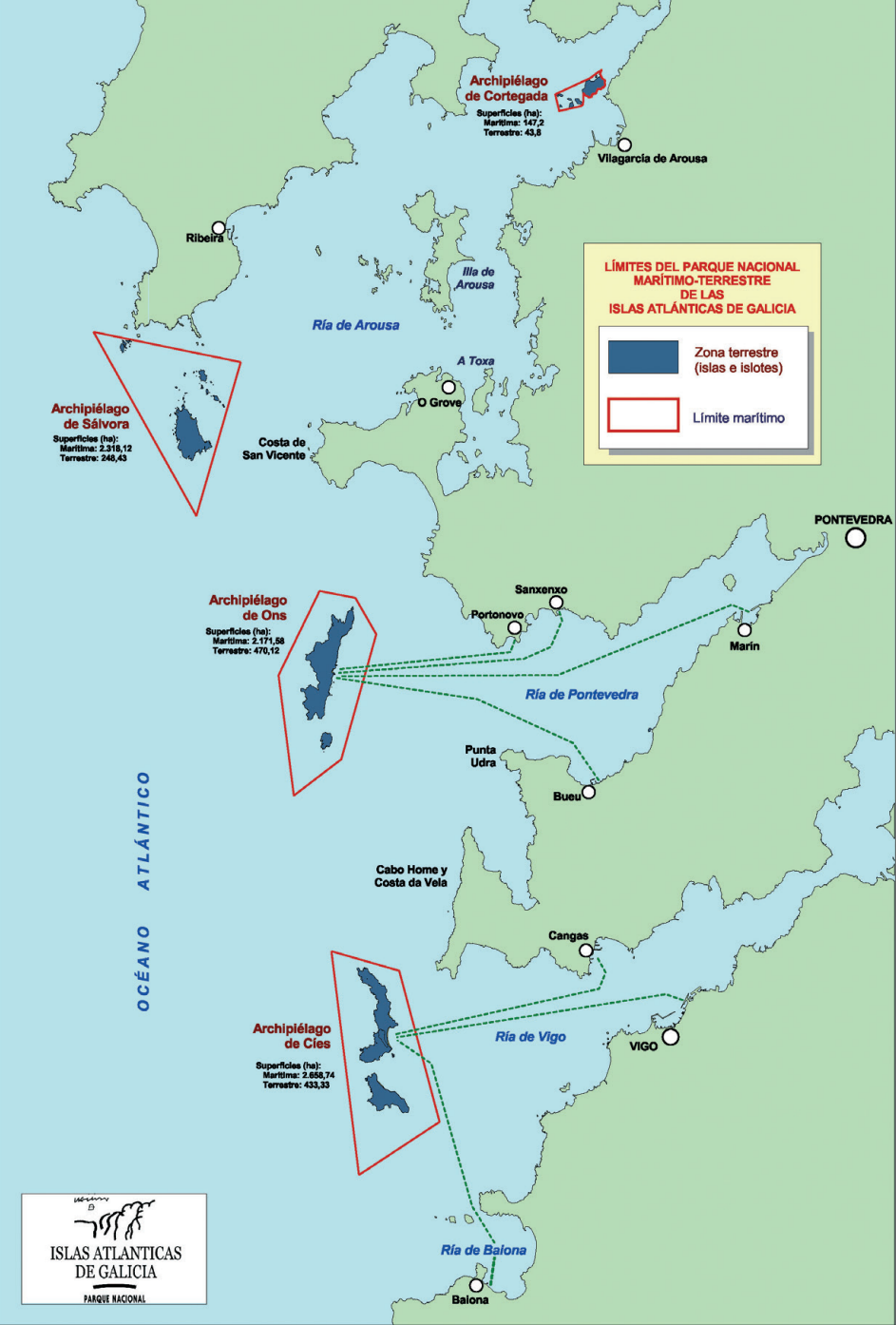


Figura 1. Mapa general del Parque Natural

de Galicia, la Sociedad Estatal de Salvamento Marítimo y la Oficina de Coordinación de las Actuaciones derivadas del Vertido del *Prestige*, el área del Parque Nacional más amenazada en el inicio de estas actuaciones. Como resultado de dicha inspección se localizó el primer frente de manchas el día 2 de diciembre a unas dos millas del poniente de Sálvora, manchas que llegaron a la isla de Sálvora el día 3 de diciembre, concretamente a las playas dos Bois y do Almacén. Estas primeras avanzadas fueron inmediatamente limpiadas por dos cuadrillas contratadas por el Parque Nacional. A partir del día 4 de diciembre comenzaron a llegar manchas de fuel-oil al resto de los archipiélagos del Parque Nacional, salvo a la Isla de Cortegada, situada al fondo de la Ría de Arousa.



Figura 2. Placa de fuel llegando a Ons (Foto: José María Pérez de Ayala)

ACTUACIONES PARA LA EXTRACCIÓN DE RESIDUOS PROCEDENTES DE LA CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS

A raíz de la afección, el Organismo Autónomo ha venido desarrollando, dentro de su Programa de actuaciones, diferentes actuaciones en función de las especiales circunstancias de los diferentes residuos. De forma resumida se puede hablar de cuatro tipos de actuaciones distintas:



Figura 3. Placa de fuel en Cantareira (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)

Limpieza de playas arenosas y superficie continuas

Desde principios de diciembre hasta finales de febrero el trabajo fundamental en el Parque Nacional consistió en la retirada de los residuos de fuel acumulados en las costas, especialmente en las zonas arenosas. Actualmente las playas de las Islas que forman el Parque Nacional se encuentran limpias de residuos de fuel.

La retirada en las zonas arenosas se realizó de manera manual, con la finalidad de evitar impactos mayores sobre los ecosistemas que forman los sistemas de playas en el Parque Nacional, evitando compactaciones excesivas de los horizontes de las arenas, así como el enterramiento del fuel consecuencia de la utilización de maquinaria pesada. Dicho trabajo se realizó con el único apoyo de útiles como palas, rastrillos, capachos y sacos de obra. Tras la limpieza de una zona, ésta era balizada con el fin de evitar que el movimiento de personas en dicha zona pudiera transportar de forma pasiva (en el EPI, botas, etc.) o bien de forma activa (traslado de capachos llenos de fuel) residuos de fuel a las áreas limpias. Los trabajadores y voluntarios se dividían diariamente por playas, en función del trabajo a realizar, organizados por el Personal técnico de Parques Nacionales y los colaboradores de la Xunta de Galicia. También se contó con la ayuda de los coordinadores de los distintos grupos de voluntarios que, ya desde el embarque, eran puestos bajo la coordinación efectiva de los encargados designados por la dirección de los trabajos en cada uno de los archipiélagos que forman el Parque Nacional. Al finalizar cada jornada, el personal de Parques



Figura 4. Cadena de trabajadores sacando residuos de fuel (Foto: José María Pérez de Ayala)



Figura 5. Recogida de fuel en playa (Foto: José María Pérez de Ayala)

Nacionales-Xunta de Galicia realizaba el transporte a puerto de la isla de los residuos generados para su retirada en barco a los puertos activos para las actividades del Prestige, donde, a través de la empresa Tragsa se daba traslado a gestor autorizado.

En zonas donde hubo acumulación de contenedores sobre sustrato arenoso, se procedió a cribar manualmente con el uso de cedazos para recoger aquellos restos que quedaron enterrados o semienterrados consecuencia de las labores de limpieza. También en aquellas playas donde se localizaron pequeñas «pelotitas de fuel» semienterradas, se procedió también a su cribado. Con el fin de detectar posibles enterramientos de fuel, se realizaron campañas de catas realizadas en un muestreo regular. Dichas catas no han detectado acumulaciones de fuel enterradas.

Hasta principio de agosto se detectaron pequeñas «galletas» de fuel de tamaño muy pequeño y líquidas que llegan a las playas de Figueiras y Canexol, de manera esporádica y desigual, y que eran inmediatamente retiradas por las cuadrillas que permanecen de retén en las islas, dicha llegada fue cada vez más escasa, estando principalmente asociada a mareas vivas y a los trabajos de limpieza de restos de manchas en el infralitoral frente a la playa de Figueiras (Isla Monte Agudo, Cíes) y Canexol (Ons). Posteriormente la llegada de pequeñas «galletas» ha sido muy esporádica, y consecuencia de vertidos o limpiezas de barcos posteriores.



Figura 6. Voluntarios cribando en la playa de Figueiras (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 7. Intermareal manchado (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)

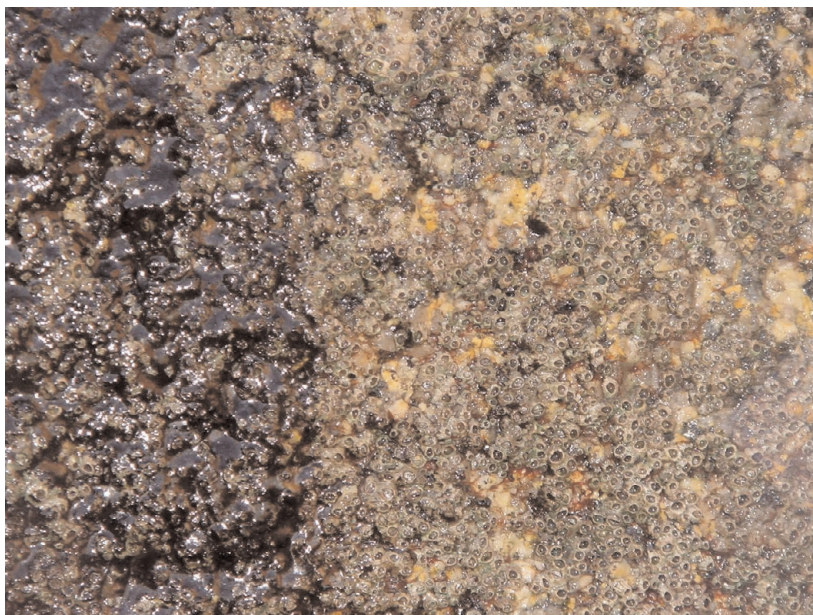


Figura 8. Intermareal hidrolimpiado (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 9. Aplicación de hidrolimpieza (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 10. Aplicación de hidrolimpieza (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)

Hidrolimpieza de las zonas intermareales rocosas y tramos supralitorales

La limpieza de estas zonas ha supuesto la implementación de una metodología específica mediante el empleo de hidrolimpiadoras. Parques Nacionales fue pionero en esta actuación que se generalizó para toda la zona afectada. Esta técnica ha sido aplicada por personal especializado de Parques Nacionales y de la Xunta de Galicia. El método, diseñado específicamente por el Organismo Autónomo Parques Nacionales en colaboración con científicos de la Universidad de Santiago, ha probado su eficacia en todas las zonas donde ha sido posible aplicarlo. Consiste en aplicar agua del mar a presión y a temperatura ambiente, sin añadir aditivo alguno, mediante utilización de hidrolimpiadoras. Para recoger el chapapote arrancado de las rocas se utilizaron mantas absorbentes hidrófugas en las zonas de escorrentía de los fluidos de limpieza (chapapote + agua de mar), que quedaban empapados en ellas. Además, se retenía el fuel que a pesar de las mantas escurría al mar mediante barreras flotantes absorbentes en la zona de caída al mar del flujo de agua.

Se utilizó esta técnica en una superficie total de 33.305 m², zonas en las zonas en que el método era aplicable ya que era posible recoger los efluentes que genera dicha limpieza. No obstante, quedaron superficies manchadas de residuos de fuel en las que no es posible aplicar el método de la hidrolimpieza, al no ser factible el recoger eficientemente los efluentes producidos: donde no había posibilidad de recogida de los fluidos de limpieza (zonas de mar abierto y batido en las que no se puede colocar una barrera de contención eficaz), donde había concentraciones importantes de fauna vagil (no sésil), como pulgas de mar –anfípodos, isópodos, poliquetos, etc.–, en lugares donde había concentraciones importantes de fauna sedentaria (lapas – *Patella* spp, bígamos – *Littorina* spp., *Gibbula* spp., *Monodonta lineata*–, y otras), y finalmente donde se encontraban concentraciones importantes de algas (cinturas de *Pelvetia canaliculata*, *Fucus* spp..., y fauna sésil (esponjas, anémonas, briozoos...). En estas zonas se está aplicando biorremediación (en función de los resultados derivados del experimento de biorremediación (*potenciar la acción de bacterias petroleolíticas*) que se llevó a cabo en Sálvora –en 1.000 m²– con la colaboración de investigadores del Instituto de Investigaciones Marinas, CSIC).

Retirada de hidrocarburos de fondos marinos

Las inspecciones realizadas por buzos profesionales detectaron la acumulación de residuos de fuel procedentes del vertido del *Prestige* en distintas zonas de los fondos marinos del Parque Nacional, fundamentalmente en zonas infralitorales sedimentarias. Los muestreos ponían de manifiesto que la deposición de estos residuos afectaba a bancos marisqueros explotados tradicionalmente por las cofradías del entorno, así como a diversos ecosistemas propios de los fondos marinos de las aguas atlánticas, cuyo grado de conservación había motivado, entre otros aspectos, la declaración



Figura 11. Infralitoral con depósitos de fuel (Foto: CIS, S.L.)



Figura 12. Extracción manual de residuos en infralitoral (Foto: CIS, S.L.)



Figura 13. Infralitoral con depósitos de fuel (Foto: CIS, S.L.)

del Parque Nacional marítimo-terrestre. Vista la problemática se tomó la decisión, acordada entre la Xunta de Galicia y la Administración General del Estado, coordinadas por la Comisión del Gobierno para las actuaciones derivadas de la catástrofe del buque *Prestige*, de proceder a la retirada de dichos residuos, siempre evaluando que el impacto de las técnicas de retirada no superara al impacto ya producido por la propia deposición de los residuos. Se recurrió siempre a técnicas que minimizaran el impacto de la retirada y garantizaran la seguridad de los buceadores que trabajaran en esas labores. Trabajando conjuntamente con la Consellería de Pesca y Asuntos Marítimos y la Armada, así como otros cuerpos de buceadores (Guardia Civil, Bomberos, Cruz Roja, profesionales de las cofradías), hasta finales de septiembre se extrajeron todos los residuos localizados y accesibles, hasta un total de 1.608,285 Tm. Dicho residuo es una mezcla de arena-residuos de fuel-restos biológicos (algas, restos bioclásticos, etc.) y agua.

Con la colaboración del buque BSR *Neptuno* de la Armada, que aportó una dotación que osciló entre dos a seis parejas de buceadores y robots submarinos, se realizó la exploración y catas en los archipiélagos que forman el Parque Nacional, en profundidades superiores a los 15 metros (con buceadores entre los 15 y 30 mts. y con catas con robot submarino entre los 25 y 60 mts.). A su vez, una Asistencia Técnica de Parques Nacionales, mediante la utilización de otros robots submarinos, complementó esta prospección en otras zonas. En ninguna de las exploraciones encontraron residuos apreciables de fuel.

En la primavera de año 2004, consecuencia de las inspecciones realizadas, en el mes de junio se pudo observar como en la zona Sur de la Playa infralitoral se descubrían algunas de estas manchas, junto con restos de bolsas y utensilios de limpieza utilizados en los trabajos del año 2003. La hipótesis de trabajo de la causa por la que en esta primavera se presenta el fuel al descubierto es que las arenas que lo cubrían fueron movilizadas por la dinámica litoral de esta época del año pero quedaron retenidas en la depresión ocasionada por las labores de dragado que afectó a buena parte del Norte de la infralitoral de esta playa. Es pues este intento de reequilibrio de áridos el que parece ser el causante de esta situación. La zona ocupaba unos 21.960 m².

La cuantificación el fuel actualmente visible en los fondos de la Playa de Figueiras: Zona Sur, 9.560 m² de infralitoral sedimentario, y Borde Norte (Cantareiras) con planchas que ocupan aproximadamente 20.000 m² de infralitoral sedimentario. Se procedió a su retirada mediante el trabajo de buzos profesionales durante el verano del año 2004, con una extracción de aproximadamente 8.000 Kg.

Biorremediación en zonas costeras rocosas (intermareal y supralitoral)

La biorrecuperación, o potenciación de los procesos naturales de biodegradación del petróleo tiene una utilidad muy clara una vez que los métodos mecánicos de recogida del contaminante pierden eficacia. Básicamente consiste en la adición en las áreas afectadas de los nutrientes auxiliares (N, P, Fe, etc.) y otros activadores del crecimiento bacteriano que favorezcan el desarrollo de especies petroleolíticas autóctonas, o bien reforzar mediante la siembra en las áreas afectadas de bacterias petroleolítica de origen silvestre, autóctono o alóctono. Desde mediados del siglo pasado vienen ingresando en el mar, procedentes de diversas fuentes de contaminación, unos cinco millones de toneladas de petróleo por año, lo que hubiera dado ya lugar a una situación imposible de ignorar si los hidrocarburos fuesen tan poco biodegradables como –por ejemplo– algunos insecticidas clorados, o los bifenilos, terfenilos o nftalenos policlorados. Ello demuestra que la biosfera metaboliza los diferentes componentes de los crudos.

En el Parque Nacional marítimo-terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia se localizaron diversos espacios cuya configuración física (playas de cantos, anfractuosidades y hendiduras rocosas) los hace prácticamente inaccesibles a los métodos mecánicos de limpieza, por lo que la alternativa más razonable parece, en estos casos, la biorrecuperación. Cuando la aplicación de este procedimiento, que admite varias modalidades, se somete a las restricciones de seguridad adecuadas, su riesgo biológico puede considerarse nulo.

Se implementó, en colaboración con el CSIC, un primer proyecto experimental consistente en comparar, dentro de una playa de cantos aislada, en la isla de Sálvora. Este proyecto fue coordinado por el Organismo Autónomo Parques Nacionales y los Doctores Miguel Anxo Murado y Antonio Figueras, investigadores del Instituto de Investigaciones Mariñas de Vigo (CSIC) que dispuso del equipo e infraestructuras básicas necesarias para la ejecución.

Los resultados a los 80 días de iniciadas las primeras aplicaciones indicaron que es un proceso que funciona, en el caso del producto elegido para la biorremediación (S-200) constituye un recurso eficaz, que permite recuperar el aspecto de los roquedales, sin implicaciones toxicológicas colaterales, en un periodo aproximado de 12 meses en condiciones óptimas. El problema fundamental es la alta proporción de asfaltenos del fuel vertido por el *Prestige* que son los productos más difíciles de degradar por los organismos, aunque es un residuo de escasa toxicidad o biodisponibilidad. A partir de dichos resultados, y tras analizarlos se ha tomado la decisión de



Figura 14. Aplicación del método de biorremediación (Foto: Instituto de Investigaciones Mariñas, CSIC)

aplicar dicha técnica para limpiar las superficies del intermareal rocoso que aún quedan manchadas de fuel (aproximadamente unas dos hectáreas). Dicha aplicación, que comenzó entre finales de diciembre, enero y principios de febrero, en función tipología de las zonas.

Colocación de barreras anticontaminación

Se colocaron barreras anticontaminación del tipo «absorbente» y modelo oceánico con una longitud de unos 200 metros en la zona de la Playa do Almacén (Sálvora), 300 metros en la zona norte de la Playa de Rodas (Cíes), y 300 metros en la zona del puerto y Area dos Cans (Ons), para constituir una zona protegida libre de fuel que actuara como refugio para aves.

Durante el mes de diciembre se colocaron dos barreras, en coordinación con la Xunta de Galicia, en el Archipiélago de Cíes; una en el Sur de la isla de San Martiño (en el entorno de Cabo Bicos) y otra en el área de la Penela dos Viños. Estas dos últimas, según lo acordado con científicos de la Facultad de Ciencias del Mar (Universidad de Vigo), para la protección de comunidades marinas que sirvan como focos de recolonización para las zonas afectadas.

En general las barreras han sido efectivas en tanto que la fuerza del mar (temporales, mar de fondo, etc.) no ha acabado por romper la mayoría de ellas. Además, la

misma Facultad, en coordinación con el Organismo Autónomo Parques Nacionales colocó dos barreras experimentales para proteger el área occidental de O Lagoa dos Nenos ente las Islas de Monteagudo y del faro en Cíes.

Situación actual

Tras un duro trabajo, **49.000 jornadas** de trabajo entre voluntarios, Fuerzas Armadas, personal de TRAGSA, de la Xunta de Galicia, y del Organismo Autónomo Parques Nacionales, se han extraído **4.589,9 toneladas** de residuos procedentes de la contaminación por hidrocarburos en playas y rocas del Parque Nacional (a sumar a las aproximadamente 1.615 Tm de residuos de los fondos marinos).

En estos momentos, y salvo la superficie que está siendo limpiada con técnicas de biorremediación, en el resto del Parque Nacional (tanto en su parte marítima como terrestre) se han limpiado todas las zonas afectadas, aún cuando se mantiene la vigilancia, sobre todo en los fondos marinos, donde un equipo de buceadores profesionales continúa vigilando por si apareciera alguna mancha oculta hasta el momento. En estos momentos la actividad diaria del Parque Nacional se ha normalizado en la gestión de la singularidad y riqueza natural de las Islas Atlánticas, que constituye un patrimonio natural y cultural de indudable valor científico, estético y educativo.

No hay que olvidar los efectos que esta catástrofe ha podido producir en los ecosistemas del Parque Nacional, por lo que en noviembre del 2003, el Ministerio de Medio Ambiente, a través de la Fundación Parques Nacionales, ha adjudicado mediante concurso abierto un contrato de asistencia técnica para la evaluación y seguimiento de los daños del vertido del *Prestige* en el Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia y otros espacios protegidos de relevancia comunitaria, por un importe de 1.234.625,00 euros. Dicho estudio tiene una duración de 3 años; tras su finalización, se deberá emitir un informe técnico-científico que evalúe los daños producidos, establezca las medidas de su regeneración, y emita un programa para la vigilancia y minimización de futuros episodios de contaminación por hidrocarburos en las aguas del Parque Nacional.

Efectos sobre los ecosistemas

Durante Desde la llegada al Parque Nacional Islas Atlánticas de las manchas de fuel, Parques Nacionales puso en marcha un operativo de recogida y seguimiento de la avifauna a lo largo del archipiélago.

Se habilitaron 3 dependencias, una en Cíes, otra en Ons y otra en Sálvora, atendidas por personal especializado en la recuperación de aves, bajo la coordinación de un veterinario especialista en fauna silvestre. Las actuaciones realizadas en las dependencias veterinarias de cada isla consistieron en una estabilización de las constantes



Figura 15. Comparativa o bufardo (Fotos: José María Pérez de Ayala)

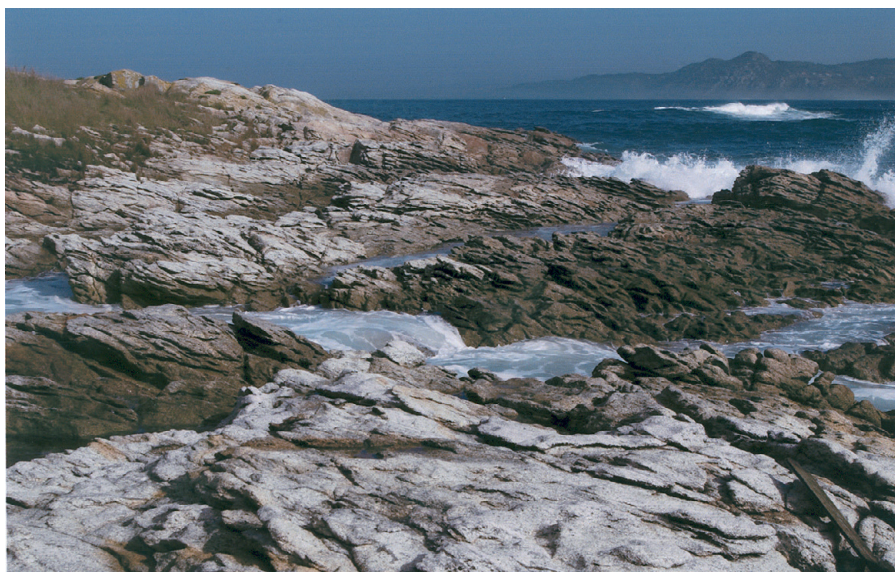




Figura 16. Comparativa Costa da Cantadeira (Foto: José María Pérez de Ayala)





Figura 17. Comparativa Praia das Margaritas (Foto: José María Pérez de Ayala)





Figura 18. Detalle instalación de estabilización de aves petroleadas (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 19. Frailecillos petroleados (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 20. Cormorán petroleado (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)



Figura 21. Ave petroleada (Foto: Parque Nacional Islas Atlánticas de Galicia)

corporales según el protocolo acordado entre la administración y entidades implicadas. Dicho proceso consiste en la hidratación y estabilización térmica del ave, para ser posteriormente trasladaron al Centro de Recuperación de «O Campiño» (Pontevedra), donde se procedía a su recuperación. Actualmente, y tras la clausura de este centro, las pocas aves encontradas actualmente, 3 en el último mes, se trasladaban al centro que de manera regular tiene la Xunta tenía habilitado al efecto.

Desde principios de marzo de 2003, y tras una bajada sustancial del número de aves petroleadas encontradas, se procedió a cerrar estas instalaciones en las islas. Actualmente se procede a realizar regularmente un reconocimiento in situ de las zonas más inaccesibles (calas y pequeños islotes) utilizando embarcaciones ligeras (planeadoras y zodiac). Tras localizar algún ave petroleada, se pone en conocimiento de la autoridad competente en fauna y flora silvestre, en este caso la Xunta de Galicia, quien nos indica a qué centro de recuperación de fauna silvestre debemos dar traslado al animal.

En dichas dependencias se han atendido hasta la fecha un total de 196 aves petroleadas entre vivas y muertas. Con posterioridad se han recuperado y enviado a Centros de Recuperación de Fauna Silvestre de la Xunta de Galicia 6 aves petroleadas, afectando a especies como Cormorán moñudo (*Phalacrocorax aristotelis*), Arao común (*Uria aalge*), Alca (*Alca torda*), Gaviota patiamarilla (*Larus michahellis*), Gaviota sombría (*Larus fuscus*), Frailecillo (*Fratercula arctica*), Alcatraz (*Sula bassana*), Cormorán grande (*Phalacrocorax carbo*), Gaviota reidora (*Larus ridibundus*), Gavión (*Larus marinus*), Negrón común (*Melanitta nigra*), y Paloma doméstica (*Columba livia* var. *Doméstica*).

El domingo, 4 de abril, por la mañana, se recibieron avisos (de nuestra propia guardería) de la llegada de aves petroleadas. Se confirmó posteriormente que era consecuencia de una limpieza ilegal de tanques en el corredor marítimo de Fisterra. Se localizaron 138 Araos, 44 Alcas, 11 Frailecillos y 1 Cormorán moñudo, en total 194 aves petroleadas, de las cuales 30 se hallaron muertas, trasladando el resto al centro de Centro de Recuperación de Fauna de Cotorredondo.

De primer avance de la asistencia técnica para la evaluación y seguimiento de los daños del vertido del *Prestige* en el Parque Nacional de las Islas Atlánticas de Galicia y otros espacios protegidos de relevancia comunitaria, y sin pretender dar valoraciones definitivas ni ser un diagnóstico del estado de conservación, sino sólo un conjunto de observaciones preliminares en base a los resultados obtenidos hasta el primer semestre de 2004, se nota que las comunidades de intermareal superior han sido las más afectadas por el fuel, si bien suelen tener bajas densidades de organismos y una baja riqueza específica. Están dominadas por lapas, cirrípedos y *Verrucaria maura*. Esta zona ha sido también la más castigada por las acciones de limpieza. A continuación se describen aquellas observaciones más destacadas.

En la zona intermareal se nota la falta del horizonte de *Mastocarpus stellatus* (alga rodofícea), característico de la intermareal media en costas semiexpuestas. Tampoco se ha encontrado el horizonte de *Chondrus crispus* (otra rodofícea) típico de la intermareal inferior de costas expuestas, tan sólo ejemplares aislados en algunas zonas. Aparecen horizontes puntuales con escasa amplitud de *Fucus*, faltando en

varias zonas de la intermareal media en costas protegidas-semiexpuestas. Finalmente, no se ha encontrado el alga parda *Himanthalia elongata*, que formas horizontes muy definidos en la intermareal inferior de costas semiexpuestas.

En la zona submareal no se han encontrado ejemplares grandes de algas pardas, en concreto de las especies *Laminaria hyperborea*, *Laminaria ochroleuca*, que forman junto con *Saccorhiza polyschides* los bosques mixtos de laminariales fundamentalmente en la cara Oeste de las islas. Únicamente aparecen ejemplares de pequeño porte de *Laminaria* sp., así como rizoides con estipe destrozado en el ápice de *Laminaria hyperborea*.

Falkenbergia rufolanosa, especie alóctona con gran capacidad de absorción de nutrientes y de crecimiento rápido, ha desarrollado amplios horizontes en el sotobosque de *Saccorhiza polyschides*. Por otra parte, se ha comprobado la falta del alga roja *Gelidium sesquipedale* en paredes de costas expuestas, que en algunos han sido sustituidas por *Falkenbergia rufolanosa*.

Algunas especies características sólo se encuentran puntualmente, como el alga roja *Sphaerococcus coronopifolius* o el equinodermo (crinoideo) *Antedon bifida*. De Otras especies aparecen ejemplares en un porcentaje elevado muertas, como el antozoo *Alcyonium digitatum*. Algunos «fondos» característicos, como los de ofiura (*Ophicomina nigra*) en el margen Este de Cíes y Ons, se han rarificado.

Finalmente, el bentos sésil (poríferos, antozoos, ascidias, etc.) que presentaban un recubrimiento amplio en las paredes de las márgenes Oeste de las islas, presentan ahora menor densidad y riqueza específica.

Todavía es pronto para hacer una valoración global. Hay que esperar a que todos los estudios que han comenzado para valorar el impacto del vertido del buque finalicen y establezcan sus conclusiones para poder realizar un diagnóstico sobre el impacto que este vertido ha tenido sobre los ecosistemas del Parque Nacional.

Reflexiones finales

El Parque Nacional marítimo-terrestre de las Islas Atlánticas de Galicia debe mucho a la sociedad civil, que articulándose en grupos de voluntarios ayudó a que la imagen del Parque sea la actual, y no el negro del chapapote. También debe mucho a los compañeros de los otros 12 Parques Nacionales, Centros gestionados por el Organismo Autónomo Parques Nacionales, y compañeros del Ministerio de Medio Ambiente, cuya ayuda fue inmensa e impagable. El Parque Nacional también agradece la ayuda de los trabajadores de la Xunta de Galicia que colaboraron en todo momento, así como a las Fuerzas Armadas, que desde el principio (con la llegada de los Caballeros Cadetes de la Escuela Naval Militar de Marín) prestaron su esfuerzo a estas labores de limpieza. No hay que olvidar a los compañeros de la empresa Tragsa, con cuyo apoyo contamos a lo largo de esta andadura. Finalmente no hay que olvidar a numerosos miembros de la comunidad científica, que no sólo con su esfuerzo como voluntarios, sino con sus conocimientos colaboraron, con su espíritu crítico, a las labores que se llevaron a cabo en el Parque Nacional.

La actual legislación internacional, que permite que naveguen cerca de nuestras costas esos buques inseguros y peligrosos, es inadecuada y pone en un peligro los ecosistemas marinos de nuestras costas, así como la fuente de ingresos de una importante fracción de la población que depende del mar para su supervivencia. Es de desear que en un futuro próximo, los organismos internacionales y las naciones tomen conciencia de esta amenaza constante y provoquen un cambio en la legislación.

Sería necesario también un incremento de los sistemas de vigilancia e inspección, que permitieran detectar estos vertidos y localizar a los infractores para poder aplicarles la legislación vigente, y deshacer ese sentimiento que nos invade de la impunidad de los delitos ecológicos en el mar.

La catástrofe del *Prestige* ha puesto de manifiesto la necesidad de una buena coordinación cuando ocurren desastres ecológicos como éste. Toda catástrofe es, por definición, imprevisible y poco controlable en sus primeros estadios, pero una adecuada colaboración entre administraciones competentes, un flujo de información adecuado y suficiente, así como unos adecuados planes de contingencia son necesarios para afrontar estos eventos, y transformar esa imprevisibilidad inicial en un trabajo organizado, eficaz y eficiente.

Esta catástrofe también ha puesto de manifiesto el grado de desconocimiento que se tiene actualmente del medio marino, aún cuando representa un porcentaje elevado de la riqueza natural y económica de nuestro país. Se hace evidente que se necesita un incremento del esfuerzo investigador en oceanografía y en concreto en biología marina, ya que del conocimiento parte cualquier intento de regulación gestión en el medio marino, y de una adecuada gestión y regulación saldrán las medidas que permitan afrontar eventos como la catástrofe del buque *Prestige*.

Finalmente, el vertido contaminante de este petrolero ha despertado la conciencia ecológica de un sector de la sociedad, lo que es un efecto positivo entre tantos negativos. Esperemos que dicha conciencia no se vuelva a adormecer y permita que la sociedad mantenga a las Administraciones en permanente alerta contra cualquier impacto sobre el medio natural.

RECUPERACIÓN DEL FUEL DEL BUQUE PETROLERO *PRESTIGE*

RAMÓN HERNÁN PAADIN

El 13 de noviembre de 2002, a 30 millas de las costas de Galicia, el Buque *Prestige*, cargado con 77 mil toneladas de fuelóleo pesado, lanzó un SOS. Los dispositivos de salvamento marítimo rescataron inmediatamente a la tripulación y seis días más tarde, a 150 millas de distancia de la costa, el buque se partió en dos y se hundió.

Una gran cantidad de fuel fue vertida al mar, afectando gravemente a las costas gallegas y en menor grado al resto de costas del norte de España e incluso del sur de Francia.

Entre diciembre de 2002 y febrero de 2003, el mini-submarino francés *Nautilus*, contratado por la Administración Española, trabajó en el sellado de las fugas existentes en el buque hundido.

ENCARGO A REPSOL YPF

Un Comité Científico Asesor nombrado por el Gobierno Español, estudió las diferentes medidas de actuación, recomendando intentar la extracción del fuel por bombeo y proponiendo como alternativa el confinamiento del pecio en cofres rígidos. El Comité recomendó encargar a Repsol YPF el estudio y ejecución del proyecto, dada la experiencia de la Compañía en la exploración y producción de hidrocarburos en el mar.

El 14 de febrero de 2003, el Gobierno encargó a Repsol YPF el estudio de la viabilidad técnica de las soluciones propuestas, fijando un plazo de tres meses para emitir una recomendación final.

Pese a no existir ningún tipo de relación entre Repsol YPF y el buque hundido o su carga, la Compañía, por su compromiso con el medio ambiente y con la sociedad, aceptó el encargo.

El proyecto ha supuesto un desafío de gran responsabilidad y un reto tecnológico sin precedentes, tanto por la profundidad del pecio, como por el desconocimiento del volumen de fuel existente en los tanques del buque hundido y de su comportamiento en las condiciones de presión y temperatura del fondo marino.

Para afrontar este reto, un grupo de expertos en Ingeniería de Aguas Profundas de Repsol YPF inició los trabajos, formando un Comité Internacional de Asesoramiento con la participación de BP, Total, Petrobras, ENI y Statoil. El Comité evaluó las posibles opciones y emitió recomendaciones de actuación inmediata en el mes de marzo.

EL PROYECTO 2003

La propuesta técnica de Repsol YPF para el verano del 2003 incluía los siguientes puntos fundamentales:

- Sellado de todas las fugas existentes, confinando el fuel en el propio buque.
- Medida de niveles y volúmenes del fuel contenido en los tanques
- Realización de pruebas piloto de extracción del fuel, mediante recolección en bolsas lanzadera, que por diferencia de densidad, ascenderían a la superficie.
- Como medida alternativa se planteó el desarrollo de la ingeniería básica para el diseño, fabricación e instalación de un nuevo concepto de confinamiento: una «Marquesina» removable, accesible por robots, capaz de retener todo el fuel contenido en el buque y equipada con una cámara para su extracción.

Estos objetivos requerían tareas como el desarrollo de robots capaces de operar a 4000 m de profundidad, la adquisición de datos del barco, del fuel y del medio, la caracterización geológica y geotécnica del fondo marino, el análisis y simulación de las propiedades del fuel en condiciones de fondo y el estudio de la integridad y estabilidad del pecio.

Ninguna de las acciones presentadas anteriormente había sido jamás intentada en buques hundidos, ni siquiera en profundidades muy inferiores, existiendo hasta ese momento experiencia con robots de trabajo sólo hasta los 2500 m bajo la superficie del mar.

El 24 de abril se firmó el convenio entre la Administración Española y Repsol YPF para la ejecución del Plan de Acción propuesto.

Repsol YPF seleccionó a la compañía Sonsub como principal contratista del proyecto. Se adaptaron cuatro robots capaces de operar a 4000 metros de profundidad y se contrató el buque *Polar Prince*, capaz de contener los cuatro robots y dotado de sistemas de posicionamiento dinámico.

ROBOTS

Mientras tanto, en la localidad escocesa de Aberdeen, expertos de Repsol YPF estudiaron la adaptación de herramientas de medida de niveles de fluido en pozos petroleros, para su posterior utilización en la medición de la cantidad de fuel existente en el *Prestige*.

Figura 1. ROV's Innovator (ENI-Sonsub) y G4 (Thales Geolsolutions) Minisubmarinos No Tripulados



Gracias a los estudios de caracterización reológica del fuel realizados en la Universidad de Huelva el Centro de Tecnología de Repsol YPF en Móstoles, (CTR), consiguió crear un fuel sintético que presentaba en superficie propiedades análogas a las del fuel en el fondo marino.

CAMPAÑA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El *Polar Prince* llegó a la vertical del *Prestige* el día 4 de julio, y en pocos días los cuatro robots probaron su capacidad de trabajo a 4000 m bajo el nivel del mar. Las fugas fueron localizadas, numeradas, cuantificadas y finalmente selladas.

Una vez concluida esta operación de sellado, las fugas pueden considerarse de mínimas a nulas, con un caudal total inferior a 10 litros/día, tanto en la proa como en la popa. Cabe recordar que la situación inicial fue cuantificada en 700 litros/día.

Para la medida de los niveles y cantidades de fuel existentes en los tanques del *Prestige*, se empleó una herramienta llamada «Neutrón Térmico», utilizada en los sondeos de exploración de hidrocarburos y especialmente modificada con el fin de poder ser manipulada por los robots en el mar. Mediante estos trabajos se comprobó la existencia de 13.100 toneladas en la proa y de 700 en la popa.

Las técnicas utilizadas en el sellado de fugas y en la medición de niveles y volúmenes de fuel, son pioneras en cuanto a su aplicación en tanques de barcos hundidos a gran profundidad, y representan un importante avance tecnológico.

Posteriormente siguieron trabajos de batimetría de precisión, obteniéndose imágenes de alta definición de la ubicación del buque hundido, se realizaron pruebas de penetración en el fondo marino y se tomaron testigos útiles para los estudios geológicos y geotécnicos del entorno.



Figura 2. Buque *Polar Prince* dotado de sistema de posicionamiento dinámico y capaz de operar hasta cuatro ROV's simultáneamente

Figura 3. Pruebas e inspección de las Bolsas Lanzadera en tierra



EXTRACCIÓN DEL FUEL MEDIANTE BOLSAS LANZADERAS (PRUEBA PILOTO)

Una vez selladas las fugas, conocida la cantidad de fuel presente en los pecios y su ubicación, comenzó la prueba piloto de extracción del fuel mediante bolsas lanzadera.

El buque sumergible *Enterprise* fue contratado por Repsol YPF para la carga y transporte de las bolsas lanzadera, lo que permitió realizar numerosas pruebas de su recepción y trincaje en mar abierto.

El procedimiento conocido como «Hot Tapping» ha sido utilizado para la perforación de la cubierta del *Prestige*. Para ello se ha diseñado especialmente para este proyecto un equipo que instala una doble válvula, previamente a la perforación del casco del buque. El 30 de septiembre, la válvula de extracción fue instalada con éxito en el tanque P1 de la proa del *Prestige*, quedando cerrada esperando la prueba de extracción.

La Bolsa Lanzadera fue acoplada a la válvula instalada y el día 12 de octubre se inició la fase de extracción, la cual se prolongó 18 horas. El comportamiento del fuel se ajustó a los cálculos y previsiones, recuperándose un volumen de fuel de 125 Tm., suficiente para los objetivos de esta fase de prueba.

El día 16 de octubre se reflató la bolsa y se transfirió al buque *Enterprise*, que, tras recibirla, se encaminó al puerto de El Ferrol. Toda la operación se completó sin producirse ningún vertido en el mar. Desde El Ferrol el fuel fue transportado por carretera hasta la refinería de Repsol YPF en La Coruña, donde se había preparado un tanque equipado con calentadores para su recepción y tratamiento.

El proyecto ejecutado en el año 2003 tuvo un coste final de 31,5 millones de Euros.

Figura 4. Herramienta para «Hot Tapping». Equipo diseñado para operar a 4.000 m de profundidad

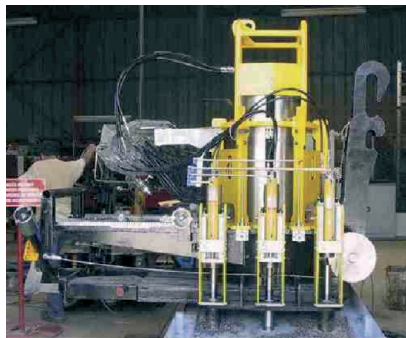


Figura 5. Salida de Fuel a través de la válvula de doble puerta instalada e ingreso del Fuel a la Bolsa Lanzadera, durante la Prueba Piloto de Extracción



PROYECTO DE EXTRACCIÓN DEL FUEL EN 2004

Después del éxito de la prueba piloto descrita anteriormente Repsol YPF realizó un análisis exhaustivo de la misma con objeto de proponer el proyecto final de extracción a la Administración española.

Este análisis se realizó durante los meses de octubre y noviembre con las siguientes conclusiones:

- Las operaciones submarinas realizadas sobre el pecio habían sido un éxito debido a la alta calidad de los robots, la excelente visibilidad y la ausencia de corrientes.
- El ascenso y descenso de las lanzaderas tampoco presentó problema alguno y se realizaron en tiempos cortos: 3-4 horas y con seguridad total.
- Sin embargo el manejo de las lanzaderas en superficie y su traslado al buque Enterprise se revelaba como una maniobra muy dependiente de las condiciones mete oceanográficas.



Figura 6. Lanzadera rígida. Capacidad 350 m³; longitud 23; diámetro 5 m.



Figura 7. Flujo anular

Basado en el análisis anterior se analizó la posibilidad de mantener la lanzadera siempre sumergida y realizar la descarga del fuel *in situ*, bombeando el mismo desde las lanzaderas a un buque tanque.

Estas consideraciones implicaban la principal modificación del proyecto original ya que las lanzaderas deberían ser rígidas.

Se decidió que el material más seguro y ligero era el aluminio marino y el volumen óptimo 350 m³.

Las lanzaderas dispondrían de elementos de flotación, de válvulas en el tope y posibilidad de acople de un sistema de bombeo; la aproximación final al pecio sería controlada con un cable y cabestrante; por último la zona de ingreso del fuel por la parte inferior de la lanzadera debía ser a través de grandes compuertas de 2 x 2 m para asegurar el ingreso continuo y sin restricciones del fluido.

El proyecto fue aprobado por la Administración española en diciembre 2003 y se encargó a la compañía gallega Aister la fabricación de 5 lanzaderas rígidas con las características descritas.

Otro gran éxito de la ingeniería del proyecto 2004 ha sido el diseño de un sistema de bombeo de un fluido viscoso en extremo, de una lanzadera situada a 50 m bajo el nivel del mar hasta el buque tanque.

Figura 8. Buque tanque *Odín*

Este sistema, denominado flujo anular, consiste en colocar una bomba de desplazamiento positivo con unos inyectores perimetrales en los que puede inyectarse gasoil o agua. El flujo se establece manteniéndose el fuel rodeado por una película de agua o gasóleo que impiden su rozamiento con las paredes de la tubería. El fuel de alta viscosidad avanza en forma continua como un cilindro plástico en el interior del anular así creado.

En la refinería de Repsol YPF en La Coruña se fabricó un sintético que presentaba las mismas características de viscosidad y adherencia del fuel. Las pruebas de flujo anular fueron un éxito y se alcanzaron caudales de 60 a 80 m³/hora con longitudes de tubería de 60 m y hasta 20 m de desnivel. Se había resuelto así de forma satisfactoria un nuevo reto técnico.

Por último se completó un plan de contingencias y plan de emergencia para el proyecto conforme a los estándares más exigentes de la industria petrolera; se contrató, de nuevo, el buque *Polar Prince*, de la compañía Sonsub, con tres robots Innovator y el buque tanque *Odín* de la compañía Statoil con un robot Triton para aguas someras.

OPERACIONES MARINAS 2004

La campaña del 2004 comenzó el 9 de mayo y después de probar con éxito el funcionamiento de los Innovators a 4000 m se realizaron las operaciones de «hot tapping», consiguiéndose la instalación de cuatro válvulas en los principales tanques del pecio en los primeros días de junio.

La primera lanzadera, Galician 1, se llenó con 300 T. de fuel el 4 de junio y al día siguiente se descargó con caudales de unos 70 m³/h en el buque tanque *Odín*.

Hasta el 20 de junio se trabajó sólo con esta lanzadera y se habían extraído ya 1000 T. de fuel.

A partir de esa fecha comenzó la extracción dual (con dos lanzaderas, la Galician 1 y 3). Al 30 de junio el volumen acumulado de fuel extraído alcanzó las 2500 Toneladas.

La operación continúa al ritmo previsto y se espera finalizar la extracción a finales de septiembre para realizar entonces las operaciones de la biorremediación con objeto de neutralizar el fuel remanente.

ÍNDICE DE AUTORES

EMILIO LORA-TAMAYO D'OCÓN

Prof. UAB

Instituto de Microelectronica de Barcelona - CNM (CSIC)

Campus Universidad Autonoma de Barcelona

08193 Bellaterra (Barcelona) - SPAIN

Phone: +34 93 594 77 00 (ext. 1222) Fax: +34 93 580 14 96

JOAQUIN TINTORÉ

Director del IMEDEA (CSIC-UIB)

C/ Miquel Marqués, 21

E-07190 Esporles (Mallorca)

Tel: +34 971 61 17 16 - Fax: +34 971 61 17 61

email: imedeadir@uib.es

FIZ F. PEREZ

Profesor de Investigación (Research Professor)

Departamento de Oceanografía

Instituto Investigaciones Marinas (CSIC)

Eduardo Cabello 6, E36208 VIGO (SPAIN)

Tel: +34 986 231930 Ext 360 - Fax: +34 986 292762

Email: fiz.perez@iim.csic.es

J. ALBAIGÉS

Department of Environmental Chemistry

CID-CSIC

Jordi Girona Salgado, 18-26

08034-Barcelona (Spain)

Tel: +34 93 4006152 - Fax: +34 93 2045904

E-mail: al bqam@cid.csic.es

ANTONIO FIGUERAS

Instituto Investigaciones Marinas. CSIC.

Eduardo Cabello, 6

36208 Vigo (Spain)

Phone (Direct line): +34 986 21 44 62

Phone: +34 986 23 19 30 - Fax: +34 986 29 27 62

e mail: pato1@iim.csic.es

FRANCISCO SÁNCHEZ DELGADO

Instituto Español de Oceanografía

Apartado 240,

39080 Santander, Spain

Tfno: +34 942 291060 / 942 291066 - Fax: +34 942 275072

e-mail: f.sanchez@st.ieo.es

EMILIO ESTEBAN RODRÍGUEZ MERINO

Consejero Técnico

División de Estudios y Planificación

CEPRECO

Ministerio de la Presidencia

Dique Barrié de la Maza, s/n

15071 A Coruña

Teléfono: +34 981 218278 - Fax: +34 981 218284

mailto: EmilioRodriguez@mpr.es

RAMÓN HERNÁN PAADÍN

REPSOL Exploración, S.A.

Paseo de la Castellana, 280 - 4º Planta

28046 MADRID

Telf. +34 91 348 80 00

e-mail: rhernan@repsolypf.com

Este libro terminó de imprimirse en
diciembre de 2005 bajo el cuidado de
Servicios Integrales de Edición Távara, S.L.

