

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. PROBLEMAS DE LA CONTAMINACIÓN DEL MEDITERRÁNEO NOROCCIDENTAL

2.1.1. Peligros actuales de contaminación múltiple en el litoral y en alta mar del Mediterráneo Noroccidental (MN)

Las mayores causas de la contaminación del litoral del MN son las aguas residuales procedentes de las costas y los derrames accidentales o a propósito de sustancias petroquímicas tanto en alta mar como en las áreas portuarias. Esta última causa está relacionada principalmente con el tráfico marítimo de estos productos peligrosos mediante petroleros, con los trabajos operacionales portuarios y con la explotación de petróleo mediante las plataformas de alta mar. Accidentes técnicos, descarga de los residuos y de aguas de lastre determinan la aparición constante de derrames y estelas de crudo en las aguas costeras y en las playas esta contaminación se refleja en las pequeñas bolas de crudo descompuesto.

Los penachos detectados cerca de la costa, sin embargo, se deben principalmente a las fuentes de contaminación habitual como son los deltas de los principales ríos regionales: Ebro, Llobregat, Besós, Rhone, etc., cuyas aguas incluyen productos químicos industriales, pesticidas y fertilizantes agrícolas, los emisarios submarinos de las ciudades costeras y las fuentes costeras puntuales asociados con el turismo y la construcción descontrolada (Figura 2.1.1).

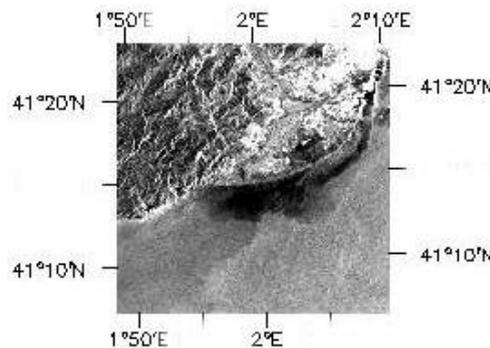


Figura 2.1.1. Imagen del Radar de Apertura Sintética SAR del ERS-1 del 06.12.96. Un penacho de aguas con productos tensioactivos procedente del Río Llobregat, Barcelona.

Las aguas urbano-industriales contienen hidrocarburos aromáticos policíclicos (procedentes de vertidos de hidrocarburos fósiles o de procesos de combustión), compuestos orgánicos persistentes y tóxicos (bifenilos policlorados, PCBs, dibenzo-*p*-dioxinas, PCDD y dibenzo-*p*-furanos, PCDEs). Los PCDD y los PCDE proceden mayoritariamente de procesos de combustión (incineradoras, vehículos) y son subproductos de procesos industriales (papeleras, fabricación de clorofenoles y fenoxiácidos). También son de interés como trazadores moleculares de la contaminación urbana, los esteroides de origen fecal (coprostanol) y los tensioactivos y sus derivados (trialquilaminas, alquilbencenos y alquilbencenos sulfonados).

En los suelos agrícolas del área de Barcelona, según consta el *“Atlas ambiental de l'àrea de Barcelona”* (Acebillo et al., 2000), la mayor parte de la contaminación está originada por factores asociados a la propia actividad agrícola, fundamentalmente por la aplicación inadecuada de fertilizantes minerales de N, P, K de plaguicidas y de residuos ganaderos. Los plaguicidas mal aplicados afectan negativamente a la calidad biológica del suelo y a la calidad del agua. La aplicación de fertilizantes minerales es especialmente intensa en los cultivos de regadío y de fruta dulce, que predominan en el

Maresme y en el Baix Llobregat, y su aplicación en cantidades excesivas, en formas químicas incorrectas o en momentos inadecuados, puede generar *in situ* acidificación, incorporación de metales pesados e incluso incremento de salinidad en zonas de secano. Todo esto, transmitidos a los cauces de agua, generan riesgo de eutrofización acuática.

Entre las fuentes puntuales se encuentra la desembocadura de la Estación Depuradora de Aguas Residuales urbanas (EDAR) de Sant Adrià del Besòs, donde se trata el 60% de las aguas residuales de Barcelona. Los efluentes derivados son vertidos al mar a través de dos emisarios. El de aguas, vierte a 3 Km de la línea de costa con un caudal de 4,5 m³/s. El de fangos, vierte a 4 Km de la costa, a unos 55 m de profundidad y con un aporte de 14 x 10³ toneladas (en peso húmedo) de fango anuales (Acebillo et al., 2000).

El Llobregat es otra importante fuente de contaminación litoral. Según datos del Departament de Medi Ambient, el 60% de las aguas residuales urbanas que transporta no han sido depuradas. También la situación de las rieras del Maresme es muy deficiente, ya que la mayoría vierten directamente, vía emisario, a la plataforma continental.

La detección y seguimiento desde el espacio de la contaminación dentro de las áreas acuáticas portuarias es más difícil debido a su menor escala, pero es posible extender la zona controlada por la autoridad portuaria al área de fondeo. Las principales causas de los vertidos de hidrocarburos a las aguas portuarias son los siguientes: carga y descarga de buque a terminal, necesidad de deslastre, suministro de combustible, operaciones de recepción de residuos oleosos, vertidos desde instalaciones de almacenamiento de tierra, accidentes, utilización de aceites lubricantes y agentes bióxidos contenidos en las pinturas náuticas. Entre éstos, el más utilizado en España, a pesar de su significativo efecto xenobiótico, es el tributilo de estaño (TBT), cuyo uso está sometido a legislación restrictiva en muchos países. Derivados de estos productos han sido identificados tanto en los sedimentos del puerto de Barcelona como en las aguas del puerto de Masnou (Albaigés et al., 2000).

Los resultados del análisis de imágenes SAR de los años 1996-1998, adquiridos mediante el proyecto *Clean Seas* y otros, permitieron apreciar las rutas marítimas habituales de los barcos-petroleros que lavan clandestinamente sus tanques en las aguas de la Zona Económica Exclusiva de España. Por ejemplo, en abril de 1998 en algunos medios públicos de la información (La Vanguardia, 30.04.98) una vez más se destacaron una alta frecuencia de trazas de petroleros en el litoral de Catalunya cerca de Barcelona. También se han detectado penachos de aguas residuales procedentes de diversos ríos catalanes y especialmente del Llobregat. Según la información de Sr. Julio Bravo (el periódico "20 minutos de Barcelona", el día 16 de enero de 2002): "Centenares de peces, la mayoría carpas, aparecieron ayer muertos en el Llobregat, en su paso por Martorell, después de que se detectase el vertido ilegal de algún tipo de detergente, posiblemente, el jabón, que se utilizó para lavar una cisterna del camión, que llegó al río a través de un colector del polígono industrial de Can Soterespag".

En general, las aguas más contaminadas se encuentran cerca del emisario de fangos de la EDAR de Sant Adrià del Besòs, en la desembocadura del Besòs y en Poblenou, pero los niveles contaminantes y su distribución son diferentes para cada sustancia. Los organoclorados presentan una elevada toxicidad y son ubicuos en el medio marino. Sin excluir su origen local, son vertidos frecuentemente por el Besòs y por la EDAR de Sant Adrià y son transportados después hacia el SW por las corrientes dominantes (Acebillo et al., 2000).

Se ha determinado también la presencia de 14 hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) de los que la mayoría son mutagénicos-carcinogénicos. Casi todos proceden del tráfico marítimo, muy abundante en la zona y presentan máximos en verano, cuando esta actividad aumenta notablemente en el

litoral. Los alquilbencenos lineales (LAB) están presentes, en pequeñas proporciones en los tensioactivos comerciales, agentes activos muy empleados en los detergentes domésticos. Su presencia en proximidad de los emisarios de agua y de lodos de la EDAR demuestra que, aunque los emisarios desemboquen a una profundidad de unos 50m, la contaminación orgánica aflora a la superficie debido a la baja densidad del efluente en comparación con la del agua de mar (Infantes, 2000). Igualmente, la concentración de estas sustancias en profundidad llega a ser, como mínimo, un orden de magnitud superior a la que se registra en superficie, con valores máximos en la zona de vertido de fangos.

A pesar de que las autoridades de Barcelona prestan atención a los problemas de saneamiento urbano y las depuradoras funcionan, ocurren aliviaderos en tiempo de lluvias y las aguas residuales sin ningún tratamiento adecuado se precipitan al mar.

En cuanto a la contaminación química del litoral de Cataluña: según Arranz (1998), la Costa Brava sufre una contaminación orgánica y petroquímica de las aguas residuales provocada por el déficit de saneamiento y por los vertidos de carburos y lubricantes desde embarcaciones náuticas deportivas. En el área del Maresme la contaminación está asociada con los marcos de una urbanización masiva por un lado y la agricultura de invernaderos por otro. La Costa Daurada se encuentra bajo la presión de la contaminación orgánica de las aguas superficiales debida a las actividades turísticas y de la contaminación industrial derivada del sector petroquímico de Tarragona, también existe cierto peligro de un hipotético derrame de crudo desde la plataforma petrolera Casablanca o desde las tuberías que conectan la dicha plataforma con los terminales costeros. El periódico "El País" del 28.07.01 nos informó sobre un vertido de petróleo de tres kilómetros que manchó las playas catalanas de Salou y Camris (costa Daurada). El derrame lo provocó el petrolero *Tromso Trust* que descargaba el petróleo en la monoboia de REPSOL ante el litoral de Tarragona el día 27.07.01 y vertió el crudo en el mar por un problema con la manguera que conecta el barco al tubo submarino que enlaza con los tanques del pantalán de REPSOL.

El Delta del Ebro se contamina mediante sustancias orgánicas, pesticidas y fertilizantes de los cultivos de la zona y los desechos industriales.

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

Los resultados de los análisis de la calidad del aire también verifican nuestros "tristes descubrimientos" respecto a la calidad del medio ambiente en los deltas de algunos ríos catalanes: el periódico La Vanguardia del 12 de marzo de 2000 comunicó que la Diputación de Barcelona señala que el 40% de las muestras en 47 municipios superan el tope europeo de benceno (un aerosol hidrocarburo cancerígeno que refleja la concentración del tráfico que se localiza también abundantemente en las gasolineras), especialmente en el Baix Llobregat. Está claro que los contaminantes atmosféricos junto con las aguas residuales a través de tuberías de saneamiento urbano entran en los ríos y constituyen una parte de la contaminación fluvial y marina.

En cuanto a la contaminación biológica causada por los organismos invasores y asociados con el deslastre de los buques o con las fuentes terrestres tenemos: la aparición del "alga asesina", *Caulepra taxifolia*, causada por un derrame accidental desde el Acuario de Mónaco (Romero, J., 2000) y en pocos años ha provocado serios daños en más de 4.000 hectáreas de fondos marinos de España, Francia, Mónaco, Italia y otros países. Esta alga es originaria de Japón, sur de China y Corea. Sus efectos ecológicos son equivalentes a la sustitución de una selva tropical por zonas de bambú. La *Caulerpa* es tóxica y no proporciona nutrientes aprovechables por las especies. Actualmente esta especie es vendida en INTERNET sin ningún tipo de traba. En muchos países se regala a los consumidores por las tiendas de

artículos de acuarios. Los pequeños fragmentos de esta alga que apenas se pueden ver desencadenan plagas en los ecosistemas costeros. Esta alga ha producido la muerte de leones marinos en la Bahía de Monterrey (California) y puede estar amenazando la supervivencia de las ballenas jorobadas y las azules. El ácido domóico producido por esta alga se ha incorporado a la cadena alimenticia afectando a las anchoas, sardinas y al *krill*, produciendo la muerte de los leones marinos (Sommer, 2002).

La llegada de la medusa *Mnemiopsis* en el Mar Negro por intermedio del lastre de agua de los barcos que cruzan entre el Mar Negro y el Atlántico Norte ha provocado el colapso de la anchoa. Se piensa que esta especie no solamente se alimenta de lo mismo que la anchoa, sino que además se come sus larvas (Sommer, 2002). No hay ninguna garantía de que este tipo de medusa no aparezca pronto en aguas del MN.

La marea roja (los *blooms* fitoplanctónicos) es el fenómeno marino asociado al enorme crecimiento en un corto período de tiempo de las algas microscópicas (*Alexandrium catenella*) llenas de toxinas, lo que acontece de forma concurrente con altas temperaturas del mar y la presencia de grandes cantidades de nutrientes (sales nutritivas, es decir fosfatos, nitratos y silícitos) procedentes de aguas residuales urbanas, que aparecen anualmente en las proximidades de Barcelona (Vila, 2000). Las especies marinas en cuya cadena alimenticia entran estas algas venenosas, presentan una seria amenaza a la salud pública. Ya han habido casos letales entre las personas que consumían tales especies. También se sabe que las mareas rojas pueden causar la eutrofización de aguas costeras y como consecuencia la muerte en masa de peces, mariscos y sus larvas (Sommer, 2002).

2.1.2. Contaminación de aguas mediante hidrocarburos

La utilización generalizada del petróleo y sus derivados como nafta, queroseno, aceites pesados o lubricantes, en nuestra vida cotidiana, no debe ocultarnos su verdadera naturaleza: éstas son sustancias peligrosas, tóxicas e incluso cancerígenas. El petróleo crudo es un complejo de hidrocarburos que contiene más de 1.000 sustancias químicas diferentes. Una de ellas, el benceno, es un cancerígeno de grado 1 según la Agencia Internacional de Investigación sobre el Cáncer – IARC, otra es el tolueno que produce mutación en las células vivas y puede afectar el desarrollo embrional y fetal del ser humano. El petróleo es un veneno tanto para los ecosistemas acuáticos y terrestres como para la vida humana.

La mayor causa de la pérdida de crudo o de productos petroquímicos en alta mar está relacionada con el tráfico marítimo de estas sustancias peligrosas mediante petroleros. Es evidente que los petroleros no pueden viajar con los tanques medio vacíos por causas de la seguridad de navegación (el buque pierde estabilidad). Los tanques tienen que estar vacíos o llenos por completo. En la práctica lo que se hace es llenar los tanques de crudo con agua del mar. Así se consigue la estabilización del centro de peso del buque, lo que es muy importante en el caso de marejada. El petróleo es menos pesado que el agua y en los puertos es fácil recogerlo desde la capa superior de los tanques, pero durante el viaje las aguas marinas se mezclan (aún en cantidades pequeñas relativamente) con el crudo y ya son contaminadas. La mayoría de los puertos europeos ya tiene los terminales especiales para recoger esta agua de lastre, pero es cuestión de dinero y de tiempo: un petrolero amarrado en el muelle sólo trae pérdidas económicas para sus armadores. Por esto, los capitanes de los petroleros prefieren echar esta agua de lastre al mar abierto sin ningún procedimiento adecuado.

Existen otros problemas con los petroleros. Por ejemplo, después de descargar un petrolero con capacidad de 100.000 Tm. se quedan en los cascos de sus tanques aproximadamente los 500 Tm. de crudo conglomerado (así llamado “el resto muerto”) (Vladimirov et al., 1991). Antes, para liberarse de

estos desechos, la tripulación lavaba los tanques con agua caliente y simplemente la echaba en grandes cantidades al mar abierto. No hay ninguna garantía que este delito no se practique a veces hoy en día.

Accidentes técnicos, descarga de residuos y aguas oleosas sobrantes, deslastre - todo esto determina la aparición constante de derrames y estelas de crudo en las rutas marítimas habituales. Se puede resaltar las siguientes fuentes de vertidos en el mar (Vladimirov et al. 1991):

- Aguas de lastre, de lavado de tanques, residuos oleosos vertidos desde los buques (23%)
- Hidrocarburos vertidos mediante las actividades portuarias (17%)
- Aguas residuales urbanas y industriales (10%)
- Aguas residuales causadas por las lluvias intensas (5%)
- Accidentes con los buques y las plataformas petroleras (6%)
- Perforaciones en la plataforma continental (1%)
- Precipitaciones atmosféricas (10%)
- Vertidos desde los ríos en toda su forma múltiple (28%).

Según información más reciente (Terrés y Arias, 2000) procedente de la *International Association of Independent Tanker Owners* (INTERTANKO) (www.intertanko.com) tenemos los siguientes datos sobre las fuentes de descargas de hidrocarburos al mar:

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

2.1.3. Evolución del crudo en el Océano

El estado y la transformación de hidrocarburos en el medio marino dependen de diferentes factores:

- químicos (descomposición, unificación con otros elementos químicos, sedimentación)
- físicos (transición al estado de agregación, absorción, coagulación)
- biológicos (acumulación y traslado por diferentes especies marinas)
- hidrodinámicos (corrientes marinas, oleaje, advección, difusión turbulenta)

Los múltiples procesos de dinámica, transformación y degradación de hidrocarburos se presentan en forma gráfica en la figura 2.1.2.

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

En las primeras 12 horas se evapora un 25% de las partes ligeras de crudo. Con una temperatura del agua mayor o igual a 15⁰ C todos los hidrocarburos, hasta el C₁₅, se evaporan en un período inferior a 10 días. Cuando desaparecen todos los constituyentes gaseosos y disolventes, el crudo restante se transforma en una sustancia viscosa del tipo "*chocolate mousse*". Con el tiempo la viscosidad de "*mousse*" crece y comienza su agregamiento en bolas de crudo de diferentes diámetros (de 1 mm hasta 10 cm, pero con mas frecuencia de 1 a 20 mm).

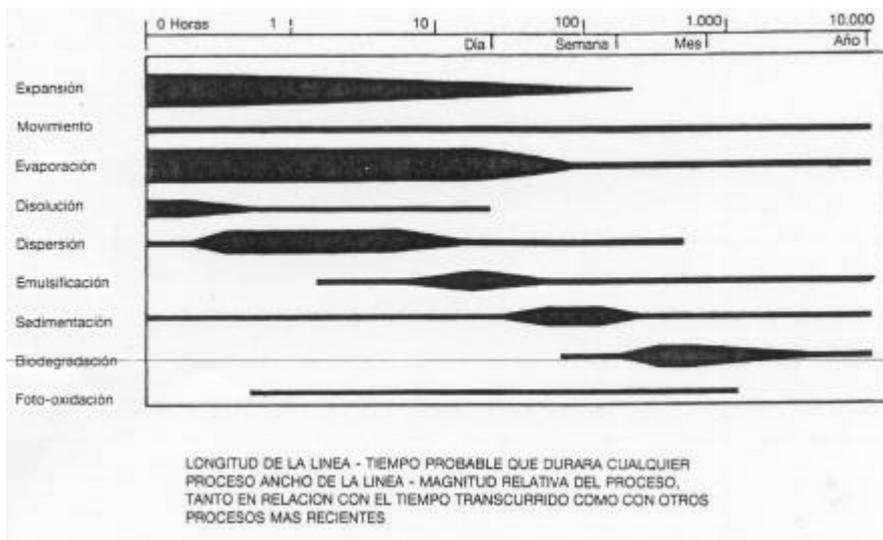


Figura 2.1.3. Tiempo de expansión e importancia relativa de los procesos que actúan en un derrame de hidrocarburos.

Fuente: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

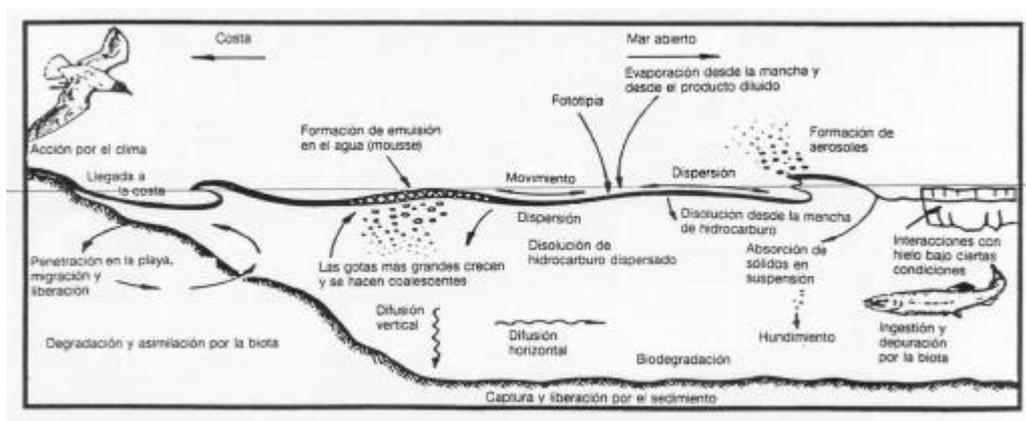


Figura 2.1.2. Procesos que tienen lugar después de un derrame de hidrocarburos. Fuente: Ministerio de Obras Públicas, Transportes y Medio Ambiente, 1995.

Las sustancias estructuradas con una viscosidad alta ("*mousse*" y bolas de crudo) pueden mantenerse un largo tiempo en la superficie marina (según Vladimirov et al., 1991, hasta un año), también son trasladadas por corrientes marinas, se sedimentan y se agregan apareciendo en las costas. Frecuentemente las bolas de petróleo están colonizadas por varias especies de fito y zoo plankton. El tiempo necesario de biodegradación y de los diversos procesos asociados se presentan en forma gráfica en la figura 2.1.3.

En el accidente de Amoco Cádiz del 1978 según estimaciones, un 30% de crudo desapareció por evaporación y foto-oxidación, un 17% se dispersó en la columna de agua, cerca de un 11% se depositó en el fondo marino, un 28% cubrió las costas y un 4% se degradó mediante la acción bacteriana y fúngica (WWF/Adena, 2001).

2.1.4. Algunas propiedades de crudo y sus películas en la superficie marina

Según su origen y consistencia química, el crudo se divide en diferentes tipos: el crudo de Pensilvania y de Kuwait es de tipo alcano; el de Bakú y de California es de tipo nafta, los demás tipos son intermedios. Las componentes principales de crudo son hidrocarburos (de hasta un 98%), que se dividen en cuatro subtipos: alcanos, naftas, aromáticos, alquenos.

El grosor de la película de crudo puede variar desde 0.038 μm (poco notable en la superficie marina) hasta 2.032 μm y más (de color oscuro). Las manchas más finas se manifiestan con color brillante, gris o plateado. El espesor medio se nota en color azul o arco-iris y los colores apagados señalan el espesor grueso. La emulsión de agua en hidrocarburo tipo "mousse" se parece a una espuma de color marrón y tiene el espesor entre 1 y 4 mm o mayor.

Tabla 2.1.1. Características cualitativas de crudo en la superficie del mar.

Aspecto de la película	Espesor, μm	Cantidad de crudo, litro/ Km^2
Poco notable	0.038	44
Reflejo plateado	0.076	88
Pistas de color	0.152	176
Rameado de las telas vivo	0.305	352
De tono pálido	1.016	1170
De color oscuro	2.032	2340

La capa de crudo elimina por completo las ondas capilares en la superficie del mar, reduciendo considerablemente las pequeñas ondas gravitatorias y disminuye el coeficiente de rugosidad de la superficie marina hasta 2-3 veces. También la película de petróleo cambia la intensidad y la composición espectral de la luz solar y de las ondas electromagnéticas que penetran en el agua. La capa de crudo de 30-40 m^6 absorbe completamente las ondas de la luz infrarrojo. Las capas más gruesas interrumpen el intercambio de gases entre la atmósfera y el ambiente marino poniendo en peligro la vida de las comunidades acuáticas.

Según la tipificación de Nelson-Smith (1977) mencionada en (Vladimirov et al. 1991), las características cualitativas de las películas de hidrocarburos se muestran en la tabla 2.1.1.

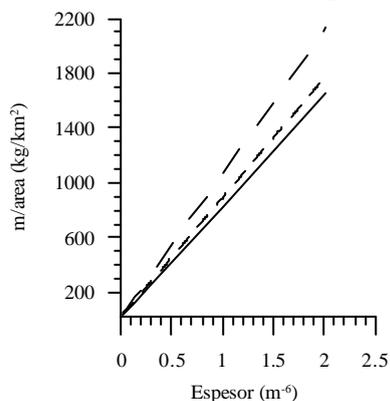


Figura 2.1.4. Espesor de la película de crudo frente a cantidad de crudo de distinta densidad ρ por un kilómetro cuadrado. Línea continua $\rho = 704 \text{ kg/m}^3$, línea punteada $\rho = 760 \text{ kg/m}^3$, línea de trazos $\rho = 908 \text{ kg/m}^3$.

Para ver el rango del cambio del espesor en dependencia del tipo de crudo nosotros hemos escogido unos ejemplos de distintos tipos de crudo, es decir de *Canon Limon* (Colombia) de densidad 907.7 kg/m^3 (15°C), *Cold Lake Diluent* (Canadá) de densidad 704 kg/m^3 (*Environmental Technology Center*, 2001) y de un valor típico medio de 760 kg/m^3 (19°C) citado en el Manual de Matemática, Mecánica y Física, (1971). La figura 2.1.4 muestra una aproximación simplificada del cambio lineal del espesor de la película de crudo en función de su densidad: el crudo más denso tiene el espesor menor en la

misma área de la superficie acuática. En las condiciones reales esta dependencia no es tan simple. La película de crudo no tiene un espesor igual en toda área de la mancha, aún intervienen los procesos no lineales: evaporación, difusión, transformación dinámica, etc.

2.1.5. Esquema generalizado del riesgo de la contaminación del Mediterráneo Noroccidental

Las sustancias orgánicas dispersas en grandes cantidades de agua provocan eutrofización del ambiente marino, depositándose en los sedimentos, y facilitan el desarrollo de un tipo especial de aguas de fango que contienen el sulfuro de hidrógeno, el amoníaco, los metales, etc.

Otros productos químicos como son pesticidas, fertilizantes, detergentes, hidrocarburos aromáticos policíclicos procedentes de los ríos, fuentes puntuales y difusas de origen terrestre y atmosférico, se detectan también constantemente en aguas marinas. Estas sustancias químicas peligrosas también cambian las propiedades físicas de microcapa superficial del agua y por esto su presencia puede ser detectada mediante sensores espaciales. Buscar formas de distinguir los derrames producidos por diferentes sustancias es uno de los retos actuales.

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

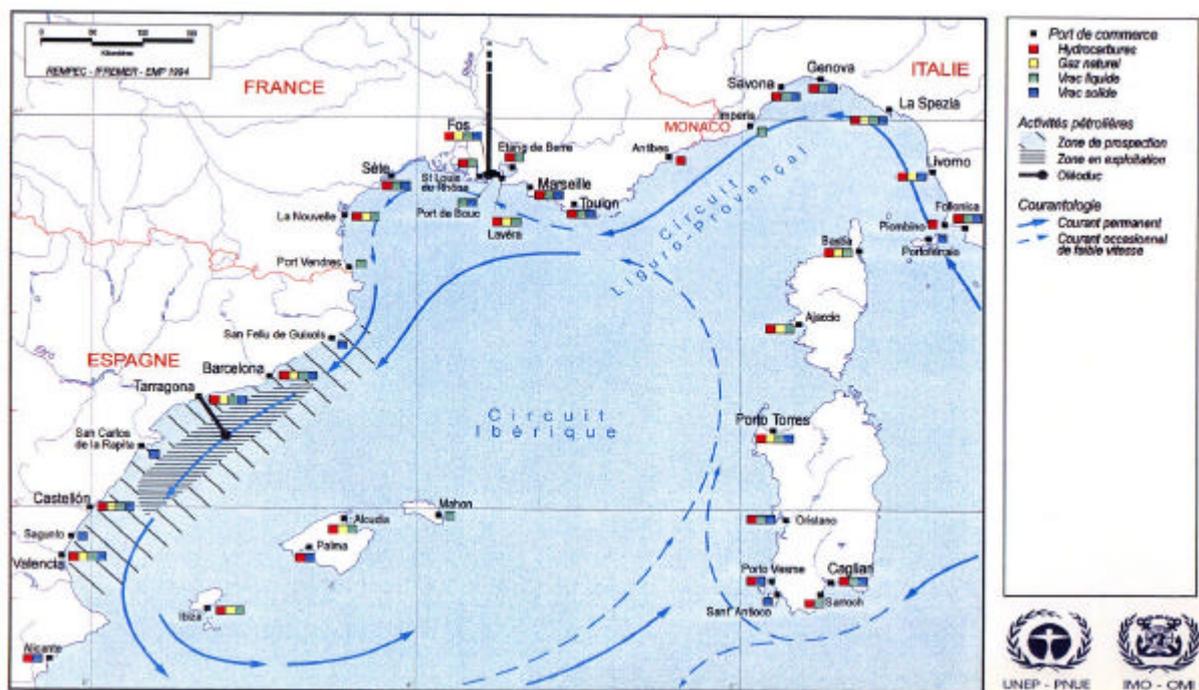


Figura 2.1.5. Principales corrientes marinas y lugares de peligro asociado con las industrias petroleras y la contaminación marina en el Mediterráneo Noroccidental. (Cortesía de Francois Cauneau, Ecole des Mines de París).

La figura 2.1.5 muestra los focos más evidentes de peligro de contaminación del Mediterráneo Noroccidental a través de las industrias petroleras y actividades marítimas asociadas.

Regresar al Índice

Seguir