|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| TIEMPO CLIMA AGUA | A picture containing text, clipart, ceramic ware, porcelain  Description automatically generated**Organización Meteorológica Mundial**  **COMISIÓN DE APLICACIONES Y SERVICIOS METEOROLÓGICOS, CLIMÁTICOS, HIDROLÓGICOS Y MEDIOAMBIENTALES CONEXOS**  **Segunda reunión**  Ginebra, 17 a 21 de octubre de 2022 | **SERCOM-2/INF. 5.8(1)** |
| Presentado por:  presidente del SC-MMO  12.IX.2022 |

*[Para facilitar su labor, el presente documento ha sido traducido empleando tecnologías de traducción automática y de memoria de traducción. Si bien la OMM ha hecho todo lo razonablemente posible para mejorar la calidad de la traducción resultante, no se garantiza en modo alguno, ni de forma expresa ni implícita, su exactitud, fiabilidad o corrección. Toda discrepancia o diferencia que pudiera deberse a la traducción del contenido del documento original al español no será vinculante y no conllevará ninguna consecuencia jurídica a efectos de cumplimiento o aplicación, entre otros. Tenga en cuenta que determinados contenidos, como las imágenes, no pueden traducirse a causa de las limitaciones técnicas del sistema. Si tuviera alguna duda relacionada con la exactitud de la información de un documento traducido, sírvase consultar su versión oficial redactada en inglés.]*

**REVISIÓN DE LAS MEJORES PRÁCTICAS DE RESPUESTA  
A LAS EMERGENCIAS MARINAS**

# Finalidad del documento

1. Este documento proporciona una revisión de las mejores prácticas para la Respuesta a Emergencias Marinas (MER), que incluye tanto la Respuesta a Emergencias Ambientales Marinas (MEER) como la Búsqueda y Rescate (SAR), y sus procedimientos relacionados. Demuestra una comprensión de lo que existe, incluidos los procesos para los derrames de petróleo, la liberación de radionúclidos y la SAR, y las carencias. Explora las diferencias en las respuestas de emergencia que se producen en aguas nacionales o internacionales. Se resumen las principales entidades que intervienen en estos procesos. En general, la revisión aclara la necesidad de que la OMM proporcione a sus Miembros orientaciones sobre la forma en que ellos, especialmente sus SMHN, pueden apoyar y/o ayudar a responder a las emergencias marinas.
2. Por lo tanto, esta revisión constituye la justificación de una propuesta a la SERCOM para desarrollar material de orientación de la OMM para los Miembros que participan o desean participar en la Respuesta a las emergencias marinas. Aunque este informe no sigue el esquema del documento de orientación propuesto, contiene la información esencial que se preveía y reconoce que es necesario seguir trabajando en la elaboración de material de orientación para los Miembros, que se desarrollaría tras el acuerdo de la SERCOM.
3. En este informe se exponen las principales áreas de trabajo en las que la OMM colabora con otros para prestar apoyo a diversos organismos en caso de emergencias marinas. Este apoyo se presta actualmente para tres tipos de emergencias en el medio marino: vertidos de petróleo y otras sustancias nocivas o perjudiciales; liberación de radionucleidos; y objetos a la deriva (incluidas las actividades de la SAR). Esto añade complejidad a cualquier marco de apoyo, ya que todas estas emergencias se gestionan, globalmente, dentro de marcos diferentes. La SAR, por ejemplo, se gestiona en la Organización Marítima Internacional (OMI) a través de las Regiones de Búsqueda y Salvamento (SRR), mientras que la contaminación radiactiva y por petróleo se gestiona en gran medida a nivel nacional o regional. La variable común fundamental es la modelización de las sustancias/objetos a la deriva en una masa de agua, y normalmente esta modelización requiere una atención urgente en función del tiempo para proporcionar a las autoridades pertinentes la información adecuada para responder a una emergencia.
4. Como se indica a continuación, el marco inicial de respuesta a las emergencias marinas a través de la OMM (mediante la antigua Comisión de Meteorología Marina (CMM) de la OMM en 1989) implicaba la creación de una red de centros de respuesta a la contaminación marina, para el suministro de información meteorológica y oceanográfica para las operaciones de respuesta de emergencia en caso de contaminación marina fuera de las aguas bajo jurisdicción nacional. En 1993, la CMM de la OMM, en su undécima sesión, adoptó un Sistema de apoyo a la respuesta de emergencia a la contaminación marina (MPERSS) para alta mar, cuyas pruebas comenzaron en 1994. Los antecedentes y la historia completa están disponibles en https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background. Las áreas del MPERRS están ahora alineadas con las metáreas dentro del Sistema mundial de socorro y seguridad marítimos (SMSSM) de la OMI para el suministro de información sobre seguridad marítima. Sin embargo, no está nada claro que este marco sea el más eficaz para prestar apoyo a las emergencias marinas. Dado el reconocimiento anterior de las diferentes estructuras existentes para la respuesta, es necesario decidir si la OMM necesita desarrollar marcos separados y globales para cada tipo de emergencia para alinearse con la red de respuesta o si se podría adoptar un marco único que intente abarcar todos los sistemas. Esto se investigará en el proceso de elaboración del material de orientación de la OMM.
5. Con el fin de proporcionar una red de respuesta más eficiente y eficaz, se sugiere que cualquier marco de la OMM podría basarse en la capacidad de modelización, con un número limitado de centros que tengan una responsabilidad global basada en una capacidad global de modelización de todos los tipos de incidentes medioambientales. Más allá de esto, un mayor número de centros puede ser responsable de cuencas específicas, con lo que cualquier cuenca que actualmente carezca de capacidad tiene la oportunidad de ser reforzada por los centros con capacidad global. Esto puede considerarse muy similar a otros marcos ya adoptados, como el concepto de Centro mundial de predicciones de zona (WAFC) en la aviación y alineado con el marco del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción (GDPFS).
6. A escala operativa, se considera adecuado que, en lo que se refiere a la respuesta a los radionúclidos, los centros con capacidad global estarían en la mejor posición para dar respuesta al Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), mientras que para muchos otros tipos de emergencia, los centros a nivel de cuenca estarían en posición de responder a los organismos de respuesta nacionales y regionales, como el Centro Regional de Respuesta a Situaciones de Emergencia de Contaminación Marina en el Mar Mediterráneo (REMPEC).
7. Habrá que aceptar que será necesario un compromiso mucho más estrecho con estos organismos en general, aunque en el caso del OIEA, esto puede facilitarse trabajando estrechamente con otras áreas de la OMM que ya tienen una relación de trabajo eficiente con ellos. A nivel de cuenca, los centros de respuesta adecuados deberán fomentar las relaciones con los organismos de respuesta. En algunos casos, como el del REMPEC, esto puede existir ya, pero con otros organismos puede ser necesario trabajar con la OMI para hacer y fomentar estas relaciones. Esto tendrá consecuencias en materia de recursos para los Miembros de la OMM.
8. Sobre la base del examen y la investigación realizados por el Comité Permanente de Meteorología Marina de la Comisión de Servicios de la OMM en la elaboración de este informe, se espera que las siguientes recomendaciones se sigan considerando en la elaboración de un material de orientación de la OMM:
9. Establecer zonas de respuesta más acordes con las zonas utilizadas por las autoridades de respuesta para cada tipo de emergencia, por ejemplo, las SRR utilizadas por la comunidad SAR;
10. Garantizar que las capacidades se ajusten a la respuesta requerida, por ejemplo, utilizando un enfoque "escalonado" de la capacidad de modelización, con unos pocos centros mundiales que puedan proporcionar apoyo de modelización a cualquier Miembro para todas las emergencias ambientales;
11. Establecer relaciones con las autoridades mundiales para garantizar un nivel de apoyo coherente y pertinente y, en su caso, aprovechar las relaciones existentes, como aquellas entre la OMM, el OIEA y la OMI.

### **Agradecimientos**

1. Este informe se basa en el trabajo del borrador (inacabado) de la "Propuesta sobre las futuras actividades de la Comisión Técnica Mixta OMM/COI sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM) en la MEER", preparada en diciembre de 2016 por la antigua Comisión Técnica Mixta OMM/COI sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM) para el apoyo a la respuesta a las emergencias ambientales marinas. En febrero de 2017, el borrador de la Propuesta (incompleta) se presentó a la 13ª reunión del Comité de Gestión de la CMOMM (MAN-13), que consideró que el trabajo justificaba la necesidad de que la CMOMM apoyara las futuras actividades de la MEER, y en la 5ª reunión para la CMOMM (2017) se estableció un Equipo de Expertos en Respuesta a Emergencias Ambientales Marinas. Sin embargo, la finalización de la Propuesta para describir las futuras actividades de apoyo a la MEER nunca se completó.
2. Tras la disolución de la CMOMM en 2019, el enfoque de la OMM en las actividades de la MEER se ejecuta ahora a través del Comité Permanente de Servicios Meteorológicos Marinos y Oceanográficos (SC-MMO) de la SERCOM. El Equipo de Expertos en Respuesta a Emergencias Costeras (ET-CER) del SC-MMO y su sub-equipo de expertos centrados en la MEER y la CMOMM SAR revisaron el trabajo (y el proyecto de Informe incompleto) iniciado por la CMOMM descrito anteriormente. El ET-CER ha utilizado el borrador como base para revisar y perfeccionar el material en este informe, que resume la situación actual de la MEER y la SAR, y presenta recomendaciones para que la OMM considere la mejor manera de apoyar a sus Miembros en el fortalecimiento de su capacidad en las actividades de la MEER y la SAR. El informe constituye la justificación de la recomendación a la SERCOM, de que la OMM considere la posibilidad de producir material de orientación en el futuro, para apoyar a los Miembros en la MEER y la SAR.
3. Los autores de este Informe incluyen al Equipo de Expertos en Respuesta a Emergencias Costeras (ET-CER) del SC-MMO y a expertos invitados, con el apoyo de la Secretaría de la OMM:
4. Øyvind Breivik (Noruega) - Líder TT-MEER/vicepresidente del ET-CER/SC-MMO
5. Bruce Hackett (Noruega) - Autor principal
6. Arthur Allen (EE. UU.)
7. Pierre Daniel (Francia)
8. Nadao Kohno (Japón)
9. Graigory Sutherland (Canadá)
10. Alice Soares (Portugal)
11. Apoyo de la Secretaría de la OMM (Sarah Grimes y Nayeon Kim)

Estos autores y la Secretaría reconocen plenamente el trabajo y las contribuciones del anterior Equipo de Trabajo de la CMOMM sobre la MEER (2016-2017) que proporcionó los antecedentes del presente Informe.

**BORRADOR**

**Revisión del estado de la Respuesta a las emergencias marinas, relevante para los servicios meteorológicos y la OMM.**

**Para presentar en la reunión SERCOM-2 de la OMM (octubre de 2022)**

**Por el Comité Permanente de la SERCOM para**

**los Servicios Meteorológicos Marinos y Oceanográficos (SC-MMO)**

## **Resumen ejecutivo y recomendaciones**

En este documento se describen las principales áreas de trabajo en las que colabora la OMM para prestar apoyo a diversos organismos en respuesta a emergencias marinas, especialmente medioambientales (denominadas MEER - Respuesta a las emergencias ambientales marinas) y de Búsqueda y salvamento (SAR). Este apoyo se presta para tres tipos de emergencias: vertidos de petróleo y otras sustancias nocivas o perjudiciales; liberación de radionucleidos; y objetos a la deriva (incluidas las actividades de la SAR). Esto, en sí mismo, añade complejidad a cualquier marco de apoyo, ya que estas emergencias se gestionan, globalmente, dentro de marcos diferentes. Las actividades de la SAR, por ejemplo, se gestionan dentro de la OMI a través de una serie de Regiones de Búsqueda y Salvamento (SRR), mientras que la contaminación radiactiva y por petróleo se gestiona en gran medida a nivel nacional o regional.

La antigua Comisión de Meteorología Marina (CMM) de la OMM acordó en 1989 establecer un marco inicial de respuesta a los sucesos de contaminación marina mediante la creación de una red de centros de respuesta para el suministro de información meteorológica y oceanográfica para las operaciones de respuesta a emergencias de contaminación marina fuera de las aguas bajo jurisdicción nacional. En 1993, la CMM de la OMM, en su undécima sesión, adoptó un Sistema de apoyo a la respuesta de emergencia a la contaminación marina (MPERSS) para alta mar, cuyas pruebas comenzaron en 1994. Los antecedentes y la historia completa están disponibles en https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background. Las áreas del MPERSS cuentan con el apoyo de los Coordinadores Meteorológicos y Oceanográficos de la zona (CMOZ), que están alineados con las metáreas dentro del Sistema mundial de socorro y seguridad marítimos (SMSSM) de la Organización Marítima Internacional (OMI) para el suministro de información sobre seguridad marítima. Sin embargo, no está nada claro que este marco sea el más eficaz para prestar apoyo a las emergencias marinas. Dado el reconocimiento anterior de las diferentes estructuras existentes para la respuesta, es necesario decidir si la OMM necesita desarrollar marcos separados y globales para cada tipo de emergencia para alinearse con la red de respuesta o si se podría adoptar un marco único que intente abarcar todos los sistemas.

Con el fin de proporcionar una red de respuesta más eficiente y eficaz, se sugiere que cualquier marco de la OMM podría basarse en la capacidad de modelización, con un número limitado de centros que tengan una responsabilidad global basada en una capacidad global de modelización de todos los tipos de incidentes medioambientales. Más allá de esto, un mayor número de centros puede ser responsable de cuencas específicas, con lo que cualquier cuenca que actualmente carezca de capacidad tiene la oportunidad de ser reforzada por los centros con capacidad global. Esto puede considerarse muy similar a otros marcos ya adoptados, como el concepto de Centro mundial de predicciones de zona en la aviación y alineado con el marco del GDPFS.

A nivel operativo, se considera adecuado que, en lo que respecta a la respuesta en caso de radionúclidos, estos centros con capacidad global estarían en la mejor posición para dar respuesta al Organismo Internacional de la Energía Atómica (OIEA), mientras que para muchos otros tipos de emergencia, los centros a nivel de cuenca estarían en posición de responder a los organismos de respuesta nacionales y regionales, como el Centro Regional de Respuesta a la Contaminación Marina en el Mar Mediterráneo (REMPEC).

Habrá que aceptar que es necesario un compromiso mucho más estrecho con estos organismos en general. En el caso del OIEA, esto puede facilitarse colaborando estrechamente con otras áreas de la OMM (por ejemplo, Respuesta a las emergencias ambientales nucleares y no nucleares vinculada al GDPFS) que ya tienen una relación de trabajo eficiente con ellos.

A escala de cuenca, los centros de respuesta a emergencias marinas de la OMM deberán fomentar las relaciones con los organismos de respuesta. En algunos casos, como el de REMPEC, esto puede existir ya, pero con otros organismos puede ser necesario trabajar con la OMI y demás, para establecer y fomentar estas relaciones.

Esta revisión presenta un conjunto sustancial de pruebas de que el proceso de Respuesta a las emergencias marinas puede ser complejo, con múltiples elementos de peligros y respuestas, además de las múltiples funciones de los organismos nacionales, regionales e internacionales. Los servicios meteorológicos desempeñan un papel importante en el suministro de información oportuna para apoyar la Respuesta a las emergencias marinas. Debería destacarse el papel de la OMM a la hora de apoyar a los Miembros en este esfuerzo, así como de facilitar un compromiso fluido con los socios regionales e internacionales pertinentes. Al elaborar este informe, el Comité Permanente de Meteorología Marina y Servicios Oceanográficos de la OMM (SC-MMO) propone a la Comisión de Servicios de la OMM que los Miembros de la OMM se beneficien de recibir material de orientación que les ayude a comprender y a prestar un mejor apoyo a la Respuesta a las emergencias marinas.

**Introducción**

Este informe presenta una revisión de la Respuesta a las emergencias marinas, que abarca tanto las emergencias ambientales (conocidas como Respuesta a las emergencias ambientales marinas (MEER)) como las SAR marinas con relevancia para los servicios meteorológicos y la OMM, así como sus funciones y situación en la contribución a dichos procesos. Estos procesos pueden ser complejos y/o confusos, con su funcionamiento a diversas escalas y bajo varios marcos e instrumentos que abarcan los niveles internacional, regional y nacional. Durante casi 40 años, la OMM ha desempeñado un papel de apoyo a los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) para responder, según sea necesario, a las emergencias marinas, especialmente a la SAR y a la MEER. La antigua CMM de la OMM, en su 9ª reunión (1984), debatió las contribuciones de la OMM y de los servicios meteorológicos a la SAR marítimo, con referencia al Convenio de Hamburgo de 1979. En su momento, este Convenio pretendía desarrollar un plan SAR internacional, de modo que, cuando se produjera un accidente, el rescate de personas en el mar fuera coordinado por una organización SAR y, cuando fuera necesario, por la cooperación entre organizaciones SAR vecinas - véase https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-on-Maritime-Search-and-Rescue-(SAR).aspx.

La CMM de la OMM en su 10ª reunión (1989) reconoció que los Servicios Meteorológicos Nacionales (SMN) tenían el potencial de desempeñar un papel importante en la salud de los océanos y propuso el desarrollo de un enfoque más formalizado para la tramitación del apoyo meteorológico y oceanográfico en las operaciones de respuesta a las emergencias de contaminación marina (Ver antecedentes completos en https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background). Ningún organismo de la ONU es responsable de hacer avanzar la MEER y la SAR y, de hecho, los SMHN suelen desempeñar un papel fundamental a la hora de proporcionar datos, modelos y pronósticos a los organismos hermanos, que son los que llevan a cabo la respuesta. Para comprender claramente el papel potencial de los SMHN en la respuesta a las emergencias marinas y orientarles para que apoyen el proceso, es necesario tener un conocimiento básico de la MEER y el SAR, la situación actual, las carencias identificadas en el proceso y el conocimiento de los actores clave o colaboradores para que los SMHN puedan desempeñar sus funciones de la mejor manera posible, en apoyo de la protección y salvaguarda de la vida y propiedad. El informe sigue una estructura de explicación de las emergencias marinas, esboza una visión general de las funciones de la OMM y de los SMHN (en el pasado y en el presente) en los procesos, considera los diversos convenios, marcos, organismos y programas internacionales, regionales y de otro tipo que pueden desempeñar un papel clave o de apoyo, destacando algunas de las carencias que requieren atención y, por último, recomienda un camino a seguir.

### **Sección 1.1: Visión general de la Respuesta a las emergencias marinas: ¿qué es, por qué es importante y cuál es el papel del servicio meteorológico?**

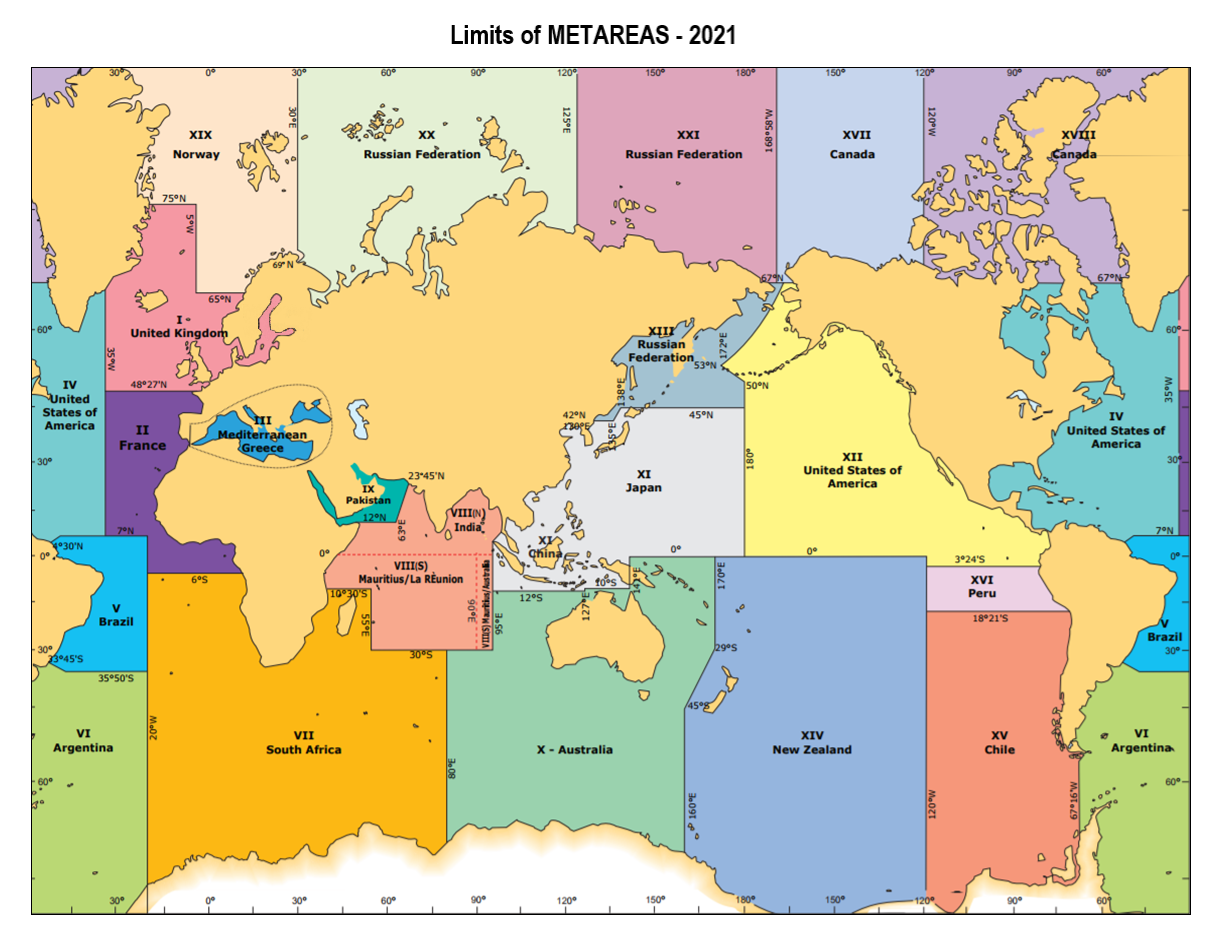
La respuesta a las emergencias marinas se refiere al proceso de respuesta a una emergencia, relacionada con sustancias u objetos a la deriva en el agua, generalmente el océano, tanto en aguas nacionales como internacionales. La respuesta de emergencia podría ser por razones medioambientales, es decir, la MEER, y se entiende como una emergencia debido a la amenaza de daño al medio ambiente marino, por ejemplo, un derrame de petróleo. La emergencia también podría estar relacionada con objetos o personas a la deriva, que amenazan la vida y la propiedad, por ejemplo, la labor de la SAR en cuanto a las personas y/o los buques perdidos en el mar. Ambas tienen una variable común: las sustancias, los objetos, los animales o las personas "derivan" en un medio fluido y existe la necesidad urgente de localizar y/o controlar la deriva, para minimizar los daños al medio ambiente y/o a la propiedad y/o la pérdida de vidas.

En el caso de la respuesta de emergencia a incidentes de contaminación marina, estos pueden variar significativamente en escala y complejidad. Cuando se produce un incidente de contaminación marina, que puede ser provocado, por ejemplo, por vertidos de petróleo y otras sustancias nocivas o por emisiones de radionúclidos, pueden producirse emergencias ambientales en las aguas marinas. Cuando esto ocurre, las autoridades responden para eliminar y/o minimizar el peligro. La MEER es un ámbito en el que intervienen múltiples marcos legislativos o políticos, y organismos, ya sea para prevenir, preparar y/o responder a dichas emergencias. La eficacia de una respuesta depende en gran medida de la preparación y la capacidad de los implicados para llevar a cabo tareas específicas de respuesta y gestión de emergencias. Como mínimo, esto requiere la designación de las funciones y responsabilidades de las distintas partes interesadas, la definición de las estrategias de respuesta y los procedimientos a seguir en caso de incidente, además de la formación para proporcionar los conocimientos y habilidades necesarios.

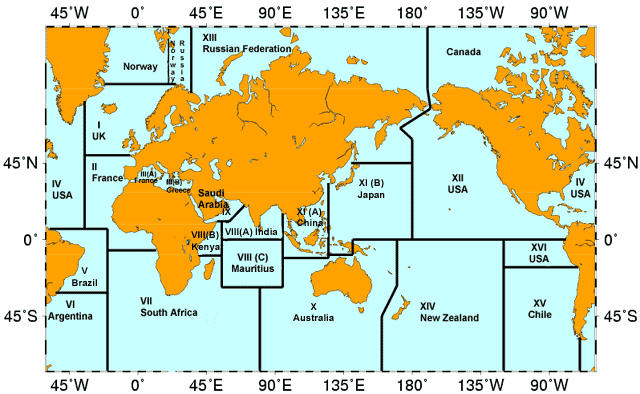
Dada la naturaleza de la dinámica de los océanos fluidos, a menudo la respuesta a la emergencia ambiental implica la modelización y el seguimiento del movimiento de la sustancia tóxica en el agua. El mismo método de modelización y seguimiento se aplica a los objetos a la deriva (por ejemplo, personas perdidas, buques e incluso contenedores en el mar). Debido a esto, la respuesta y preparación para laSAR suele utilizar las mismas herramientas de predicción y respuesta que para la MEER. Las observaciones y previsiones meteorológicas, oceanográficas y de oleaje son los datos de forzamiento en este tipo de modelización de la deriva. Por lo tanto, los SMHN son una de las partes interesadas en los sistemas de preparación y respuesta a las emergencias. Además, los datos e información meteorológicos también podrían ser eficaces para reducir el riesgo de incidentes y emergencias si se introducen en los programas de prevención de emergencias ambientales. Los servicios operativos de la comunidad meteorológica son importantes para la reducción de pérdidas y riesgos en la mitigación de todo tipo de desastres. Además, los fenómenos extremos que se producen de forma natural son perturbadores y pueden desencadenar muchos tipos de accidentes que, a su vez, pueden dar lugar a vertidos y emisiones de sustancias peligrosas al aire y al agua, lo que aumenta la carga de la respuesta de emergencia para proteger y asegurar a las poblaciones en peligro y los entornos contaminados.

En la siguiente Sección 2 se describen los distintos tipos de peligros en los que los SMHN desempeñan un papel de apoyo a la Respuesta a las emergencias marinas.

### **Sección 2: Respuesta a las emergencias marinas**

Esta Sección presenta una revisión de las mejores prácticas actuales para predecir el destino de las sustancias u objetos que son la causa de la emergencia marina. En la actualidad, la OMM coordina un marco para proporcionar análisis y previsiones de las condiciones meteorológicas y oceánicas (tiempo, estado del mar, condiciones del hielo, etc.). Este apoyo se proporciona a través del Servicio Mundial de Información y Avisos Meteorológicos y Oceanográficos de la OMI y la OMM (WWMIWS) y el SMSSM de la OMI para regiones oceánicas definidas fuera de las zonas económicas nacionales conocidas como metáreas. Dentro de esas metáreas, los Miembros designados de la OMM son responsables de proporcionar información. Además, las emergencias por contaminación se abordan en el MPERSS con los Coordinadores meteorológicos y oceanográficos de zona, responsables de apoyar la información meteorológica y oceanográfica pertinente, como se describe en la Introducción. Estos Coordinadores meteorológicos y oceanográficos de zona (CMOZ) coinciden en gran medida con las zonas de metáreas- véanse las figuras 2.1 y 2.2.

**Figura 2.1 Límite de las metáreas (desde 2018) (OMM 2018a) para el suministro de información de seguridad marítima.**



**Figura 2.2: Zonas del coordinador meteorológico y oceanográfico de zona (CMOZ), para el suministro de información meteorológica y oceanográfica para el apoyo de los incidentes de contaminación marina.** **Estas coinciden estrechamente con las zonas de metáreas.**

En este informe no se abordará más la prestación de apoyo meteorológico y oceanográfico a la seguridad marítima, y se remite al lector a las directrices y manuales pertinentes de la OMM: en particular, OMM (2018a), OMM (2018b), OMM (2018c), OMM (2021).

La sección 2.1 ofrece una visión general de los métodos y herramientas para predecir la deriva de objetos y sustancias en el océano. Se demostrará que los métodos utilizados se basan en sistemas operativos de modelización numérica y pueden, en gran medida, ser idénticos para una amplia gama de objetos. A continuación, las secciones 2.2 - 2.4 describen los modelos y servicios específicamente aplicables para predecir la deriva y el destino de tres clases de emergencias marinas importantes: los vertidos de petróleo y otras sustancias nocivas; objetos a la deriva (incluyendo la Búsqueda y Rescate (SAR)); y los vertidos de radionúclidos.

### **Sección 2.1: Aspectos comunes de los Sistemas de respuesta de emergencia**

En esta sección, primero daremos una visión general del propósito y la función de un Sistema de respuesta de emergencias marinas. A continuación, examinaremos los elementos de un sistema de predicción operacional, incluida una descripción de los modelos utilizados para estimar la deriva y el destino de los objetos y las sustancias, así como las fuentes de los datos de entrada meteorológicos y oceanográficos necesarios para su funcionamiento. En los apartados 2.2 a 2.4 se ofrece información más específica y ejemplos de sistemas de apoyo para las emergencias marinas seleccionadas para este informe, es decir, la propagación de radiactividad, los vertidos de petróleo y los objetos a la deriva.

2.1.1 Fundamentos para la respuesta en casos de emergencia marina

Las autoridades encargadas de responder en caso de emergencias marítimas deben tomar decisiones oportunas sobre el despliegue de recursos críticos y limitados para mitigar la emergencia. Los elementos clave para la toma de decisiones de la autoridad de respuesta son las predicciones de deriva y destino, así como las condiciones operativas en el lugar de los hechos. Las previsiones de deriva y destino tendrán que ser desde el inicio más temprano de la emergencia hasta la salida de la siguiente ronda de los recursos de respuesta. Las condiciones oceanográficas y meteorológicas en el lugar de los hechos en apoyo de las operaciones abarcan el período en que los recursos de respuesta llegan al lugar, las operaciones y el regreso de las operaciones a una base segura. Cada emergencia tendrá su propio calendario que dictará los periodos de predicción retrospectiva, predicción inmediata y predicción para la predicción de la deriva y el destino. El tipo de emergencia y los recursos de respuesta asociados dictarán la necesidad de información sobre el estado del lugar de los hechos. A medida que se desarrolla la emergencia, las autoridades de respuesta necesitarán que se actualicen de manera oportuna las predicciones y las condiciones del lugar de los hechos.

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.1.1: La cronología de la emergencia**

Las emergencias marinas tienen una cronología común. Hay cuatro fases en la cronología: las condiciones previas a la emergencia; las condiciones iniciales del suceso; las condiciones durante el periodo de respuesta; y la conclusión y el análisis posterior al suceso, como se ilustra en la figura 2.1.1. Las condiciones previas a la emergencia cubren los eventos y condiciones que preceden al evento de emergencia real. Estas son normalmente las causas fundamentales de la emergencia marina, que pueden incluir, entre otras, las siguientes: condiciones meteorológicas y olas extremas, visibilidad reducida, bancos de arena y corrientes, formación de hielo en las superestructuras, tráfico intenso de buques, fatiga o fallos mecánicos, diseño inadecuado a prueba de fallos, fatiga humana y toma de decisiones errónea. Las condiciones iniciales del evento incluyen la zona probable donde se produjo la emergencia; el período de tiempo en el que la emergencia podría haber ocurrido o está ocurriendo y el tipo y la cantidad de material u objetos implicados en la emergencia. Las condiciones durante el período de respuesta incluyen las trayectorias de deriva y el destino del material u objetos desde el área de probabilidad inicial y el período de tiempo hasta el final de la siguiente época de respuesta. Los organismos de respuesta también necesitan para sus operaciones las condiciones y limitaciones del lugar de los hechos. A medida que continúen las operaciones de respuesta, es probable que se actualicen y perfeccionen las condiciones iniciales; la siguiente secuencia de respuestas definida y aplicada hasta obtener la etapa final de la línea de tiempo; la conclusión. Las medidas activas de respuesta a la migración se terminan o evolucionan hacia labores a largo plazo de menor nivel. En este punto, se puede llevar a cabo un análisis posterior al evento para determinar la causa principal de la emergencia y evaluar el esfuerzo de respuesta con el objetivo de disminuir el cambio de este tipo de emergencias o mejorar los métodos para hacer frente a una emergencia de este tipo.

Diagram

Description automatically generated with medium confidence

**Figura 2.1.2: Las escalas de tiempo y profundidad relevantes asociadas  
a diversas emergencias marinas.**

Aunque los componentes de la respuesta en caso de emergencias marinas son complicados, pueden desglosarse en dos aspectos clave: uno, la estimación precisa de las condiciones oceanográficas y meteorológicas y dos, el modelo de deriva y destino específico del tipo de emergencia. Este último aspecto es exclusivo de cada tipo de respuesta de emergencia, por ejemplo, las tablas de margen en la SAR, la meteorización del petróleo o la desintegración radiactiva de los radionucleidos, y estos se abordarán en secciones específicas. El primer aspecto, sobre las estimaciones de calidad de las condiciones meteorológicas y oceanográficas, es necesario para toda la respuesta en caso de emergencias marinas. Es importante tener en cuenta que las diferentes emergencias requerirán datos a diferentes escalas espaciales y temporales. En la figura 2.1.2 se ilustran las escalas de tiempo y profundidad relevantes asociadas a diversas emergencias marinas. Obsérvese que la extensión espacial de los datos requeridos estará linealmente relacionada con las escalas temporales relevantes. La mitigación de derrames de petróleo y las restauraciones suelen estar confinadas en la capa de fricción, mientras que sus plazos pueden variar desde media hora para la respuesta hasta años para los esfuerzos de restauración. Por el contrario, la mitigación del petróleo pesado que se hunde en el fondo se limita a la capa límite del fondo. Los supervivientes de la SAR y las embarcaciones de supervivencia ocupan la capa de flujo constante del océano. La SAR tiene los tiempos de respuesta más inmediatos, de cuestión de minutos, pero pueden extenderse hasta días, pero están limitados por la capacidad de supervivencia. Los objetos no relativos a la SAR (por ejemplo, los contenedores de transporte o su contenido) pueden extenderse a mayor profundidad que los objetos relativos a la SAR y pueden requerir tiempos de respuesta o de predicción más largos. Las predicciones meteorológicas extremas para los buques deben representar las condiciones en la superficie del mar y la parte inferior de la capa límite atmosférica (también conocida como capa de flujo constante) y la zona de oleaje del océano, mientras que las estructuras de mar abierto necesitarán predicciones que se extiendan más profundamente en la capa mixta del océano (la capa de Ekman) y en aguas poco profundas hasta las zonas bentónicas directamente por encima de la capa límite del fondo. En el extremo más largo y profundo de las escalas de respuesta y previsión se encuentra el transporte de las partículas radiactivas y los nucleidos disueltos.

2.1.2 Suministro de información meteorológica y oceanográfica para la respuesta en casos de emergencia

El éxito de la respuesta en caso de emergencias marinas depende en gran medida del conocimiento preciso de las condiciones meteorológicas y oceanográficas, cuya extensión espacial y temporal viene dictada por la naturaleza de la emergencia. Para ello es necesario contar con sistemas que puedan proporcionar esta información de manera oportuna a los organismos responsables de la respuesta en caso de emergencias marinas. El principal medio para estimar las condiciones meteorológicas y oceanográficas para las predicciones a corto plazo son los sistemas de predicción operativa, que son modelos numéricos que pueden utilizarse para predecir las condiciones normalmente hasta 2 a 10 días en el futuro. Para las condiciones casi en tiempo real, también pueden existir modelos basados en datos en las regiones donde existen suficientes observaciones, por ejemplo, si la emergencia está cerca de una estación meteorológica o de un radar costero de alta resolución (radar HF). Por último, si la emergencia se extiende mucho más allá de las escalas sinópticas, por ejemplo, en el caso de la radiactividad, la climatología puede utilizarse para proporcionar predicciones a largo plazo.

2.1.2.1 Sistemas de predicción operativa

Los miembros de la OMM son capaces de proporcionar, tanto a través de la producción propia como de la colaboración entre la comunidad, los tipos de observaciones y predicciones que pueden apoyar la respuesta de emergencia. En concreto, la red del SMHN recoge observaciones en tiempo casi real y ejecuta modelos operativos de predicción numérica del océano y la atmósfera que van de la escala local a la regional, pasando por la global. Estos modelos son operativos en el sentido de que se ejecutan con regularidad (diariamente o con mayor frecuencia) con el apoyo suficiente para manejar las interrupciones y garantizar que las previsiones estén disponibles públicamente en un plazo determinado. Lo más importante es que los resultados de los modelos, así como los datos de observación, pueden proporcionarse a los usuarios en formatos estándar y utilizando normas aceptadas para el intercambio de datos.

Normalmente se utilizan tres tipos de modelos para describir las condiciones meteorológicas y oceánicas para la MEER y la SAR: los modelos de predicción numérica del tiempo (PNT) que proporcionan las condiciones meteorológicas, los modelos de circulación oceánica que proporcionan las condiciones oceánicas como las corrientes, y los modelos de olas que proporcionan información sobre el campo de olas de superficie. Los modelos PNT producen los datos básicos de forzamiento y condiciones de contorno para los modelos de circulación oceánica y de olas. Pueden ejecutarse en una configuración acoplada, que permite a los modelos intercambiar rápidamente información a través de su frontera compartida o ejecutarse individualmente. Más concretamente, estos modelos proporcionan los datos de forzamiento geofísico, es decir, los datos meteorológicos y oceanográficos, necesarios para los modelos de deriva y destino.

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.1.3: Esquema de un sistema genérico de predicción numérica de la deriva y el destino de objetos y sustancias en el océano.**

Los datos de forzamiento geofísico suelen ser producidos por modelos numéricos operativos, aunque pueden utilizarse productos observacionales y climatologías. El concepto modular permite la flexibilidad en la configuración del sistema. Por ejemplo, el modelo de deriva y destino puede ser un modelo de derrame de petróleo, un modelo de radionucleidos o un modelo de objeto a la deriva, sin alterar seriamente los otros componentes y la maquinaria de conexión. El esquema uno a uno es cuando todos los componentes del modelo se ejecutan en la misma instalación de cálculo utilizando formatos de datos propios.

La figura 2.1.3 es un esquema conceptual de un sistema genérico de modelización operativa para la predicción de la deriva y el destino. Ilustra la relación entre los modelos de circulación oceánica, oleaje y PNT que proporcionan datos de forzamiento geofísico y el modelo de deriva y destino de un objeto o sustancia específica. Además, muestra la dependencia de las condiciones iniciales del incidente de emergencia y la importancia de la entrega y el archivo de datos. Hay que tener en cuenta que se trata de un dibujo conceptual y que la aplicación real de los sistemas de predicción actualmente activos varía mucho. Los elementos del sistema que se muestran en la figura se analizarán con más detalle en las siguientes subsecciones.

2.1.2.2 Predicción numérica del tiempo (PNT)

Los productos de datos operacionales la PNT cubren el océano mundial desde escalas globales hasta muy locales, con resoluciones horizontales de cientos de metros a varios kilómetros y en escalas de tiempo que van desde horas hasta varios días (normalmente 10). El acceso a las instalaciones informáticas avanzadas, a las redes de observación completas, así como al desarrollo tecnológico impulsado por la investigación, está generalmente garantizado por una fuerte demanda pública. La literatura científica relacionada con las PNT y la documentación de los modelos PNT es voluminosa y cualquier descripción exhaustiva está fuera del alcance de este informe. Lo importante en el contexto actual es que tanto los modelos de circulación oceánica como los de oleaje están forzados por los campos de las PNT (vientos, presión, flujos de calor, etc.), especialmente en las escalas de tiempo sinópticas. Este es el caso, sobre todo, de las olas. Además, los modelos de destino también dependen directamente de los parámetros meteorológicos, por ejemplo, la temperatura del aire para la supervivencia de los objetos SAR y la meteorización del petróleo. Por lo tanto, la precisión de los datos de forzamiento de la PNT es decisiva para la precisión de los demás modelos del sistema.

2.1.2.3 Modelos numéricos de circulación oceánica

Los modelos de circulación oceánica son también un componente clave de la respuesta en caso de emergencias marinas, ya que proporcionan las importantísimas corrientes de superficie, además de otros parámetros importantes como la temperatura de la superficie del mar. En los climas más fríos también es habitual acoplar un modelo de hielo marino con el modelo de circulación oceánica para obtener estimaciones de las condiciones del hielo marino. También hay detalles técnicos clave sobre la aplicación de los datos de las corrientes superficiales en la oceanografía operativa, que se tratan con detalle en un reciente artículo de revisión (Röhrs et al., 2021), y que sólo se mencionarán brevemente aquí.

La cuestión de la precisión es especialmente grave en el caso de los modelos de circulación oceánica, en el contexto de un sistema de predicción de la deriva y el destino. Como ya se ha indicado, la precisión del modelo PNT es fundamental para el sistema (véase el apartado 2.1.2.2). Aunque las predicciones del modelo de oleaje están estrechamente relacionadas con los datos del modelo PNT (véase la sección 2.1.2.4), hay procesos físicos en el océano que pueden contribuir significativamente al campo de corriente total. La dirección topográfica, los gradientes de densidad con los mecanismos de inestabilidad que los acompañan y las mareas son procesos que modifican y generan componentes de corriente que pueden igualar, incluso superar, el componente de corriente impulsado por el viento. Además, la mesoescala oceanográfica, es decir, la escala de los remolinos y los meandros, apenas se resuelve con las resoluciones actuales de los modelos y hay pocas observaciones que la resuelvan de forma fiable. Estos factores explican por qué los datos del modelo de circulación oceánica son posiblemente los menos precisos de los tres componentes de forzamiento geofísico. Esto es un problema grave para las respuestas a corto plazo a las emergencias marinas, especialmente la SAR y los derrames de petróleo, que dependen en gran medida de las predicciones precisas de las corrientes superficiales de alta resolución.

El uso de la asimilación de datos puede mejorar en gran medida la precisión del estado medio del océano, pero hay límites en cuanto a las escalas pequeñas a las que se extiende la mejora. Depende en gran medida de la resolución de los datos que se asimilan, así como del modelo. Jacobs et al. (2021) demostraron que la asimilación de observaciones de baja resolución no mejora la predicción de las características de mesoescala incluso en un modelo de resolución de remolinos. Se demostró en el Golfo de México que el uso de un filtro espacial con factor e (*e-folding*) de 58 km en las corrientes superficiales del modelo realmente redujo los errores en las trayectorias medias en comparación con el uso de los datos del modelo de resolución completa de 1 km. Como se ha señalado anteriormente, la variabilidad de estas pequeñas escalas es primordial para la respuesta en caso de emergencia y los modelos y observaciones de mayor resolución son importantes para reproducir esta variabilidad. Esto hace que la predicción a corto plazo en el océano sea un reto (Christensen et al., 2018).

En el contexto de la respuesta costera, los modelos aquí son predominantemente de un dominio limitado para aumentar la resolución de las costas y la batimetría. Estos suelen compartir un límite abierto con un modelo global operativo y son forzados por productos de viento de alta resolución. Estos modelos costeros pueden ser sensibles a las incertidumbres de los límites, así como a la batimetría. Se han realizado algunos avances en la asimilación de datos de radar HF (Breivik y Sætra, 2001; Sperrevik et al., 2015; Hernández-Lasheras et al., 2021) o el anidado bidireccional en canales estrechos (Herzfield y Rizwi, 2019; Ding et al., 2021) para mejorar la precisión y la resolución en las regiones costeras. Existe cierto potencial con los nuevos productos de altimetría de alta resolución como SWOT (Carrier et al., 2016) y el producto de altura de la superficie del mar (SSH) de 5 Hz del planeador de olas (Penna et al., 2018) que también puede llevar a restringir más la variabilidad de pequeña escala.

Si las observaciones oceánicas son accesibles casi en tiempo real, es posible utilizar métodos estadísticos para crear predicciones a corto plazo del orden de 24 a 48 horas. Tradicionalmente se han desarrollado con instalaciones de radar HF (Barrick et al., 2012; Solabarrieta et al., 2021), ya que estas observaciones proporcionan corrientes superficiales en una cuadrícula. También es habitual el despliegue de dispositivos de deriva durante las operaciones de respuesta en caso de emergencia, ya que estos datos pueden utilizarse para "rastrear" la emergencia marina, dado que sus características de deriva son similares a las del objeto o material que se desea rastrear. El despliegue de estas boyas de deriva también proporciona una rápida evaluación de los resultados del modelo numérico en la región que puede relacionarse cualitativamente con la incertidumbre en la predicción de las corrientes superficiales locales.

Las corrientes de marea son otra fuente de variabilidad de las corrientes, especialmente en el contexto costero y, a veces, tienen su propio modelo inverso independiente de los modelos de circulación oceánica (Egbert y Erofeeva, 2002); Carrière et al, 2016). Aunque el movimiento de las mareas está presente en los datos de altimetría por satélite, a menudo estas señales son pequeñas en relación con la altura dinámica del nivel del mar y suelen filtrarse de la señal. Sin embargo, dado que los componentes de la marea barotrópica son estacionarios, se pueden utilizar muchas pasadas para crear un modelo inverso para las alturas y las corrientes de la marea (Egbert y Erofeeva, 2002; Carrière et al, 2016). Estos modelos son sensibles a la precisión de las líneas de costa y la batimetría, pero una vez que se calculan los datos constitutivos, es trivial crear una serie temporal para cualquier período de tiempo.

2.1.2.4 Modelos numéricos de olas

Los modelos de olas están íntimamente ligados a los modelos meteorológicos, pero el papel de las olas en la respuesta en caso de emergencia marina es amplio, por lo que mencionaremos brevemente algunos aspectos. El conocimiento preciso del campo de olas es muy importante para las operaciones de respuesta, ya sean operaciones SAR o de mitigación de derrames de petróleo, ya que el campo de olas influye en gran medida en su seguridad y éxito. Como se ha señalado en la sección 2.1.2.2, el forzamiento meteorológico de los modelos PNT es dominante para los modelos de oleaje, lo que significa que la precisión de un modelo de oleaje viene determinada en gran medida por la precisión del modelo PNT que lo impulsa. Este es el caso, en particular, del mar de viento, que es muy importante en los modelos de deriva y destino. Por otro lado, la predicción del mar de fondo depende menos de los vientos de superficie en un modelo de oleaje regional, y más de las condiciones límite laterales.

Las olas son importantes para el transporte lagrangiano de material, ya que introducen una deriva lagrangiana adicional, también conocida como deriva de Stokes, que depende de la inclinación de las olas y suele ser de entre el 1 y el 1,5% de la velocidad del viento de 10 metros en la superficie y disminuye rápidamente con la profundidad. Esta deriva de Stokes debe añadirse a las corrientes eulerianas obtenidas a partir de los productos de datos reticulados para obtener la velocidad lagrangiana. Las olas también pueden impactar directamente sobre grandes objetos de escala similar a la longitud de onda dominante, como los buques portacontenedores ya sea por rotura o por reflexión. Este es un factor adicional a tener en cuenta para algunas operaciones SAR.

Las olas, a través de la rotura de las mismas, también son importantes para el arrastre y la mezcla vertical de petróleo y otros materiales de flotación ligera o neutra, como los plásticos marinos (Reisser et al., 2015). Esta mezcla vertical puede influir en el transporte horizontal del petróleo (Röhrs et al., 2018) debido a la elevada cizalladura cerca de la superficie del océano. El tiempo que el material estará por debajo de la superficie dependerá del equilibrio entre el flujo de momento turbulento descendente desde la superficie, predominantemente a través de las olas rompientes, y la flotabilidad positiva del material.

2.1.2.5 Sistemas de datos para la respuesta en caso de emergencia marítima

La llegada de los modelos numéricos operativos para la circulación oceánica y el oleaje, impulsados por los modelos meteorológicos operativos, condujo a la primera modelización numérica de la trayectoria de deriva de los objetos de derrame de petróleo y de la SAR. En estos primeros esfuerzos, el módulo de trayectoria de deriva estaba integrado en el modelo de circulación oceánica. El oceanógrafo o los oceanógrafos responsables del modelo ejecutaron el módulo de trayectoria a petición de la organización de respuesta, que había proporcionado un conjunto bastante limitado de condiciones iniciales a los modeladores. Una ligera variación de este sistema uno a uno consistió en que los modelizadores proporcionaran en un único formato específico los campos de corriente y viento al modelo de trayectoria propio de la organización de respuesta. En ambos esquemas, la región de predicción de la deriva se limita a la región del modelo de circulación oceánica. Las predicciones inmediatas y las predicciones están limitadas a las capacidades de los modelos y las predicciones retrospectivas también están limitadas por las capacidades de los archivos internos. En la figura 2.1.3 se ilustra el esquema de entrega de datos del modelo uno a uno.

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.1.4: Esquema de un sistema de predicción numérica de la deriva y el destino con el modelo o modelos de deriva y destino independientes de los datos de forzamiento geofísico. Este último debe entregarse en un formato determinado.**

Con el aumento de la disponibilidad de modelos oceanográficos operativos, se puso en marcha un segundo esquema. En este esquema, los modelos de trayectoria y destino se ejecutan independientemente de los modelos oceanográficos y meteorológicos. Sin embargo, esos modelos de entrada deben proporcionar sus salidas al modelo de trayectoria y destino en un formato específico, por ejemplo, los formatos de datos de GNOME (https://cordc.ucsd.edu/projects/mapping/documents/GNOME\_data\_formats.pdf) o un conjunto limitado de formatos, como se ilustra en la figura 2.1.4. En este esquema, el número de regiones accesibles por el modelo de destino y trayectoria operativa ha aumentado con respecto al esquema uno a uno. Sin embargo, las predicciones retrospectivas, las previsiones inmediatas y previsiones siguen estando limitadas a las capacidades de los modelos oceanográficos y meteorológicos.

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.1.5: Esquema de un sistema de predicción numérica de la deriva y el destino con el modelo o modelos de deriva y destino independientes de los datos de forzamiento geofísico. Estos últimos son gestionados aquí por un sistema de adquisición de datos que mantiene un repositorio de datos actualizado que está siempre listo para entregar datos de previsión y predicción retrospectiva al modelo o modelos de deriva y destino**.

Se ha desarrollado un tercer esquema para subsanar las deficiencias de los dos anteriores. En este esquema hay un sistema de acceso, archivo y recuperación de datos que es completamente independiente tanto de los modelos oceanográficos y meteorológicos como de los modelos de destino y trayectoria, como se ilustra en la figura 2.1.5. Los archivos de salida de los modelos oceanográficos y meteorológicos son accesibles en sus formatos nativos en las agendas de los modelos, donde los campos de previsión inmediata se archivan y los campos de predicción más recientes sobrescriben el campo de predicción actual. Por lo tanto, los campos de viento y corriente necesarios no son archivados por los productores, sino por este sistema de adquisición de datos. El modelo de destino y trayectoria operacional, y si está disponible el modelo de pre-distensión, realiza entonces solicitudes de datos al sistema de adquisición de datos para un cubo de datos especificado (tipo de producto / caja de latitud-longitud / período de tiempo). El sistema de adquisición de datos devuelve entonces sólo los datos en el formato de los modelos de destino y trayectoria para el cubo de datos especificado. Las condiciones en el lugar de los hechos y algunos módulos de predestrucción realizan solicitudes de series temporales desde una ubicación determinada.

Más recientemente, la creciente aplicación de protocolos internacionalmente aceptados para el acceso a los datos, la gobernanza y la documentación en las comunidades atmosférica y oceanográfica está haciendo que haya más datos de forzamiento geofísico disponibles. Estos protocolos intentan aplicar los principios FAIR: los datos FAIR son datos localizables, accesibles, interoperables y reutilizables (Wilkinson et al., 2016). La premisa básica de los datos FAIR es hacer que los datos sean fácilmente accesibles y cada vez más útiles para más usuarios en cualquier lugar. Paralelamente a esta evolución, varios centros de producción de datos meteorológicos y oceanográficos nacionales, regionales y mundiales han pasado a convertirse en eficientes servicios públicos de datos y están aplicando activamente políticas de datos e instalaciones de gestión de datos siguiendo los principios FAIR. Un ejemplo relevante es el Sistema de Información de la OMM (WIS 2.0; https://community.wmo.int/activity-areas/wis/wis2-implementation) para los datos meteorológicos operativos y de oleaje proporcionados por la red de Centros Meteorológicos Regionales Especializados (RSMC); Se está estudiando la inclusión de productos de predicción numérica oceánica global. En cuanto a los datos operativos sobre la circulación oceánica y las olas, algunos ejemplos son el Servicio de Vigilancia Marina Copernicus (https://marine.copernicus.eu) y algunos participantes en la colaboración OceanPredict (https://www.godae-oceanview.org/science/ocean-forecasting-systems/system-descriptions). En términos de los esquemas de flujo de datos mostrados en las Figuras 2.1.4 y 2.1.5, estos servicios representan fuentes alternativas de datos de forzamiento geofísico que pueden entregar datos a los repositorios locales y, en muchos casos, permitir el flujo de cubos de datos a petición, reduciendo así la necesidad de almacenar grandes cantidades de datos localmente.

2.1.3 Modelos operativos de transporte - Comportamiento del destino y la deriva

También se aplica un enfoque numérico a la predicción operativa de la deriva y el destino de sustancias y objetos en el océano. Estos modelos se formulan para una clase específica de sustancias u objetos, pero todos dependen de datos de entrada que describen las condiciones meteorológicas y oceanográficas, es decir, datos de forzamiento geofísico. A diferencia de los modelos operativos de predicción oceánica y meteorológica, los modelos operativos de transporte suelen ejecutarse bajo demanda en respuesta a una solicitud específica. Además, estos modelos de predicción suelen estar a cargo de proveedores privados o públicos de los sectores correspondientes, por ejemplo, la industria petrolera de alta mar o el Servicio de Guardacostas. Estos modelos suelen poder ejecutarse tanto hacia adelante en el tiempo para elaborar previsiones de cara a la adopción de medidas correctoras, así como hacia atrás para poder predecir el origen de una emergencia marina.

Originalmente, los modelos operativos de transporte utilizaban un número muy limitado (1-11) de partículas simuladas para representar los objetos de petróleo o de la SAR. En torno a cada partícula se asignó un círculo de incertidumbre que crecía con el tiempo o con la distancia en línea de la trayectoria o en línea recta desde el origen. A continuación, el área marcada con un círculo fue recuadrada y esta fue la ubicación de la respuesta. Estos métodos contenían numerosas simplificaciones que incluían: corrientes o vientos constantes o uniformes, un tipo de objeto a la deriva o de petróleo, sin modelización del destino y con procedimientos de optimización de recursos limitados. Sin embargo, estos métodos podrían aplicarse utilizando información ambiental histórica o simple con herramientas básicas de navegación manual en cartas de navegación de papel. Con el desarrollo de los ordenadores personales, estos métodos "manuales" se programaron con el uso de cartas electrónicas.

Con mucho, el método más común para el comportamiento del destino y la deriva se basa en el modelo de seguimiento de partículas lagrangiano (LPT) (van Sebille et al, 2018, Dagestad et al, 2018), también denominado método de Monte Carlo. Este tipo de modelo supone que el material puede descomponerse en varios cientos o miles de partículas o, en los casos de la SAR, representan una descomposición de la probabilidad del objeto de búsqueda. A continuación, estas partículas se advierten desde sus puntos individuales y el momento de origen utilizando las mejores estimaciones para las corrientes, los vientos y las olas hasta el momento de interés. Los parámetros meteorológicos y oceanográficos mejor estimados se interpolan a la ubicación y tiempo de las partículas. Hay errores inevitables asociados a la interpolación que dependen de la escala de la cuadrícula de datos de entrada. Este error es especialmente grande en las zonas costeras, dependiendo de la precisión y la resolución de la línea de costa en el sistema de predicción. Además, la elección del esquema de advección de la partícula puede introducir incertidumbres; la opción más popular, por ser robusta y producir un error pequeño, es el esquema Runge-Kutta de cuarto orden (Nordam y Duran, 2020).

También es sencillo añadir un componente estocástico al movimiento de cada partícula (Griffa, 1996) para simular la dispersión por debajo de la cuadrícula y otras incertidumbres del modelo. Un método de "paseo aleatorio" con difusividad constante es el más común para simular la dispersión a pequeña escala, pero también pueden utilizarse métodos estocásticos de orden superior, como el modelo de "vuelo aleatorio". Ambos modelos añaden un componente estocástico en cada paso de tiempo de advección.

Existe otro método lagrangiano en el que las trayectorias se calculan a lo largo de líneas de corriente, que son los contornos de velocidad instantánea, en lugar de a lo largo de líneas de trayectoria. Ejemplos de este tipo de LPT son ARIANE (Blanke y Raynaud, 1997) y TRACMASS (Döös et al., 2013). Este enfoque está diseñado para trabajar eficientemente con la salida del modelo en una cuadrícula C y no depende de esquemas de interpolación o advección, ya que calcula analíticamente la trayectoria de las partículas a través de las celdas de la cuadrícula. El uso de las líneas de corriente supone un estado estacionario o, al menos, un estado estacionario parcial y las trayectorias se calculan para cada salida del modelo. Este método también requiere el campo de velocidad tridimensional no divergente completo y cualquier divergencia superficial, que es común en el océano, puede conducir a un gran componente vertical de la línea de corriente. Este enfoque también complica la adición de cualquier componente que pueda conducir a la divergencia, como la adición de un componente de abatimiento o la difusión estocástica. Debido a estas limitaciones, estos modelos de advección de líneas de corriente no suelen utilizarse de forma operativa para las predicciones a corto plazo, pero siguen siendo útiles si se requieren predicciones a mayor escala.

Además de los dos enfoques lagrangianos, también se emplea a veces un enfoque euleriano, que calcula la ecuación de advección-difusión para una concentración de trazador (Ivorra et al., 2021). Los modelos de transporte eulerianos son muy adecuados para las simulaciones de largos periodos en las que la difusión requeriría que los modelos de transporte lagrangianos tuvieran un número prohibitivo de partículas. Los modelos de transporte eulerianos también adolecen de un exceso de difusión numérica, especialmente en los bordes de la mancha, aunque los avances recientes están abordando esta deficiencia (Ivorra et al., 2021).

2.1.4 Evolución prevista para la mejora de los servicios

En las subsecciones anteriores se han presentado las mejores prácticas actuales en la construcción de sistemas operativos de predicción de la deriva y el destino de objetos y sustancias en el océano. La atención se ha centrado en los elementos comunes a los sistemas especializados en derrames de petróleo, objetos a la deriva y dispersión de radionucleidos: los datos de forzamiento geofísico y los modelos que los producen, así como los modelos de transporte que estiman cómo se mueven, propagan y difunden los objetos y las sustancias. Se ha demostrado que existen modelos y servicios bien establecidos que pueden ser desplegados y utilizados por nuevos actores y para nuevas clases de objetos y sustancias. En esta sección se presentan algunos avances importantes que pretenden mejorar la eficacia de los servicios de predicción y la calidad de sus productos.

1. Mejora de los datos de forzamiento de la circulación oceánica. La mejora de la precisión de los modelos de circulación oceánica es sin duda el factor que más mejoraría la calidad de cualquier sistema de modelización del transporte. Se trata de un área importante de investigación y desarrollo oceanográfico que se está llevando a cabo activamente en todo el mundo. Abarca no sólo el desarrollo de modelos, sino también el despliegue y mantenimiento de los sistemas de observación y el desarrollo de los esquemas de asimilación de datos que los unen. Como tal, no puede ser llevada a cabo únicamente por los servicios que proporcionan predicciones sobre la deriva y el destino de los objetos y sustancias. Estos servicios pueden, en principio, encontrar los mejores datos de circulación oceánica disponibles para su zona concreta a partir de diversas fuentes, desde modelos globales hasta modelos cercanos a la costa, la mayoría de las veces en combinación anidada. En la práctica, sin embargo, los servicios operativos individuales seguirán dependiendo principalmente de sus fuentes establecidas de datos de forzamiento por razones de fiabilidad. El uso de otros conjuntos de datos de forzamiento proporcionará una alternativa o un complemento a sus conjuntos de datos de forzamiento nominal.

2. Colaboración multinacional para el desarrollo de modelos. Dado que el desarrollo de códigos de modelos numéricos y de esquemas de asimilación de datos es muy exigente no sólo para la circulación oceánica sino también para la atmósfera, las olas y el transporte, se ha consolidado el desarrollo de códigos de modelos comunitarios abiertos apoyados por grupos de desarrollo distribuidos. Ya se han mencionado varios de los códigos de los modelos. Esto es especialmente ventajoso en el contexto del despliegue de sistemas de predicción de la deriva y el destino en las naciones marítimas en desarrollo. Un requisito importante para el desarrollo de modelos es la identificación de evaluaciones comparadas y casos. En el contexto actual, es especialmente valioso establecer algunos casos reales bien descritos para los que se dispone de datos geofísicos de forzamiento y verificación.

3. Acceso a los datos de forzamiento geofísico. Para que los datos de forzamiento alternativos sean un complemento viable, deben estar disponibles con una fiabilidad razonable. Existen soluciones tecnológicas adecuadas para el acceso y la transferencia de datos (ftp, OpENDAP, API, etc.) y un número cada vez mayor de proveedores de datos están haciendo accesibles sus datos operativos en línea y a través de interfaces máquina-máquina, por ejemplo, el WIS 2.0. Ahora es posible descargar libremente los datos de los modelos de predicción numérica de la atmósfera, las olas y el océano para cualquier parte del mundo. Hay una advertencia: la mezcla de conjuntos de datos sobre la circulación oceánica, las olas y la meteorología procedentes de diferentes fuentes puede dar lugar a datos de forzamiento incoherentes; Los datos coherentes son aquellos en los que los datos meteorológicos aplicados son los mismos que se utilizaron para forzar los modelos de oleaje y de circulación oceánica. La falta de consistencia es una fuente de incertidumbre en la predicción de la deriva que es difícil de estimar.

En general, la disponibilidad de datos útiles de forzamiento geofísico está mejorando y hace cada vez más posible la implantación de servicios de deriva y destino en nuevas áreas, así como la mejora de los servicios existentes. Aun así, para muchos equipos de respuesta en casos de emergencia y SMHN, sería beneficioso el suministro de datos de forzamiento geofísico de forma operativa a través de una red del tipo RSMC.

4. Información sobre la incertidumbre. La estimación de la precisión de las predicciones de deriva y destino es potencialmente útil para los responsables de la respuesta, pero difícil de proporcionar para los productores. Por un lado, es difícil cuantificar la precisión en números, ya sea que provengan de una combinación teórica de las precisiones de los datos de forzamiento o de comparaciones directas de las predicciones de los modelos y las observaciones de la deriva en eventos reales. Por otro lado, es un reto transmitir la información sobre la incertidumbre a los usuarios de manera eficaz.

Un enfoque comúnmente utilizado para el problema es el uso de métodos de predicción de conjunto, en el que se ejecutan varias simulaciones diferentes, pero igualmente realistas de la misma situación. La distribución de los resultados proporciona información sobre la predicción más probable y sobre su incertidumbre; una distribución estrecha indica una mayor certeza que una distribución más amplia. En la previsión de la circulación oceánica y de las olas de las PNT, se están siguiendo dos vías de aplicación:

(a) Conjuntos generados por el mismo modelo utilizando diversas perturbaciones del sistema del modelo (condiciones iniciales, condiciones de contorno, parámetros del modelo, etc.). Por lo general, se ejecutan entre 30 y 100 miembros del conjunto para alcanzar una significación estadística suficiente. En consecuencia, este tipo de conjuntos es costoso desde el punto de vista informático y la producción de conjuntos suele realizarse con una resolución algo inferior a la del modelo determinista principal.

(b) Los métodos de conjuntos multimodelos (MME) intentan combinar simulaciones realizadas con diferentes códigos de modelos, normalmente cotejando los resultados de varios sistemas de predicción existentes que cubren la misma zona. El número de miembros del conjunto es mucho menor (<10), por lo que la atención se centra más en la evaluación cualitativa de las diferencias que en la incertidumbre estadística. El coste computacional es menor que para el primer tipo y, además, se distribuye.

Los métodos de ensamblaje del primer tipo se utilizan desde hace varios años en la PNT. Más recientemente, se han extendido a la predicción de las olas y la circulación oceánica. Aun así, sigue siendo un reto traducir las probabilidades en información fácilmente comprensible para los usuarios.

[5. Datos de la superficie oceánica. La respuesta a la mayoría de los incidentes de emergencia marina se centra en la superficie del océano o en la capa cercana a la superficie (aproximadamente, el metro superior). Muchos sistemas de modelización de la circulación oceánica no proporcionan datos calculados específicamente para esa capa. Normalmente, se calcula una media sobre los metros superiores, ya sea un intervalo fijo sobre toda la zona del modelo o un intervalo que varía con la profundidad del fondo. En algunas formulaciones del modelo, se calcula la media sobre un espesor de la capa superior que varía con el tiempo. Los modelos de deriva y destino para la MEER y la SAR dependen de un conocimiento preciso de la capa cercana a la superficie, preferiblemente con un perfil finamente resuelto de las corrientes. A falta de estos datos de la salida del modelo numérico oceánico, las variables cercanas a la superficie pueden determinarse mediante el posprocesamiento de la salida del modelo, utilizando suposiciones a priori sobre la distribución de las variables en la capa superior del modelo. Estos cálculos pueden realizarse en el modelo de transporte o antes de la ingestión en el modelo de transporte. Debería alentarse a los principales proveedores de datos de circulación global y regional a que proporcionen datos cercanos a la superficie y/o proporcionen los mejores algoritmos para calcular los perfiles cercanos a la superficie.](http://www.ntis.gov/)

### **Sección 2.2: Derrames de petróleo y otras sustancias nocivas**

Las sustancias nocivas y peligrosas se definen aquí como sustancias potencialmente nocivas para las personas o el medio ambiente marino. Pueden ser tanto naturales (por ejemplo, el petróleo) como artificiales (por ejemplo, los bifenilos policlorados, PCB). Las sustancias pueden ser nocivas por sus características químicas tóxicas o por las concentraciones extremas que se producen cuando se vierten en el océano. Los accidentes con productos petrolíferos, tanto petróleo crudo como refinado, son los que más atención han recibido en el contexto de los incidentes de derrames perjudiciales y los procedimientos de respuesta de emergencia se han desarrollado principalmente para los derrames de petróleo. En esta sección se describen los modelos de deriva y destino de los hidrocarburos en el océano y los sistemas de predicción construidos en torno a ellos.

Las lecciones aprendidas con el desarrollo y la aplicación de herramientas de predicción de la deriva y el destino de los derrames de petróleo han fomentado la aplicación de esas herramientas a otras sustancias nocivas, como las aguas negras. Cabe señalar que la distinción entre las sustancias nocivas descritas aquí y los objetos a la deriva descritos en la sección 2.3 no siempre es clara; Por ejemplo, algunos objetos a la deriva, como los plásticos, pueden considerarse nocivos. Sin embargo, en el contexto actual, la distinción se basa en qué herramientas se consideran más aplicables. Los fluidos derramados y los objetos muy pequeños, como las cenizas, se tratarían normalmente con herramientas del tipo de los derrames de petróleo, mientras que los objetos flotantes más grandes, cuyas características individuales de deriva pueden estimarse, podrían tratarse con métodos de objetos a la deriva (véase la sección 2.3).

Como se ha indicado anteriormente, la presente sección tratará casi exclusivamente de los métodos de respuesta a los derrames de petróleo, teniendo en cuenta que sirven de modelo para otras sustancias nocivas.

2.2.1 Información general

Los derrames de petróleo en el océano se han producido desde la aparición de las actividades industriales que han llevado a la construcción de grandes instalaciones a lo largo de la costa (por ejemplo, refinerías), en el mar (por ejemplo, plataformas petrolíferas en alta mar) y el transporte marítimo. La necesidad de una respuesta reparadora surgió ya en los años 60 y 70 tras los grandes derrames de petróleo relacionados con el auge del transporte en petroleros y la producción de petróleo en alta mar. La preocupación de la opinión pública por los daños ambientales causados a las costas, los fondos marinos y la fauna y flora silvestres por los grandes derrames de petróleo (por ejemplo, el de Torrey Canyon en 1967, la explosión de Ekofisk Bravo en 1977 y la de Amoco Cádiz en 1978) hizo que se desarrollaran capacidades de respuesta en caso de emergencia en los principales países marítimos industrializados.

Sin embargo, la puesta en servicio de petroleros cada vez más grandes, la apertura de nuevos yacimientos petrolíferos y la instalación de oleoductos en el lecho marino han aumentado el riesgo de derrames. A finales de la década de 1980 se produjeron graves derrames de petróleo: Odyssey en 1988, Exxon Valdez en 1989, Khark 5 en 1989 y ABT Summer 1991. (En 1991, se produjo uno de los mayores derrames de petróleo en el Golfo Pérsico durante la Segunda Guerra del Golfo). Esos incidentes de derrame dieron lugar al Convenio Internacional sobre Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos (OPRC) de la OMI. Las partes deben establecer medidas para hacer frente a los incidentes de contaminación, ya sea a nivel nacional o en cooperación con otros países. Aunque el número de incidentes de derrames está disminuyendo, todavía se producen ocasionalmente grandes derrames, como el naufragio del Prestige en 2002, el derrame de petróleo de Deepwater Horizon en 2010 y la colisión del petrolero Sanchi en 2018. El derrame de petróleo del MV Wakashio en 2020, en el que se produjeron grandes daños ambientales en Mauricio, es un caso reciente que reseñaron Daniel y Virasami 2021, y que explica bien los distintos actores implicados en la respuesta en caso de una emergencia de este tipo. En 2019, el buque portacontenedores Grande America que viajaba entre Hamburgo y Casablanca y que se incendió y volcó[[1]](#footnote-2), provocó tanto manchas de petróleo, como sustancias químicas peligrosas en el océano y, del mismo modo, varios servicios meteorológicos participaron en el suministro de información a las autoridades de respuesta. Recientemente, la erupción volcánica de Tonga en enero de 2022 demostró un impacto en cascada de múltiples riesgos desde la erupción inicial, desencadenando una ola de tsunami en toda la cuenca del Océano Pacífico, donde las olas que se acercaban a la costa de Perú dañaron una instalación petrolera, lo que provocó un derrame de petróleo[[2]](#footnote-3).

Aunque estos grandes derrames provocan graves daños al medio ambiente local, no se producen con frecuencia. En realidad, la mayoría de los casos de derrame implican pequeñas cantidades de petróleo y se producen con frecuencia (casi a diario). Aunque la cantidad de cada vertido es bastante pequeña, la cantidad total y el impacto acumulado en las zonas afectadas son significativos, especialmente en las zonas muy transitadas. Es difícil detectar los pequeños vertidos, lo que dificulta la respuesta y la elaboración de estadísticas fiables.

La respuesta en caso de incidentes de derrames de petróleo incluye: el descubrimiento, la vigilancia y la evaluación del derrame; la adquisición y despliegue de equipos para reducir el alcance del derrame (por ejemplo, restricciones físicas, tratamiento químico); medidas correctivas como la limpieza de las costas, los sedimentos del fondo y la fauna y flora silvestres; y las repercusiones legales y financieras.

Desde el principio, la predicción de la deriva de las sustancias vertidas en el océano se ha basado en el conocimiento local de las corrientes, las condiciones del viento y las olas, las cartas de mareas y las cartas de corrientes estáticas, según se disponga. En muchos países, en realidad, esto sigue siendo así. En las últimas décadas se han desarrollado sistemas de predicción más sofisticados, primero en los principales países costeros industrializados. Como se describe en la sección 2.1, estos sistemas se basan en modelos numéricos que utilizan las previsiones numéricas disponibles de vientos, corrientes y olas para calcular la probable deriva y propagación de una sustancia derramada.

A partir de un conjunto de servicios pioneros en la década de 1980, hoy en día existen servicios públicos de servicios de previsión de derrames de petróleo en funcionamiento en la mayoría de los países marítimos desarrollados y hay más en desarrollo. Dado que los Estados nación son responsables de la protección de sus costas y de los recursos de sus zonas económicas exclusivas, la previsión de vertidos de petróleo se lleva a cabo principalmente como un servicio público nacional. Los servicios regionales u otros servicios transfronterizos son factibles y se están explorando activamente, por ejemplo, el MPERSS y los ejemplos regionales presentados en la sección 2.2.2.1. Sin embargo, los servicios activamente operativos para el bien público a escala mundial son escasos: por ejemplo, MétéoFrance dirige uno. Por otro lado, hay una serie de proveedores comerciales que prestan servicios especiales, por ejemplo, a las empresas petroleras y algunos tienen un alcance internacional (véase Hackett et al., 2009, para un ejemplo).

2.2.2 Examen de las capacidades existentes

Existen dos enfoques para los modelos de derrames de petróleo, a saber, los modelos eulerianos y los lagrangianos. El primer tipo calcula el comportamiento de las mareas negras mediante una ecuación de advección-difusión para una concentración de trazador en un modelo de red eléctrica de diferencias finitas. El segundo tipo supone manchas de petróleo representadas por un gran número de partículas y calcula el comportamiento de las mismas. La mayoría de los modelos de simulación de derrames de petróleo utilizan el modelo LPT, ya que es más rentable que el modelo euleriano.

Los vertidos de petróleo en el océano se rigen por una gran variedad de procesos: advección, propagación, difusión, mezcla vertical, evaporación, emulsión, dispersión, disolución del petróleo, fotooxidación, biodegradación, etc. En la elaboración de modelos de derrames de petróleo, es difícil incluir todos esos procesos y normalmente sólo se consideran los procesos dominantes. La selección del proceso depende de la situación meta y de los requisitos locales, pero la advección, la dispersión, la difusión, la evaporación y la emulsión se consideran esenciales en la mayoría de los modelos de deriva y destino de los vertidos de petróleo.

Los procesos físicos que determinan la evolución de los hidrocarburos en el océano, como la advección, la difusión y la mezcla vertical, son básicamente comunes a los de otras sustancias y objetos a la deriva; estos procesos y cómo se aplican en la modelización de la deriva y el destino se describen en la sección 2.1.2.

Los procesos específicos del petróleo se tratan en el modelo de deriva y destino del petróleo. El esparcimiento se basa en la teoría de tres fases de Fay (Fay, 1971), pero a menudo se modifica para incluir otros factores, como la difusión por cizallamiento en modelos recientes. La evaporación, la emulsión y otros procesos de meteorización dependen de las características del petróleo y pueden variar mucho entre los distintos tipos de petróleo. Hay varias formas de estimar la evaporación, desde la fórmula empírica en bloque (por ejemplo, Stiver y Mackay, 1984; Fingas, 2015) hasta complicados modelos de pseudocomponentes (por ejemplo, Jones, 1997). La emulsificación, especialmente la emulsión de agua en aceite cambia drásticamente las características del aceite, lo que, a su vez, repercute en las operaciones de extracción.

Se han dedicado muchos esfuerzos al desarrollo de modelos de derrames de petróleo, y los sistemas de modelización de derrames de petróleo más avanzados son capaces de simular el comportamiento básico de las mareas negras a un nivel bastante satisfactorio. Sin embargo, todavía se pueden mejorar algunos procesos específicos. Para una visión general de la ciencia y la tecnología de los derrames de petróleo marinos, se remite al lector a Fingas (2017) y Davidson et al. (2008). Para una visión más detallada de los sistemas de modelización y predicción de vertidos de hidrocarburos (incluidos sus historiales), véanse, por ejemplo, Spaulding (1988), Reed et al. (1999), Hackett et al. (2006), Jones et al (2016), Zodiatis et al. (2017) y Keramea et al. (2021).

En los modelos de derrames de petróleo, las manchas de petróleo se expresan como trazadores pasivos, el movimiento depende básicamente de las condiciones del entorno físico. Como se ha comentado en la sección 2.1.2, los datos de forzamiento geofísico, proporcionados por los modelos numéricos de la atmósfera, la circulación oceánica y las olas, son factores clave para la precisión de las simulaciones de vertidos de petróleo. Por lo tanto, la mejora de esos modelos -en particular el modelo de circulación oceánica (véase la sección 2.1.2.3)- es crucial para mejorar la capacidad de predicción de la deriva y el destino de los vertidos de petróleo.

El ajuste del modelo y el rendimiento también dependen del objetivo. Si se produce un gran incidente de vertido de petróleo en alta mar, se requiere una región más amplia para la simulación, de modo que se incluyan todas las zonas potencialmente afectadas. También requerirá predicciones a largo plazo, incluyendo la meteorización química. Por otro lado, una zona limitada podría ser suficiente para vertidos menores, aunque se requerirá información detallada de alta resolución. En este caso, los procesos de meteorización podrían ser incluso innecesarios si se pueden llevar a cabo rápidamente medidas correctivas.

Como se indica en la sección 2.1, los modelos numéricos para el forzamiento geofísico producen datos que contienen errores que, a su vez, se propagan a los resultados del modelo de deriva y destino del petróleo, que también tiene sus propias imprecisiones. Para los responsables de las emergencias, la información sobre las incertidumbres en las predicciones puede ser valiosa. El uso de métodos de predicción de conjunto es un enfoque que está ganando terreno en la predicción moderna de derrames de petróleo.

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.2.1: Esquema de una operación de predicción de derrame de petróleo ejemplificada por el sistema en el JMA.**

En la figura 2.2.1 se indica una operación típica de predicción de derrames de petróleo. Una vez que se notifica un incidente de derrame de petróleo, se adquiere o se estima la información pertinente sobre el derrame necesaria para iniciar el modelo del derrame de petróleo. A continuación, se lleva a cabo la predicción del derrame de petróleo con los datos de entrada disponibles y los resultados previstos se facilitan a las autoridades de respuesta en casos de desastre.

Las características del derrame varían de un incidente a otro, esto es, la cantidad de petróleo, si se trata de un derrame simultáneo o continuo y la ubicación (superficie del mar, aguas profundas, punto fijo, buque flotante, etc.). La forma de establecer las condiciones iniciales depende del sistema y de la información proporcionada. En cuanto a la vigilancia, hace tiempo que se detectan y rastrean las mareas negras desde aviones y barcos. En las dos últimas décadas, el radar de apertura sintética basado en satélites ha demostrado ser una potente herramienta para analizar la situación del vertido, además los resultados pueden utilizarse como entrada en algunos modelos avanzados de derrames de petróleo (Klemas 2010; Zodiatis et al. 2012).

El acceso rápido y fiable a los datos de forzamiento requeridos es esencial para un sistema operativo de predicción de derrames de petróleo, por lo que es habitual que dichos sistemas sean gestionados por los SMHN o por una filial cercana, utilizando datos de forzamiento operativos propios. Por otra parte, en la última década se ha facilitado el acceso a los conjuntos de datos de forzamientos geofísicos candidatos a través de internet, debido a la mejora de la tecnología y a la tendencia a una política de datos menos restrictiva (véase la sección 2.1.2.5).

Al principio y al final de la cadena de producción se encuentra la importante tarea de comunicación con los responsables y otros usuarios, incluida la difusión de los resultados. En la mayoría de los servicios nacionales, esta tarea se encomienda a un equipo de operadores de guardia con disponibilidad 24/7/365. Ellos ejecutan los modelos de previsión, entregan los resultados a los usuarios en las formas acordadas y consultan con los expertos de la empresa para la interpretación y los avisos. En algunos casos, se ofrece a los usuarios un servicio en línea basado en la web para que puedan realizar sus propias simulaciones y descargar los resultados directamente, por ejemplo, su ECDIS a bordo.

2.2.2.1 Esfuerzos multinacionales de vigilancia y previsión de derrames de petróleo

En varios mares regionales se han desarrollado las mejores prácticas de coordinación e integración a nivel multinacional para apoyar la gestión de la previsión de derrames de petróleo. A continuación, se presentan algunos ejemplos actualmente activos, aunque no es una lista exhaustiva:

**Mar del Norte**

En la zona del Mar del Norte, el Sistema Oceanográfico Operacional de la Plataforma Noroeste (NOOS; http://noos.cc) - una alianza regional - está trabajando para desarrollar y emplear las mejores prácticas entre los servicios nacionales de predicción de derrames de petróleo. Como ejemplo, el sistema sueco de predicción de la deriva del petróleo Seatrack Web (STW; Ambjorn, 2007) cubre las necesidades no sólo de los usuarios nacionales sino también de los internacionales en el Mar Báltico y una parte del Mar del Norte. Es el sistema oficial de modelo de deriva/predicción y análisis restropectivo de HELCOM que se utiliza para calcular el destino de los derrames de petróleo. Está disponible en línea para las autoridades nacionales y determinadas organizaciones de investigación. Otro ejemplo es la herramienta OSERIT (Oil Spill Evaluation and Response Integrated Tool, Legrand y Duliere, 2014), desarrollada por primera vez en Bélgica, que ahora atiende las necesidades de la EMSA-CSN (Agencia Europea de Seguridad Marítima - CleanSeaNet) en el Mar del Norte. NOOS-Drift es un sistema MME transnacional que puede producir predicción de deriva a petición. Permite mejorar la confianza de los usuarios finales en los resultados del modelo de deriva y les ayuda a orientar su proceso de toma de decisiones, una necesidad real expresada por los usuarios. NOOS-Drift incluye un conjunto de indicadores cuantificados de la precisión de la trayectoria de la deriva, estimados a partir de la dispersión de las predicciones de los modelos de deriva participantes. Ayuda a distinguir qué diferencias se deben a los distintos modelos de trayectoria y cuáles a los distintos datos de forzamiento. Se beneficia de las predicciones oceanográficas operacionales proporcionadas por el Servicio de Vigilancia Marina Copérnico (CMEMS). El dominio de servicio es toda la plataforma marítima del noroeste de Europa, centrándose en las aguas territoriales y las zonas económicas exclusivas de Bélgica, Francia y Noruega.

**El Mar Mediterráneo**

En el Mar Mediterráneo, la comunidad operativa oceanográfica MONGOOS (Red Mediterránea de Oceanografía para el Sistema Mundial de Observación del Océano (GOOS)) y los SMHN siguieron un concepto de integración de los sistemas nacionales de predicción meteorológica y oceanográfica existentes y de los CMEMS para establecer un depósito de datos en línea específico, facilitando así el acceso a todos estos datos para su uso con modelos de derrames de petróleo consolidados en la región. Se ha creado un servicio de predicción de derrames de petróleo multimodelo, conocido como MEDESS-4MS (Sistema mediterráneo de apoyo a las deicisones para la seguridad marina). El MEDESS-4MS (Zodiatis et al., 2016) también se integra con los datos de las plataformas de vigilancia de derrames de petróleo, incluidos los satélites, y ofrece una serie de escenarios de servicio, acceso a datos multimodelos y capacidades interactivas para atender las necesidades del REMPEC (Centro Regional de Respuesta a Situaciones de Emergencia de Contaminación Marina en el Mar Mediterráneo), del EMSA-CSN y de usuarios nacionales como el Servicio de Guardacostas. MEDESS-4MS no dio como resultado un sistema operativo, pero sirvió de precursor para el desarrollo de sistemas similares como NOOS-Drift.

**El océano Pacífico Norte Occidental**

En el Pacífico Norte Occidental, las respuestas a los derrames de petróleo han sido llevadas a cabo principalmente por organismos nacionales como el Servicio de Guardacostas en muchos países. Sin embargo, el grave caso del derrame de Nakhodka en 1997 hizo que se tomara conciencia de la importancia de la predicción y la respuesta sistemática a los derrames. El Servicio de Guardacostas del Japón (JCG) y el Servicio Meteorológico del Japón (JMA) contrataron un marco de cooperación para mejorar la capacidad de respuesta. El JMA desarrolló un modelo de simulación de derrames de petróleo (JMA, 2002), que proporciona predicciones de derrames a los países miembros también en el marco del MPERSS. Una vez que se notifica un derrame de petróleo, el JCG proporciona datos sobre el estado del accidente (ubicación, hora, tipo de petróleo y cantidad derramada, etc.), y el JMA elabora previsiones de derrames. Las previsiones se entregan al JCG, junto con las condiciones meteorológicas y oceanográficas para apoyar las actividades de respuesta. Durante un reciente incidente de vertido en 2021, se proporcionaron al JCG predicciones como las que se muestran en la figura 2.2.2. El caso de Nakhodka fue también un detonante para potenciar un marco internacional: el Plan de Acción para la Protección, Gestión y Desarrollo del Medio Ambiente Marino y Costero de la Región del Pacífico Noroccidental (NOWPAP) del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), cuyos miembros son China, Japón, la Rep. de Corea y Rusia. En el año 2000, el NOWPAP creó el Centro regional de actividades de preparación y lucha contra emergencias ambientales del medio marino (MERRAC). Sus responsabilidades incluyen el mantenimiento y la actualización de los datos de contacto de los países miembros de el NOWPAP implicados en la prevención y la respuesta en casos de contaminación marina y el registro de los incidentes de derrames de petróleo y sustancias peligrosas y nocivas.

A picture containing text

Description automatically generated

**Figura 2.2.2: Ejemplo de un producto de previsión de vertidos de petróleo elaborado por el JMA y entregado al Servicio de Guardacostas del Japón, que es el organismo de respuesta responsable.**

**La marea negra está representada por una nube de partículas (puntos azules).**

2.2.3 Evolución prevista para la mejora de los servicios

En las subsecciones anteriores se han presentado las mejores prácticas actuales en la predicción operativa de derrames de petróleo. Se ha demostrado que hay modelos y servicios bien establecidos que pueden ser desplegados y utilizados por nuevos actores y regiones. En relación con los avances generales enumerados en la sección 2.1.4, la presente sección presenta algunos avances importantes que pretenden mejorar la eficacia de los servicios de predicción de derrames de petróleo y la calidad de sus productos.

1. **Colaboración multinacional para el desarrollo de modelos de derrames de petróleo**. La modelización operativa de los derrame de petróleo comenzó como una empresa familiar que producía códigos de modelos propios para su uso en un mercado comercial. Sólo en la última década la colaboración en el desarrollo de modelos y la elaboración de códigos abiertos -incluso comunitarios- ha avanzado realmente. El desarrollo de códigos de modelos comunitarios abiertos es especialmente ventajoso en el contexto del despliegue de modelos de derrames en las naciones marítimas en desarrollo. Se han establecido algunos esfuerzos de colaboración de este tipo, pero hay margen para ampliar el marco de desarrollo.

Un requisito importante para el desarrollo de modelos es la identificación de evaluaciones comparadas y casos. Sería especialmente valioso establecer algunos casos reales de derrames de petróleo bien descritos para los que se disponga de datos de forzamiento y validación.

2. **Colaboración multinacional para mejorar los servicios**. La ventaja de la colaboración entre los servicios nacionales de predicción de la deriva ya se ha mencionado en el contexto de la predicción de conjuntos multimodelos (MME). Más allá del intercambio de resultados de los modelos, existe una ventaja potencial en la colaboración en otros eslabones de la cadena de producción. Por ejemplo, intercambio sólido de datos de forzamiento, condiciones iniciales (datos de detección), formatos de archivo acordados, métodos de visualización, archivo de datos de casos de prueba, etc.

Otro aspecto de la colaboración multinacional es el apoyo al desarrollo de las naciones marítimas que actualmente carecen de servicios propios adecuados de predicción de derrames. Otra posibilidad es compartir los servicios a nivel regional teniendo en cuenta la mejora del acceso a los datos de forzamiento y a los códigos de los modelos de deriva, esto puede ser una forma rentable de avanzar. Aunque todo el océano mundial puede ser cubierto por sistemas globales que funcionan en unos pocos países desarrollados, la necesidad de información detallada cerca de la costa implica que, en última instancia, se necesitan servicios de predicción de la deriva a escala local para apoyar la respuesta local en casos de emergencias.

3. **Funcionalidades específicas del modelo de derrame de petróleo**. Los modelos de destino de los vertidos se han desarrollado con funcionalidades algo diferentes en función de los requisitos locales más importantes. Sin embargo, hay un movimiento hacia una capacidad de modelos más completa. A continuación se presenta una lista de capacidades de modelo que han tenido una aplicación limitada, pero que deberían estar más disponibles:

* características de las sustancias nocivas distintas del petróleo,
* petróleo en el hielo marino,
* acoplamiento del modelo de deriva de la sustancia al modelo de deriva del buque,
* fuente subsuperficial (y modelización tridimensional)
* reanudación de la geometría del derrame según las observaciones,
* incluir las corrientes de marea en las zonas en las que los datos de los modelos oceánicos disponibles no lo hacen,
* opción de cálculo inverso (hacia atrás),
* incluir el acceso a los datos de forzamiento climatológico para la predicción a largo plazo (de semanas a meses).

4. **Marco estándar para el intercambio de información sobre derrames**. En la actualidad, no existen normas sobre cómo se formatea e intercambia la información sobre derrames de petróleo. Los planes varían entre los servicios nacionales y las alianzas regionales. Las diferencias pueden provenir de requisitos específicos, pero es deseable definir una norma común que sea independiente de los sistemas de previsión específicos. Esto puede promover la cooperación entre los proveedores de información y los usuarios, así como facilitar la colaboración entre los productores de predicciones a nivel nacional, regional e internacional.

2.2.4 Revisión de las necesidades de usuario para la información meteorológica y oceanográfica sobre derrames de petróleo y otras sustancias nocivas

**Necesidades de usuario**

|  |  |
| --- | --- |
| Organización internacional | OMI |
| Documentación internacional | El **CONVENIO INTERNACIONAL RELATIVO A LA INTERVENCIÓN EN ALTA MAR EN CASOS DE CAUSALIDAD DE CONTAMINACIÓN POR PETROLEO, (1969) y el PROTOCOLO RELATIVO A LA INTERVENCIÓN EN ALTA MAR EN CASO DE CONTAMINACIÓN POR SUSTANCIAS DISTINTAS AL PETROLEO (1973)** tienen por objeto conferir al Estado ribereño la facultad de intervenir en alta mar en caso de que una causalidad de contaminación amenace con dañar o dañe su litoral o intereses conexos.  <http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-Relating-to-Intervention-on-the-High-Seas-in-Cases-of-Oil-Pollution-Casualties.aspx>  **EL CONVENIO INTERNACIONAL PARA PREVENIR LA CONTAMINACIÓN POR LOS BUQUES (MARPOL 73/78)** tiene como objetivo eliminar la contaminación marina por hidrocarburos y otras sustancias nocivas, así como las aguas residuales y la basura. La mejora del control de los vertidos operativos de petróleo y la reducción de la cantidad de petróleo liberado por accidentes son las cuestiones más importantes en el ámbito de la Prevención de Emergencias, Preparación y Respuesta (EPPR). Algunas zonas valiosas son designadas zonas especiales MARPOL. La zona del Ártico aún no ha sido designada como tal.  **EL CONVENIO INTERNACIONAL SOBRE COOPERACIÓN, PREPARACIÓN Y LUCHA CONTRA LA CONTAMINACIÓN POR HIDROCARBUROS (OPRC 1990) y el PROTOCOLO SOBRE PREPARACIÓN, RESPUESTA Y COOPERACIÓN EN MATERIA DE INCIDENTES DE CONTAMINACIÓN POR SUSTANCIAS PELIGROSAS Y NOCIVAS (Protocolo OPRC-HNS 2000)** cubren dos de los ámbitos de competencia de la EPPR, pero también tratan la planificación de contingencias, la formación y la cooperación en programas de investigación. |
| Cualquier frontera de coordinación internacional | Nulo, aplazado al Estado ribereño. |
| Responsabilidad por responder | Nacional |
| Requisitos de respuesta operativa | Seguridad y eficacia de los equipos de limpieza, evaluación de la duración de la dispersión del petróleo, predicción del movimiento del petróleo. |
| Cómo se comunica el incidente | Los buques son responsables de notificar los derrames de petróleo a la autoridad nacional. |
| Cómo se coordina la respuesta | La autoridad nacional es responsable de poner en marcha su plan de respuesta y de organizar el apoyo de información meteorológica y oceanográfica. |

### **Sección 2.3: Accidentes relacionados con personas y objetos**

Los accidentes de personas y objetos que flotan y van a la deriva en la superficie del océano se tratan de manera similar. De hecho, los objetivos suelen denominarse colectivamente objetos a la deriva. Sin embargo, la principal motivación para desarrollar procedimientos de respuesta para objetos a la deriva siempre ha estado relacionada con las personas, es decir, con la SAR. Por lo tanto, esta sección tratará principalmente de los métodos de respuesta SAR. Más recientemente, las lecciones aprendidas en el desarrollo de herramientas SAR han fomentado la aplicación de esas herramientas a otras clases de objetos a la deriva, como los contenedores de carga flotantes perdidos en el mar.

2.3.1 Información general

Introducción a la respuesta SAR y a la modelización

La respuesta SAR tiene como objetivo principal encontrar a los supervivientes marítimos y a las embarcaciones de los supervivientes y salvarlos. La SAR también comparte y se entrecruza con la respuesta en casos de derrames de petróleo con la predicción de la deriva de objetos flotantes potencialmente peligrosos, como los contenedores de transporte y los buques inutilizados.

Timeline

Description automatically generated with medium confidence

**Figura 2.3.1: Cronología de la SAR**

El tiempo de respuesta de las autoridades de la SAR para habilitar recursos en el lugar es el más corto de todas las emergencias marinas. En la figura 2.3.1 se ilustra una cronología de la SAR generalizada que contiene todos los eventos principales de la cronología de la SAR, que van desde minutos hasta días (y a veces más tiempo). Sin embargo, no todos los incidentes de la SAR contienen todos estos elementos, pero todos contienen el momento del incidente, la notificación a las autoridades de la SAR y la respuesta de los recursos de la SAR al incidente. A menudo, el incidente de la SAR se resuelve con éxito con la respuesta inicial y se salvan vidas. Sin embargo, hay algunos incidentes de la SAR que recorren todo el espectro de la cronología de la SAR debido a alguna combinación de: movimiento complejo previo a la presión; incertidumbre en el momento del incidente; retrasos significativos en la notificación; información limitada por fuentes de información de terceros; zonas alejadas de los recursos de respuesta; y condiciones de supervivencia y embarcaciones difíciles de detectar pero favorables, que conducen a múltiples ciclos de planificación y esfuerzos de búsqueda posteriores hasta que se resuelve o se suspende el caso.

El inicio de un caso de la SAR comienza con la notificación a las autoridades SAR, que deben responder a tres cuestiones principales:

1. ¿cuándo ocurrió el incidente?
2. ¿dónde ocurrió el incidente?
3. ¿cuál es el número y los tipos de objetos de la SAR?

Estas tres preguntas combinadas son las condiciones iniciales o los posibles escenarios para un caso particular de la SAR. Si la fuente de información procede del propio buque de socorro, la incertidumbre sobre cuándo, dónde y qué puede ser a menudo muy precisa o limitada. Sin embargo, con las fuentes de información de terceros, puede haber una considerable incertidumbre en el escenario o los posibles escenarios. Hay muchos escenarios, pero la mayoría pueden ser recogidos por un conjunto limitado de tipos de escenarios. El escenario de área más fundamental es una distribución normal bivariada sobre la última posición conocida (LKP), en la que la distribución refleja la incertidumbre del sistema de posición y cualquier otra incertidumbre adicional (por ejemplo, información errónea, retraso temporal). El segundo escenario básico es un polígono bien formado cubierto por una distribución uniforme (el escenario de área). El escenario de la zona funciona bien cuando la embarcación de origen (por ejemplo, un barco pesquero) frecuenta una región conocida (por ejemplo, los caladeros). Un escenario de viaje es el tránsito entre una serie de puntos (LKP) o zonas con los posibles periodos de actividad dentro de las zonas (por ejemplo, merodeo, pesca). Los viajes pueden ser interactivos desde el punto de vista medioambiental (influidos por las condiciones meteorológicas y oceanográficas) o no (sin influencia directa de las condiciones meteorológicas y oceanográficas). Otros escenarios más especializados se utilizan para las observaciones de las erupciones; líneas simples o cruzadas de la dirección de radio informando de los sitios más altos; y la navegación por estima desde una LKP. En estos escenarios, también hay incertidumbre sobre el momento del incidente. De nuevo, si se informa directamente, esta incertidumbre se reduce. En otros casos, la incertidumbre en el tiempo puede extenderse desde la última vez que se sabe que el buque estaba a salvo hasta la entrega de una notificación por parte de un tercero. Esto puede ser desde horas hasta un día o más. En algunos casos de la SAR no se sabe con certeza cuál es el objeto que se busca: embarcaciones o balsas salvavidas en posición vertical, inundadas o volcadas, con o sin personas a bordo; persona en el agua (PIW) con chaleco salvavidas, traje de supervivencia, fallecido o nadando. Los escenarios interactivos con el medio ambiente tienen en cuenta el impacto de las condiciones meteorológicas y oceanográficas en el propio viaje, la probabilidad de que una embarcación originaria se convierta en un objeto SAR, la distribución de un incidente de la aeronave (ruptura en vuelo o pérdida de combustible que lleve a un planeo controlado) o la modificación de la trayectoria debido a una propulsión limitada (por ejemplo, un nadador o remero activo). Un escenario de viaje imita el viaje de la embarcación de origen a lo largo de una serie de líneas de pista desde el inicio hasta el final, donde cada línea de pista tiene una probabilidad uniforme de convertirse en el objeto de deriva en peligro. Sin embargo, se pueden introducir "peligros" para aumentar la probabilidad de generar una partícula de objeto a la deriva en peligro cuando la embarcación de origen transita por el momento y el lugar del peligro. Un peligro puede ser permanente o temporal. Por ejemplo, se han prototipado tres escenarios de aeronaves para dar cuenta de los tres tipos principales de incidentes de aeronaves: una pérdida de control en altitud que genera una distribución de LKP en función de la altitud en el incidente; una ruptura en vuelo con la dispersión de los detritos por la dinámica y el perfil del campo de viento hacia la superficie del mar; y una aeronave que se queda sin combustible y que planea en una dirección o hacia un destino, pero que se ve afectado por el viento en altitud. El último tipo de escenario interactivo es el de un nadador (normalmente un buceador con bombona o sin ella) en apuros que nada activamente en dirección a un destino. El escenario del nadador activo tiene tanto un vector de natación, que se ve afectado por las olas, como un vector de deriva de la corriente; puede convertirse en una PIW pasiva, por ejemplo, por la noche. Todos estos escenarios requieren el acceso a los datos meteorológicos y oceánicos para ser implementados.

Una vez que se proporcionan los escenarios al modelo de trayectoria y se devuelven las predicciones de probabilidad de deriva, los planificadores SAR pueden proceder a planificar los esfuerzos de búsqueda de cada una de las unidades de búsqueda. Para la primera época de búsqueda, un planificador de la SAR es bastante capaz de planificar un esfuerzo de búsqueda optimizado para los recursos disponibles, teniendo en cuenta las diferentes capacidades de las unidades de búsqueda y sus sensores, las condiciones en la escena y los objetos de búsqueda en los que cada unidad podría centrar sus esfuerzos. Sin embargo, si el esfuerzo de búsqueda inicial es infructuoso y se requieren esfuerzos de búsqueda posteriores, entonces se requiere una herramienta de planificación SAR para tener en cuenta el esfuerzo de búsqueda inicial infructuoso y actualizar la distribución de probabilidad, que necesitará una nueva actualización de la deriva. Para planificar y contabilizar el esfuerzo de búsqueda, se necesitan datos ambientales basados en qué parámetros influyen en el rendimiento de los sensores. Estos parámetros de datos incluyen, entre otros, la visibilidad, las precipitaciones, las temperaturas del aire y de la superficie del mar, la velocidad del viento, la altura de las olas, el porcentaje de cabrillas, el ángulo del sol, la fase lunar y la nubosidad.

No todas las búsquedas tienen éxito y el planificador de la SAR debe considerar en algún momento si continuar o suspender la búsqueda (Búsqueda activa suspendida a la espera de nuevos acontecimientos (ACTSUS)). Esta decisión es una coyuntura crítica para las víctimas, sus familias y las autoridades de la SAR. Las predicciones sobre el deterioro del estado fisiológico del superviviente y el tiempo de supervivencia futuro son esenciales para el planificador de la SAR durante la búsqueda. El planificador de la SAR utiliza estas predicciones para optimizar los recursos de búsqueda y para considerarlos, junto con otros aspectos de la búsqueda, para tomar la decisión ACTSUS (Turner et al, 2009). Los modelos de destino para estimar la supervivencia en el mar se limitan en la actualidad a la generación de calor fisiológico frente a la pérdida de calor. Estos modelos hipotérmicos de supervivencia se basan en las temperaturas del aire y de la superficie del mar junto con la velocidad del viento, la humedad relativa, las olas y la radiación solar como parámetros de entrada ambientales, y son necesarios durante 5 días más allá del momento del incidente (Tipton et al., 2022).

Dado que el incidente se ha producido antes de la notificación, se necesitarán predicciones de deriva desde el momento más temprano posible hasta que el siguiente conjunto de recursos concluya sus esfuerzos de búsqueda. El modelo de trayectoria de la deriva necesitará las condiciones iniciales, es decir, los escenarios y los objetos de la deriva y el cronograma previsto de los recursos.

Cuando la notificación de un incidente de la SAR llega a las autoridades de la SAR, su objetivo inmediato es activar los recursos SAR tan pronto como sea posible, con una tarea inicial o preliminar, tanto si la predicción de la deriva está disponible y es necesaria como si no. Para ello, es necesario que el tiempo que transcurre desde que las autoridades de la SAR solicitan o necesitan una predicción de deriva hasta que la entregan sea operativamente aceptable para las autoridades de la SAR. De los tres esquemas generales para los sistemas de datos (Sección 2.1.2) para las emergencias SAR, se emplean los primeros o terceros sistemas. El sistema de datos uno a uno ha sido y sigue siendo ampliamente utilizado para apoyar los cálculos de la trayectoria de deriva de la SAR. La limitación de este enfoque es que los controladores de la SAR suelen estar limitados en cuanto al alcance y la complejidad de los escenarios de entrada.

2.3.2 Examen de las capacidades existentes

A continuación, nos centraremos principalmente en los métodos de respuesta de la SAR, ya que son sin duda los más completos y bien establecidos y constituyen la base para tratar todos los demás objetos a la deriva. Las respuestas a los objetos a la deriva no SAR son más específicas para las regiones y las industrias y no están (todavía) cubiertas por marcos globales similares a los de la SAR. Sin embargo, los objetos no SAR son cada vez más conocidos por el público y los diversos organismos de respuesta se ocupan ahora de más clases de objetos, por ejemplo, contenedores de carga, plásticos, piedra pómez y cenizas. Al final de esta sección se comentan brevemente los objetos no SAR.

2.3.2.1 Búsqueda y salvamento (SAR)

Con la llegada de los modelos oceánicos operacionales de alta resolución y la mejora continua de la PNT, el potencial para hacer predicciones más detalladas del destino de los objetos a la deriva ha crecido enormemente en las últimas dos décadas (Breivik et al., 2013). Sin embargo, aunque la mejora de las predicciones meteorológicas ha permitido mejorar el forzamiento, los modelos de deriva han permanecido en cierto modo impermeables a los avances de la modelización oceánica y la predicción meteorológica numérica. Esto puede entenderse mejor a la luz de las grandes incertidumbres en las propiedades de deriva de los objetos SAR, así como la precisión de los datos de forzamiento utilizados.

En primer lugar, sin una estimación adecuada de las propiedades básicas de la deriva y sus incertidumbres asociadas, la predicción de la deriva y la expansión de una zona de búsqueda sigue siendo difícil. Un cambio importante se produjo cuando el método directo para medir el abatimiento de un objeto a la deriva se convirtió en una práctica común (Allen y Plourde, 1999; Allen, 2005; Breivik et al., 2011; Hodgins y Mak, 1995; Hodgins y Hodgins, 1998). El método directo mide el movimiento del objeto en relación con el agua del entorno mediante un medidor de corriente. Los medidores de corriente lo suficientemente pequeños y flexibles como para ser remolcados o fijados directamente a un objeto SAR empezaron a estar disponibles en la década de 1980 y, desde entonces, casi todos los experimentos de campo en objetos SAR han empleado una técnica de medición directa (Allen y Plourde, 1999; Breivik et al., 2011). El método directo, junto con una definición rigurosa del abatimiento como el movimiento del objeto inducido por el viento (altura de referencia de 10 m) y las olas en relación con la corriente ambiente (entre 0,3 y 1,0 m de profundidad) y, finalmente, la descomposición de los coeficientes de abatimiento en componentes a favor del viento y de viento de través, permite seguir un procedimiento riguroso para realizar experimentos de campo de abatimiento. Véase Allen y Plourde (1999); Breivik y Allen (2008); Breivik et al. (2011) para más detalles.

En segundo lugar, al igual que con la modelización de la predicción de derrames de petróleo, hay una dependencia crucial de la precisión de los datos de viento y la corriente. Una vez más, las corrientes son las menos precisas y representan la mayor fuente de incertidumbre en las predicciones de la deriva. La capacidad de predicción de las corrientes oceánicas se analiza con más detalle en la sección 2.1.2.3.

No fue hasta la década de los años 2000 cuando se dispuso de todos los componentes necesarios para una modelización totalmente estocástica que utilizara coeficientes de deriva de alta calidad y predicciones detalladas de corrientes y vientos. El primer modelo operativo de abatimiento que empleó la tabla de coeficientes de deriva del Servicio de Guardacostas de los Estados Unidos (USCG) (Allen y Plourde, 1999) con campos de corriente de modelos oceánicos de alta resolución y campos de viento cercanos a la superficie entró en funcionamiento en 2001 (véase Hackett et al. 2006; Breivik y Allen 2008; Davidson et al. 2009). La era moderna de la planificación de la SAR que implica las actualizaciones posteriores bayesianas después de la búsqueda comenzó en 2007 cuando el USCG lanzó el Sistema de Planificación Óptima de Búsqueda y Salvamento (SAROPS), véase Kratzke et al. (2010). SAROPS emplea un servidor de datos medioambientales que obtiene las predicciones de viento y corriente de varias fuentes. Recomienda rutas de búsqueda para múltiples unidades de búsqueda que maximizan el aumento de la probabilidad de detección de un incremento de búsqueda. Al igual que el CASP, calcula distribuciones posteriores bayesianas sobre la localización del objeto teniendo en cuenta la búsqueda fallida y el movimiento del objeto. Los recientes desarrollos en el Mar Mediterráneo (Coppini et al. 2016) demostraron la capacidad operativa para apoyar la operación de la SAR a través de la implementación del modelo Leeway con el CMEMS.   
El servicio denominado Ocean-SAR está a disposición de los usuarios en el sitio web [www.ocean-sar.com](http://www.ocean-sar.com).

Aunque el nivel de sofisticación y detalle ha crecido drásticamente en las últimas dos décadas, las incertidumbres en las predicciones de la SAR siguen siendo persistentemente elevadas. El reto fundamental de estimar y predecir las zonas de búsqueda en presencia de grandes incertidumbres sigue siendo esencialmente el mismo, aunque se hayan disminuido ciertas fuentes de error. El lento progreso que se ha hecho en las últimas décadas en la reducción de la tasa de expansión de las zonas de búsqueda (tal vez la mejor estimación de la mejora) es una consecuencia inevitable de la planificación de la SAR que se ve afectada por una variedad de errores en los campos de corriente, los campos de viento, los procesos físicos que faltan (por ejemplo, los efectos de las olas, véase Breivik y Allen 2008; Röhrs et al. 2012), la incertidumbre en la LKP y, no menos importante, por las malas estimaciones de las propiedades de deriva reales del objeto. De hecho, a veces ni siquiera se conoce el tipo de objeto, lo que convierte el ejercicio de modelización en una integración de conjuntos que abarcan una serie de categorías de objetos. Todas estas fuentes de error se acumulan y hacen que la planificación de la SAR sea tanto un arte como una ciencia en la que los rescatadores siguen confiando tanto en sus "corazonadas" como en los resultados de sofisticadas herramientas de predicción. El hecho de que la mayoría de los casos de SAR se produzcan cerca de la costa y en aguas parcialmente protegidas (Breivik y Allen, 2008) agrava las dificultades, ya que la resolución de los modelos oceánicos operativos en muchos lugares del mundo sigue siendo insuficiente para resolver las características cercanas a la costa.

A lo largo de las dos últimas décadas, estos avances y obstáculos para seguir progresando se han presentado principalmente a través de una serie de talleres sobre "Tecnologías para la búsqueda y el salvamento y otras operaciones marinas de emergencia" (2004, 2006, 2008 y 2011) organizados por el Instituto Francés de Investigación Marina IFREMER con el apoyo del Instituto Meteorológico de Noruega, el USCG, la Fundación Franco-noruega y la Comisión Técnica Mixta OMM-COI sobre Oceanografía y Meteorología Marina (CMOMM).

2.3.2.2 Desechos marinos y peligros para la navegación

Al igual que los típicos objetos SAR y los derrames de petróleo, puede ser necesario rastrear los desechos marinos flotantes para permitir la limpieza o mitigar su peligro para los buques[[3]](#footnote-4). Entre estos objetos se encuentran los contenedores marítimos perdidos por la borda, el contenido flotante de los contenedores marítimos dañados, la basura plástica transportada al océano desde los ríos o arrojada por la borda, los desechos de los accidentes de aeronaves y de los barcos que se hunden, el exceso de sargazo, así como los desechos naturales de las inundaciones o de los ríos desbordados (por ejemplo, troncos de árboles) y de los volcanes (piedra pómez y ceniza). Aparte de los contenedores de transporte, no ha sido posible medir directamente las características del abatimiento de los desechos marinos debido a su tamaño típico (es decir, más pequeño que la actual generación de currentómetros). Sin embargo, una técnica sugerida por Sutherland et al. (2020) podría aplicarse en casos específicos para retroceder el abatimiento de los objetos a la deriva en cuestión.

La respuesta a los objetos no SAR es más parecida a la respuesta en casos de derrames de petróleo que a las embarcaciones SAR y a los supervivientes. Esto se debe a la diversidad de objetos no SAR y al desconocimiento de sus características de abatimiento. Además, el objetivo es mitigar los daños y centrarse en la limpieza, más que en salvar vidas. Muchos de estos objetos no se deterioran muy rápido o no se deterioran en absoluto, excepto los contenedores de transporte que acaban hundiéndose y las ballenas muertas que se hinchan, se desinflan o se consumen antes de hundirse o varar. Al igual que en la modelización de derrames de petróleo, en un incidente pueden intervenir muchos miles de objetos, por lo que se genera una distribución de los objetos reales que puede compararse con la distribución de partículas modelizada.

2.3.3 Evolución prevista para la mejora de los servicios

En las subsecciones anteriores se han presentado las mejores prácticas actuales en la predicción operativa de personas y objetos a la deriva. Se ha demostrado que hay modelos y servicios bien establecidos que pueden ser desplegados o accesibles y utilizados por nuevos actores y regiones. En relación con las novedades generales enumeradas en la sección 2.1.4, la presente sección presenta algunas novedades importantes que pretenden mejorar la eficacia de los servicios de predicción y la calidad de sus productos.

1. La **continuación del trabajo de campo** es crucial para ampliar la taxonomía de los objetos de búsqueda y para volver a estudiar objetos que sólo se han estudiado con métodos de campo más antiguos.
2. Los **datos de forzamiento de mayor resolución horizontal** siguen siendo un problema importante, dado que la mayoría de los casos SAR se producen cerca de la costa (Breivik et al., 2013). Una mayor resolución del modelo para los datos operativos ayuda al sistema a "ver" más detalles de las aguas costeras (islas, fiordos, etc.), y también promete producir un movimiento más realista de los objetos.
3. **Despliegue de radares costeros HF**. Dado que las operaciones SAR tienden a producirse cerca de la costa, también hay un beneficio potencial en el uso de los campos de corriente observados desde el radar HF. Estas observaciones pueden utilizarse directamente o mezclarse con los resultados de los modelos oceánicos para obtener una previsión de corto alcance, aunque su horizonte temporal está limitado a unas 24 horas (véase, por ejemplo, Barrick et al., 2012). Además, los datos pueden asimilarse al modelo oceánico para mejorar las predicciones actuales.
4. **La modelización por conjuntos multimodelos de corrientes superficiales** se utiliza cada vez más para controlar la incertidumbre asociada a los campos de forzamiento. El objetivo y los beneficios son similares a los descritos en la sección 2.3.2.1. Dado que la mayoría de los modelos SAR operativos se basan en conjuntos (partículas), la difusión de miembros de conjunto en una variedad de campos de forzamiento es sencilla. Los conjuntos de campos de viento también serían útiles, pero las incertidumbres son menores en las primeras 48 horas y la mayoría de las búsquedas requieren predicciones relativamente cortas.
5. **Colaboración multinacional para mejorar los servicios**. La ventaja de la colaboración entre los servicios nacionales de predicción de la deriva ya se ha mencionado en relación con los derrames de petróleo (véase la sección 2.2.3 §2). Los mismos beneficios pueden obtenerse para las operaciones SAR, especialmente a nivel regional, ya que la mayoría de ellas tienen lugar cerca de la costa.
6. **Servicios de predicción retrospectiva** - La trayectoria hacia atrás es importante para que los equipos de rescate determinen el movimiento de un objeto entre su LKP y la hora actual. La recopilación de los campos de análisis de los vientos y las corrientes en pasos regulares de tiempo puede ayudar a las autoridades a determinar rápidamente las zonas de búsqueda más probables.

2.3.4 Revisión de las necesidades de usuario para la información meteorológica y oceanográfica para la SAR y los objetos a la deriva

**Necesidades de usuario**

|  |  |
| --- | --- |
| Organización internacional | OMI |
| Documentación internacional | **Convenio internacional para la seguridad de la vida humana en el mar, 1974 (SOLAS) (el convenio para la seguridad)**  **Convenio internacional sobre búsqueda y salvamento marítimos, 1979 (Convenio SAR).**    El Manual internacional de los servicios aeronáuticos y marítimos de búsqueda y salvamento (IAMSAR) describe los procedimientos para coordinar las operaciones SAR. El Manual define las características de la deriva de los objetos en relación con los efectos de los vientos y las corrientes. |
| Cualquier frontera de coordinación internacional | Tanto la OMI como la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) patrocinan los planes SAR globales, asignando las SRR a las naciones.  Las SRR fueron desarrollados por la OACI y la OMI en consulta con los países miembros y suelen reflejar las regiones de vuelo existentes y la proximidad a los países.  Una Autoridad SAR es responsable de la coordinación de la SAR durante una situación de socorro marítimo o aéreo en su SRR asignada. |
| Responsabilidad por responder | Centro común de coordinación de salvamento (JRCC) o autoridad nacional designada. |
| Requisitos de respuesta operativa | Seguridad y eficacia de los equipos de búsqueda, evaluación del tiempo de supervivencia de la persona, predicción del movimiento del objeto o de la persona. |
| Cómo se comunica el incidente | Los buques son responsables de informar a la autoridad nacional sobre la persona que ha caído por la borda. Las embarcaciones o personas desaparecidas pueden ser comunicadas al JRCC a través del SMSSM. |
| Cómo se coordina la respuesta | El JRCC o la autoridad nacional designada es responsable de coordinar la operación de búsqueda y de organizar la información meteorológica y oceánica para apoyar la evaluación de la deriva y la planificación de la búsqueda. |

Diagram

Description automatically generated

**Figura 2.3.2: Ejemplo de salida de un modelo de objeto a la deriva que pronostica la deriva de una balsa salvavidas utilizando un conjunto de partículas a la deriva.**

Se muestra una instantánea después de 102 horas de deriva. Los pequeños segmentos de líneas rojas y verdes indican la posición de las partículas del conjunto y su trayectoria durante un periodo de 1 hora. Los colores rojo y verde indican los dos ángulos de abatimiento. El círculo amarillo es la posición inicial, y la línea amarilla muestra la trayectoria del centroide de la nube de partículas durante todo el periodo de predicción (5 días). Los polígonos rojos y verdes son las estimaciones de la envolvente convexa de las zonas de búsqueda para cada ángulo de abatimiento.

### **Sección 2.4: Vertidos de radionucleidos**

2.4.1 Información general

El OIEA creó en 2005 el Centro de Respuesta a Incidentes y Emergencias (IEC) para prestar asistencia permanente a sus Estados Miembro en la gestión de sucesos nucleares y radiológicos, incluidas las amenazas a la seguridad, coordinando los esfuerzos, las contribuciones y las acciones de los expertos del OIEA, los Estados Miembro y las organizaciones internacionales. El IEC es el centro de coordinación mundial para la preparación, la comunicación y la respuesta internacional ante incidentes y emergencias nucleares y radiológicas, independientemente de que se produzcan por accidente, negligencia o acto deliberado. Es el centro mundial para la coordinación internacional de la preparación para situaciones de emergencia y respuesta a la asistencia.

En 2012, el IEC llevó a cabo un análisis de deficiencias de las capacidades identificadas internamente para responder, evaluar y predecir durante eventos o emergencias radiológicas o nucleares, con un enfoque particular en los escenarios de accidentes para las centrales nucleares. En el período que siguió al accidente de Fukushima, quedó claro que sería una ventaja contar con capacidades de modelado marino accesibles en el IEC como parte de los acuerdos normales de respuesta en caso de emergencia. Esto se debe a la preocupación por las grandes cantidades de agua contaminada que se liberan en el océano.

En 2013 el IEC llevó a cabo una reunión de consultoría titulada "Modelización marina y acuática durante accidentes de reactores de energía nuclear 29 de julio a 31 de julio y reunión del equipo de trabajo de la CMOMM ,1 de agosto de 2013". Esta consultoría invitó a expertos en modelización marina y acuática a Viena para debatir el uso de dichas capacidades durante la respuesta a un evento de liberación radiológica. La consultoría exploró los métodos disponibles para realizar este tipo de modelización, debatió sobre los grupos de expertos y organizaciones existentes en este campo y redactó propuestas de actuación futura para que el IEC mejore sus capacidades en este ámbito (tanto a corto como a largo plazo). En la consultoría se discutieron las características de los servicios y los tipos de resultados de los modelos marinos que podrían proporcionarse a un equipo técnico del IEC durante un evento para que proporcionen un análisis y una visión útiles sobre la posible evolución de la contaminación marina. Además, en la reunión de asesoramiento se debatió qué tipo de información podría proporcionar el IEC a los Estados Miembro para su propia planificación y comprensión durante un evento.

En la reunión se debatieron las opciones para acceder a las capacidades de modelización oceanográfica en el IEC durante un evento de liberación radiactiva. Los participantes coincidieron en que la opción más idónea para el IEC en esta fase es organizar una capacidad de expertos externos, alojados en el exterior y disponibles cuando se necesiten. La aplicación de este acuerdo puede ser similar al acuerdo existente entre el IEC y la OMM para apoyar la modelización meteorológica. Dichos protocolos pueden aplicarse a través de RANET, en función de las organizaciones de expertos en modelización marina identificadas.

Durante la reunión, el grupo de expertos debatió sobre las recomendaciones generales que podrían proporcionarse al IEC para que sirvieran de orientación durante cualquier cooperación futura con organizaciones con capacidades de modelización marina existentes para establecer acuerdos de trabajo. Las recomendaciones formuladas se presentan en el Anexo 1.

2.4.2 Examinar las capacidades existentes

Un sistema de modelización marina para la simulación de la dispersión de material radiactivo consta de un modelo de circulación oceánica y de un modelo de dispersión de radionucleido. El modelo de circulación oceánica proporciona la estructura del océano como las corrientes, los remolinos y las densidades del agua desde la superficie del mar hasta el fondo. El modelo de dispersión de radionucleidos calcula el movimiento de los materiales basándose en la estructura del océano mediante el modelo de circulación, tomando la información del término de la fuente de liberación (tiempo de liberación, cantidad y forma química del material) tanto para una liberación directa en el mar como desde la aportación de contaminantes atmosféricos.

En Japón, varios grupos realizaron simulaciones de dispersión oceánica tras el accidente de Fukushima. Aunque cada grupo utilizó un conjunto diferente de modelos y mostró resultados distintos, al revisarlos se descubrió que la débil corriente hacia el sur a lo largo de la costa de Fukushima determinó la dirección inicial del transporte y que las estructuras de tipo remolino de mesoescala y los sistemas de corrientes superficiales contribuyeron a la dispersión en zonas más allá de la plataforma continental. Entre ellos, el Organismo de Energía Atómica de Japón (JAEA) llevó a cabo la simulación y validación de la dispersión del Cs137 para describir su transición a medio y largo plazo en el océano, utilizando un modelo de dispersión nuclear (GEARN) desarrollado por el JAEA y un modelo de circulación oceánica (MOVE/MRI.COM, 1/10◦ para el Pacífico noroccidental) desarrollado por el Instituto de Investigación Meteorológica (MRI/JMA). Muestra que el Cs137 liberado directamente avanza hacia el este a lo largo de la corriente del Kuroshio, siendo mezclado y diluido por remolinos de mesoescala y llega a 170⁰W después de un año.

En EE. UU., el Centro Nacional de Predicción del Medioambiente (NCEP) del Servicio Meteorológico Nacional (NWS) utilizó el rastreo de partículas para predecir el movimiento de los radionucleidos en el océano poco después del accidente nuclear cerca de Fukushima. Se utilizaron los campos diarios previsión inmediata/predicción del Modelo Oceánico de Coordenadas Híbridas (HYCOM) de 1/12°, implementado en el NCEP como Sistema Global de Previsión Oceánica en Tiempo Real (RTOFS-Global), para rastrear las partículas inertes en la superficie del océano, asumiendo que el comportamiento de la superficie está razonablemente representado por la capa mixta del océano, y que los radionucleidos están mayormente contenidos y distribuidos por la capa mixta superior del océano. El objetivo era producir información procesable para un Grupo de Trabajo Interinstitucional (GIT) gubernamental en casi tiempo real utilizando los recursos disponibles.

Con la información de rastreo de partículas, el NCEP elaboró estimaciones del tiempo de retención de los radionucleidos cerca de la costa, así como la escala de tiempo de dispersión de estos materiales a través del Océano Pacífico, en particular por los sistemas de corrientes persistentes como el Kuroshio y su extensión, y el Oyashio. Esto ayudó a identificar tanto las áreas potencialmente seguras en el Pacífico, como las áreas de exposición potencial en las escalas de tiempo de semanas a meses. Mediante el rastreo de partículas combinado con la aportación de contaminantes atmosféricos de radionucleidos, se produjo una primera estimación de la contaminación del agua superficial del océano.

Los primeros productos de rastreo de partículas se entregaron de forma rutinaria al IWG en las cuatro semanas siguientes a la primera liberación significativa de radionucleidos. Las primeras estimaciones cuantitativas de contaminación en mar adentro se pusieron a disposición del IWG en aproximadamente 6 semanas (H. Tolman et al., 2013).

En Francia, el grupo SIROCCO (del CNRS y de la Universidad de Toulouse) realizó, a petición del OIEA, simulaciones con el modelo de circulación oceánica 3D SIROCCO para investigar la dispersión en el agua de mar de los radionucleidos liberados por el accidente nuclear de Fukushima. El modelo utiliza una cuadrícula horizontal estirada con una resolución horizontal variable, desde 600 m cerca de Fukushima, hasta 5 km mar adentro. Los campos iniciales y las condiciones de contorno lateral abierto son proporcionados por el sistema global 1/12° Mercator. El grupo SIROCCO fue el primero en publicar en la web resultados sobre la dispersión marina de radionucleidos (Estournel et al., 2012).

De 2012 a 2014, el Consejo de Ciencias de Japón organizó una intercomparación de modelos de dispersión atmosférica y oceánica que simulaban el futuro de las emisiones radiactivas de Fukushima. Los resultados se publicaron a finales de 2014 (Consejo de Ciencias de Japón, 2014). Están disponibles gratuitamente en http://cesd.aori.u-tokyo.ac.jp/cesddb/scj\_fukushima/index\_j.html.

El informe concluye que, aunque existen similitudes entre las distintas dispersiones simuladas, se encuentran diferencias significativas entre los modelos en lo que respecta a las distribuciones en el espacio y el tiempo que resultan de los distintos enfoques y términos de fuente aplicados. No es posible identificar qué modelo produce los resultados más cercanos a las mediciones. La variabilidad de la circulación marina en la zona de dispersión entre el Kuroshio y el Oyashio al este de Fukushima explica en gran medida esta variabilidad debido a la presencia de remolinos inestables.

Esta intercomparación muestra que actualmente existen varios modelos capaces de realizar simulaciones de la deriva de los radionucleidos en el océano. Las diferencias entre las simulaciones sobre un periodo de dispersión limitado (de marzo a junio de 2011) ilustran el peligro de su uso para evaluar la dispersión de las emisiones de radionucleidos a medio plazo. Las mediciones de muestras en el mar siguen siendo la única forma fiable de estimar la dispersión en esta zona.

Las estimaciones del término fuente para las simulaciones de Fukushima son muy variables. La estimación del vertido directo al mar en abril de 2011 sigue siendo objeto de debate entre los distintos investigadores. Se han realizado muchas evaluaciones sobre las entradas de 137Cs. La deposición atmosférica en la superficie del mar representó cantidades de aproximadamente el mismo tamaño, pero con una amplia distribución en el Pacífico Norte en los primeros meses después del accidente.

El Grupo de Trabajo OIEA - MODARIA sobre la modelización de la dispersión y transferencia marina de radionucleidos liberados accidentalmente desde instalaciones terrestres publicó un documento sobre los modelos aplicados para simular la dispersión marina del 137 Cs tras accidentes nucleares recientes (Periáñez et al., 2014). Se aplicaron modelos de dispersión de última generación para simular la dispersión del 137 Cs procedente del desastre de la central nuclear de Chernóbil en el Mar Báltico y de las emisiones de la central nuclear de Fukushima Daiichi en el Océano Pacífico tras el tsunami de 2011. Se utilizó una gran variedad de modelos, desde los de caja hasta los totalmente tridimensionales, y todos incluían las interacciones entre el agua y los sedimentos. La concordancia entre los modelos fue muy buena en el Báltico. En el caso de Fukushima, los resultados de los modelos sólo podrían considerarse aceptablemente acordes tras un proceso de armonización de los modelos consistente en utilizar exactamente los mismos forzamientos (circulación del agua y parámetros) en todos los modelos. Se comprobó que la dinámica del sistema considerado (magnitud y variabilidad de las corrientes) era esencial para obtener un buen acuerdo entre los modelos. Se destacaron las dificultades para desarrollar modelos operativos de apoyo a la toma de decisiones en estos entornos dinámicos.

Definieron tres etapas que deben considerarse después de una emergencia, cada una de las cuales requiere enfoques de modelización específicos. Se trata de las fases de emergencia, de postemergencia y de larga duración.

1. Fase de emergencia: La escala temporal de la simulación se extiende desde horas hasta algunos días y la escala espacial a resolver desde decenas hasta algunos cientos de kilómetros. En este caso, el modelo debe dar una respuesta muy rápida (en cuestión de segundos a unos pocos minutos) para decidir, por ejemplo, si hay que prohibir inmediatamente el baño en una playa o la zona en la que debe prohibirse la pesca. Esta respuesta rápida puede lograrse utilizando datos sobre la previsión de las corrientes y la difusividad de las olas a partir de modelos marinos operativos y utilizando modelos lagrangianos para predecir el transporte de radiactividad. El horizonte temporal de esta predicción de las corrientes de agua y del oleaje está limitado por la escala temporal de las previsiones meteorológicas, que es de unos 7-10 días. Ejemplos de este enfoque son Periáñez y Pascual-Granged (2008), Estournel et al. (2012), Duffa et al. (2016), Garraffo et al. (2016) y Maderich et al. (2016). La contaminación por productos marinos también puede estimarse mediante modelos dinámicos de la biota, como hicieron Duffa et al. (2016). En esta fase inicial, el resultado del modelo también ayudaría a desarrollar estrategias de muestreo para el seguimiento.

2. Fase de post-emergencia: la escala temporal se extiende a unas pocas semanas y la espacial al orden de 100 - 1000 km. Podemos pensar en una planta desalinizadora que produzca agua dulce para el riego a unos cientos de kilómetros de la instalación nuclear. Se debe decidir si se debe dejar de tomar agua de mar. En esta fase, hay más tiempo para dar una respuesta que en la primera. Sin embargo, el uso de previsiones oceánicas a corto plazo no es viable. La posible solución es utilizar los datos de períodos análogos de años anteriores y la formación de conjuntos de predicciones de radiactividad para estimar la futura contaminación del agua, los sedimentos y la biota. Con respecto al modelo de dispersión, se podrían utilizar tanto enfoques lagrangianos como eulerianos (por ejemplo, Kawamura et al., 2011, Simonsen et al (2017) y Periáñez et al., 2012). Se ha demostrado que las interacciones con la materia en suspensión y los sedimentos del fondo marino afectan al patrón de transporte tras el accidente de Fukushima (Choi et al., 2013; Min et al, 2013).

3. Fase a largo plazo: esta fase implicaría la evaluación de las consecuencias a largo plazo del accidente, incluyendo las transferencias de radionucleidos a los sedimentos y a la biota, así como la evaluación del papel potencial de los sedimentos como fuente de contaminación una vez que las concentraciones de radionucleidos en el agua de mar hayan disminuido (Periáñez, 2003). Esta evaluación puede llevarse a cabo con modelos eulerianos, en los que estos complejos procesos se incluyen más fácilmente que en los sistemas lagrangianos y en los modelos de biota dinámica acoplada (Vives i Batlle et al., 2016). Los campos de corrientes oceánicas se obtienen a partir del promedio temporal de los resultados de los modelos de circulación oceánica. Se pueden realizar simulaciones de varios meses para escalas espaciales de algunos cientos de kilómetros. Para evaluaciones incluso a más largo plazo (de años a décadas y miles de kilómetros), algunos autores recomiendan utilizar modelos de caja (Lepicard et al., 2004); Iosjpe et al., 2009). Para estas escalas de tiempo, el coste computacional de utilizar modelos tridimensionales resulta prohibitivo y los resultados no son mejores que los modelos de caja más baratos.

En cualquier caso, para entornos muy dinámicos se ha comprobado que los resultados de los modelos son extremadamente sensibles al modelo que se utiliza para predecir la circulación oceánica. Por lo tanto, el modelo de circulación oceánica debe seleccionarse con mucho cuidado y tras una comparación detallada con las mediciones locales de las corrientes. En este sentido, Duffa et al. (2016) indican que las predicciones locales de alta resolución de la circulación marina deberían utilizarse para la modelización de emergencias. Aunque los modelos de circulación oceánica global producen imágenes realistas de la circulación general en el océano, sus resultados difieren en la escala local en entornos dinámicos debido, al menos en parte, a su resolución espacial relativamente gruesa.

En general, los modelos que se utilicen para las emergencias por emisiones de radionucleidos en el medio marino deben ajustarse cuidadosamente a cada lugar concreto, es decir, a cada instalación nuclear para la que se decida disponer de una herramienta de modelización que sirva de apoyo a la toma de decisiones tras una posible emergencia que se produzca en ella. En otras palabras, no podemos confiar a priori en los modelos genéricos que importan las predicciones de las corrientes oceánicas si se trata de un entorno muy dinámico.

2.4.3 Desarrollos para mejorar los servicios

Como se ha mostrado anteriormente, existen modelos útiles para la deriva y el destino de la radiactividad en el océano. Los servicios de predicción pueden adaptarse fácilmente a partir de los servicios de deriva y destino existentes para, por ejemplo, los derrames de petróleo, y pueden ser desplegados y utilizados por nuevos actores y para nuevas regiones. En relación con los avances generales enumerados en la sección 2.1.4, la presente sección presenta algunos avances importantes que tienen por objeto mejorar la eficacia de los servicios de predicción de la dispersión de radionucleidos y la calidad de sus productos.

1. **Acceso a los datos de origen, mediciones de campo de radionucleidos y desarrollo de una técnica inversa para la evaluación del término de origen**. La información sobre el término de origen de emisión (lugar y hora de la emisión, duración y cantidad de la emisión, y forma química del material radiactivo) tanto para una emisión directa al mar como para la aportación de contaminantes atmosféricos es un elemento clave. Esto implica que el resultado de las simulaciones atmosféricas está disponible más fácilmente.

2. **Información sobre la incertidumbre**. Para la modelización de la predicción de la deriva y la dispersión de materiales radiactivos, son viables tanto el conjunto de modelos individuales como los métodos MME. Por ejemplo, dadas las mejoras en el acceso a los datos descritas anteriormente, es bastante factible obtener una serie de conjuntos de datos de forzamiento para forzar el mismo modelo de deriva y dispersión de material radiactivo. Por el contrario, en algunas zonas ya existen varios sistemas operativos de predicción de la deriva y la dispersión de materiales radiactivos que se solapan geográficamente; es necesario llegar a acuerdos sobre la realización de predicciones para eventos dentro de la zona común.

3. **Colaboración multinacional para el desarrollo de modelos**. El desarrollo de códigos de modelos comunitarios abiertos es especialmente ventajoso en el contexto del despliegue de modelos de deriva y dispersión de material radiactivo en las naciones marítimas en desarrollo. Un requisito importante para el desarrollo de modelos es la identificación de evaluaciones comparadas y casos. Sería especialmente valioso establecer algunos casos reales bien descritos para los que se disponga de datos de forzamiento y validación.

4. **Colaboración multinacional para mejorar los servicios**. La ventaja de la colaboración entre los servicios nacionales de predicción de la deriva ya se ha mencionado anteriormente en relación con el accidente de Fukushima y en el contexto más formal de la predicción de conjuntos multimodelos (MME; véase la sección 2.1.4). Más allá del intercambio de resultados de los modelos, existe una ventaja potencial en la colaboración en otros eslabones de la cadena de producción. Por ejemplo, intercambio sólido de datos de forzamiento, condiciones iniciales (datos de detección), formatos de archivo acordados, métodos de visualización, archivo de datos de casos de prueba, etc.

En relación con la sección 2.1.4, otro aspecto de la colaboración multinacional es el apoyo al desarrollo en las naciones marítimas que actualmente carecen de servicios propios adecuados de predicción de la deriva y la dispersión de materiales radiactivos. Compartir servicios a nivel regional es una alternativa factible, dado el mejor acceso a los datos de forzamiento geofísico y a los códigos de los modelos de deriva, y puede ser una forma rentable de avanzar. Aunque todo el océano mundial puede ser cubierto por sistemas globales que funcionan en unos pocos países desarrollados, la necesidad de información más detallada cerca de la costa implica que, en última instancia, se necesitan servicios de predicción de la deriva a escala local para apoyar la respuesta local a las emergencias. Un sistema de apoyo regionalizado, siguiendo las líneas de la red del RSMC, podría ser un instrumento eficaz para el apoyo de la OMM a los Estados Miembro en desarrollo, especialmente para la respuesta en caso de emergencias con radionucleidos.

5. Funcionalidades específicas del modelo. Se han desarrollado modelos de deriva y dispersión de materiales radiactivos con funcionalidades algo diferentes en función de las condiciones locales más importantes. Sin embargo, hay un movimiento hacia capacidades de modelos más completos. A continuación se presenta una lista de capacidades de modelo que han tenido una aplicación limitada, pero que deberían estar más disponibles:

* Material radiactivo en el hielo marino
* Combinación de liberación directa en el mar (superficie o subsuperficie) y aportación de contaminantes atmosféricos
* Desarrollo de una base de datos de radionucleidos que incluya 137Cs, 134Cs, 90Sr, 131I, T, 99Tc, etc., que proporcione los parámetros de interacción con el material particulado, la biota y los seres humanos en la columna de agua y las interfaces atmósfera/agua marina/sedimentos
* Reinicio del volumen y la ubicación del material radiactivo según las observaciones
* Transferencias a los compartimentos biológicos y sedimentarios
* Incluir las corrientes de marea en las zonas en las que no se dispone de datos de modelos oceánicos
* Incluir el acceso a datos de forzamiento geofísico climatológico para la predicción a largo plazo (de semanas a meses)
* Normas para el intercambio de datos de modelos de deriva y dispersión de materiales radiactivos

2.4.4 Revisión de los requisitos de los usuarios en cuanto a la información meteorológica y oceánica para la respuesta en casos de emergencia a la dispersión de radionucleidos

**Necesidades de usuario**

|  |  |
| --- | --- |
| **Organización internacional** | **OIEA** |
| **Documentación internacional** | El OIEA, la OMM y la OMI forman parte del Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas (EPR-JPLAN). El OIEA y la OMM disponen de un formulario específico para solicitar información a un RSMC para la respuesta en casos de emergencia ambiental nuclear. |
| **Cualquier frontera de coordinación internacional** | Nulo Aplazado a los Estados ribereños. |
| **Responsabilidad por responder** | OIEA o autoridad nacional designada. |
| **Requisitos de respuesta operativa** | Seguridad y eficacia de los equipos de respuesta, predicción del movimiento de partículas. |
| Cómo se comunica el incidente | En el marco de la convención sobre la pronta notificación de accidentes nucleares, el OIEA informa a la Secretaría de la OMM y al DCPC de Offenbach (Alemania) sobre la índole de la emergencia. |
| Cómo se coordina la respuesta | El OIEA o la autoridad nacional designada es responsable de organizar la información para apoyar las evaluaciones de deriva. |

### **Sección 3: Actividades y funciones de la OMM en apoyo de la respuesta de emergencia marina**

La OMM es un "organismo especializado" de las Naciones Unidas con voz autorizada en asuntos relacionados con el clima, el tiempo, el agua y el medio ambiente, especialmente vinculados al desarrollo sostenible y la seguridad de las personas y los bienes.

En esta sección se expone la forma en que la OMM y su red de apoyo a las actividades de respuesta de emergencia (ARE), está configurada actualmente y cómo interactúa con las actividades de respuesta existentes. Para una descripción completa de la respuesta en caso de emergencias marinas (incluyendo tanto la MEER como la SAR) en la OMM desde su creación, véase https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER.

### **Sección 3.1 Respuesta de emergencia en caso de contaminación marina**

Las especificaciones de la OMM para el MPERSS fueron aprobadas por la Comisión de Meteorología Marina de la OMM en su 11ª reunión (Lisboa, abril de 1993) y refrendadas por la Comisión en su 12ª reunión (La Habana, marzo de 1997). Véase https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#MPERSS.

**Sistema de apoyo a la respuesta de emergencia en caso de contaminación marina (MPERSS)**

El MPERSS para alta mar se creó con el objetivo principal de poner en marcha un sistema coordinado y global para el suministro de información meteorológica y oceanográfica para las operaciones de respuesta de emergencia en casos de contaminación marina fuera de las aguas bajo jurisdicción nacional. El océano mundial se ha dividido en zonas de incidentes de contaminación marina (MPI) que son similares a las metáreas para el GMDSS de la OMI http://weather.gmdss.org/) y se han identificado coordinadores meteorológicos y oceanográficos de zona (CMOZ) para todos ellos para proporcionar productos y servicios relacionados con la contaminación marina.

Un **CMOZ** es un servicio nacional que ha aceptado la responsabilidad de coordinar el suministro de información meteorológica regional e información oceanográfica, según proceda, que se emite para apoyar las operaciones de respuesta en casos de emergencia de contaminación marina en la zona designada para la que el servicio (o servicios) ha aceptado la responsabilidad. El CMOZ también está disponible para brindar el apoyo y asesoramiento pertinente respecto de las aguas que competen a la jurisdicción nacional dentro de su zona si así lo solicitan los países interesados.

El apoyo proporcionado por un CMOZ incluirá**[[4]](#footnote-5)**:

a) las predicciones y avisos meteorológicos básicos específicamente destinados a la(s) zona(s) en cuestión;

El apoyo proporcionado por un CMOZ también puede incluir:

b) predicciones oceanográficas básicas para la(s) zona(s) en cuestión;

c) La observación, análisis y predicción de los valores de las variables meteorológicas y oceanográficas concretas que se necesitan para los modelos que describen el movimiento, la dispersión, la disipación y la disolución de la contaminación marina;

d) En algunos casos, la explotación de dichos modelos; y

e) En otros casos, acceso a los medios e instalaciones de telecomunicaciones nacionales e internacionales;

f) Otro tipo de apoyo operativo.

La información que se emita podrá haber sido preparada exclusivamente por el CMOZ, o por otro servicio de apoyo, o por ambos, sobre la base de un acuerdo que se haya concertado entre los servicios interesados. La ubicación y los datos de contacto (teléfono, correo electrónico, télex, telefax, etc.) de cualquier autoridad (o autoridades) de operaciones de respuesta a emergencias de contaminación marina responsable dentro de la zona designada MPI deben mantenerse en el sitio web del MPERSS (que está actualmente en revisión).

El papel de la Comisión de Servicios de la OMM (SERCOM)

La SERCOM de la OMM es el órgano intergubernamental de expertos de la OMM habilitado para trabajar en actividades de servicio y aplicación en apoyo de los miembros y de sus necesidades. Se compone de varios comités permanentes, uno de los cuales (el comité permanente de servicios meteorológicos marinos y oceanográficos (SC-MMO)) se centra en el apoyo y la capacitación de los miembros en materia de la MEER y la SAR. Su equipo de expertos sobre costas y respuesta en casos de emergencia se encarga de elaborar material de asesoramiento y orientación técnica sobre los servicios de información de la MEER y los sistemas de procesamiento de datos y predicción, así como de supervisar las operaciones de los centros especializados del GDPFS para la MEER, estableciendo normas y manteniendo el producto en colaboración con el equipo de la Comisión de Infraestructuras (INFCOM) que dirige el GDPFS. Se fomenta una estrecha relación con los socios pertinentes, como la OMI y el OIEA, para garantizar el apoyo coordinado de todos los actores principales en el proceso de preparación y respuesta en caso de emergencias.

3.1.1 Respuesta en casos de emergencia ambiental nuclear y no nuclear de la OMM

Las actividades de respuesta en casos de emergencia ambiental nuclear y no nuclear de la OMM incluyen, en términos generales, el amplio ámbito de la aplicación de técnicas especializadas de modelización de la dispersión atmosférica para rastrear y predecir la propagación de sustancias peligrosas en el aire en caso de emergencia ambiental. Este tipo de aplicación especializada depende directamente de la infraestructura operativa de los sistemas de PNT que se implementan y se mantienen en muchos de los GDPFS de la OMM de los centros meteorológicos regionales, nacionales y mundiales.

Este marco de centros del GDPFS se estableció para ayudar a los SMHN, a sus respectivos organismos nacionales, así como a las organizaciones internacionales pertinentes (principalmente, el OIEA), a responder eficazmente a las emergencias ambientales con dispersión a gran escala de sustancias peligrosas en el aire. Tras el accidente de la central nuclear de Chernóbil en 1986, las actividades de la OMM han centrado sus disposiciones operativas y su apoyo en los accidentes nucleares; y, más recientemente, la OMM ha ampliado sus actividades para incluir también el apoyo meteorológico en la respuesta en casos de emergencia a la dispersión del humo de los grandes incendios, las cenizas y otras emisiones de las erupciones volcánicas y las emisiones químicas de los accidentes industriales.

Actividades de respuesta en casos de emergencia nuclear

La OMM ha establecido acuerdos internacionales operativos con el OIEA para desencadenar un apoyo meteorológico especializado en la respuesta en casos de emergencias ambientales relacionadas con accidentes nucleares y emergencias de radiación, cuando sea necesario. La OMM desempeña un papel importante en este sentido gracias a su capacidad única PNT de simulación y predicción del movimiento y la dispersión de materiales radiactivos en la atmósfera.

La OMM ha puesto en marcha y mantiene un sistema de 10 centros de modelización numérica especializados, denominados RSMC, que están preparados en todo momento para proporcionar simulaciones informáticas altamente especializadas de la atmósfera que predicen el movimiento a larga distancia de la radiactividad en el aire. Estos centros especializados, que representan una cobertura mundial completa las 24 horas del día, todos los días, están situados en los Centros meteorológicos nacionales de Exeter (Reino Unido), Toulouse (Francia), Melbourne (Australia), Montreal (Canadá), Washington (Estados Unidos), Pekín (China), Obninsk (Federación Rusa), Offenbach (Alemania), Viena (Austria) y Tokio (Japón). El sistema también incluye un pasillo de telecomunicaciones en Offenbach (Alemania) para proporcionar la notificación y el enlace de información en tiempo real entre el centro de respuesta a incidentes y emergencias del OIEA (OIEA-IEC) y la OMM. Cuando se les solicita, estos centros proporcionan los productos especializados en un plazo de tres horas a los centros meteorológicos nacionales y al OIEA.

Una buena planificación previa a una emergencia puede mejorar sustancialmente la respuesta. Para ello, se elaboró el Plan Conjunto de las Organizaciones Internacionales para la Gestión de Emergencias Radiológicas. Lo mantiene el OIEA e incluye a las organizaciones internacionales que son parte de la Convención sobre la Pronta Notificación de Accidentes Nucleares y de la Convención sobre Asistencia en Caso de Accidente Nuclear o Emergencia Radiológica, así como a algunas organizaciones internacionales que participan en las actividades del Comité Interinstitucional de Respuesta en casos de Accidentes Nucleares.

La OMM es parte de estos convenios y participa en la revisión periódica y el mantenimiento del Plan Conjunto, incluido el programa de ejercicio de las convenciones.

Respuestas en casos de emergencia ambiental no nuclear

La OMM ha ampliado el alcance y las capacidades de sus actividades de respuesta en caso de emergencia para incluir las emergencias ambientales no nucleares: la zona de incidentes y emergencias químicas es una de las que se está explorando y desarrollando.

Muchos SMHN tienen la responsabilidad nacional de proporcionar apoyo meteorológico a la respuesta en casos de emergencia por accidentes químicos. Los servicios van desde las observaciones meteorológicas, las predicciones y los avisos proporcionados a las operaciones sobre el terreno, hasta el suministro de productos especializados y el asesoramiento de expertos sobre la dispersión atmosférica de los contaminantes. Algunos gobiernos están invirtiendo y cooperando en ciencia y tecnología y revisando los acuerdos operativos para mejorar su respectivo nivel de medidas de seguridad, incluso en los ámbitos de la vigilancia ambiental en entornos complejos, la modelización numérica y las simulaciones para la detección, evaluación y predicción del transporte atmosférico de materiales peligrosos. Todos estos aspectos contribuyen a la gestión del riesgo en el contexto de la prevención y mitigación de desastres.

La función de la Comisión de Infraestructuras de la OMM (INFCOM)

La INFCOM de la OMM es el órgano intergubernamental de expertos de la OMM habilitado para trabajar en actividades de infraestructura (incluida la observación, la instrumentación y los datos) en apoyo de los miembros y de sus necesidades. Se compone de varios comités permanentes, uno de los cuales, el Comité Permanente de Proceso de Datos para la Modelización y Predicción Aplicadas del Sistema Tierra (SC-ESMP), se centra en el GDPFS. Su equipo de expertos sobre actividades de respuesta en casos de emergencia (ET-ERA) es responsable de garantizar que los procedimientos para las ARE, tanto nucleares como no nucleares, sean adecuados y satisfagan las necesidades de los Miembros y de las organizaciones internacionales (es decir, el OIEA y la Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares (OTPCE)), así como una posible actualización, según sea necesario, del Manual sobre el GDPFS (OMM-Nº 485). Ofrecen apoyo en la educación y la formación de los usuarios sobre el uso y la interpretación de los productos de las ARE, así como sus puntos fuertes y débiles. Además, los SMHN reciben asistencia para desarrollar sus capacidades de las ARE para apoyar a los organismos nacionales en sus actividades de preparación, planificación, respuesta y recuperación. Su enfoque para probar nuevos productos, especialmente para los métodos de transporte atmosférico y la modelización de la dispersión, fomenta las mejoras. Asimismo, se busca mejorar la capacidad colectiva de todos los RSMC, del OIEA, de la CTBTO, del RTH Offenbach y de los SMHN en lo que respecta a las actividades de respuesta de emergencia ambientales para cumplir las necesidades operativas de acuerdo con las normas y procedimientos adoptados y recogidos en el Manual sobre GDPFS.

### **RECOMENDACIONES Y CONCLUSIÓN**

Este informe ha revisado el estado actual de los conocimientos de la Respuesta en casos de Emergencia Marina (MER), reconociendo que tanto la MEER como los objetos a la deriva (especialmente para la SAR) se basan en métodos similares. Ha esbozado las necesidades multidimensionales de datos de forzamiento oceánico y atmosférico para apoyar la modelización meteorológica y oceanográfica. El informe también describe el papel del SMHN y de otros organismos (nacionales, regionales e internacionales, incluida la OMM) que tienen un interés en el complejo pero muy importante proceso de respuesta en caso de una emergencia en el mar o en la costa.

La revisión demuestra el complejo panorama en el que se desenvuelven, con legislación, compromisos internacionales y nacionales, además de diversas funciones y responsabilidades en la cadena de respuesta. Los SMHN desempeñan un papel importante en este sentido, y la OMM puede reforzar su papel y el de los SMHN en este proceso ofreciendo orientaciones sobre las mejores prácticas para ayudar a los Miembros implicados en las emergencias marinas. En la actualidad, no hay material de orientación disponible para los miembros y, por lo tanto, este informe demuestra dónde podría añadir valor la SERCOM de la OMM mediante el desarrollo de material de orientación pertinente.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

# Anexos: 3

## **ANEXO 1**

## **RECOMENDACIONES DE LA REUNIÓN DEL IEC DE 2013**

("Modelización marina y acuática durante accidentes de reactores nucleares de potencia, 29 de julio a 31 de julio y reunión del equipo de trabajo de la CMOMM, 1 de agosto de 2013")

* El IEC debe desarrollar un marco conceptual de funcionamiento para el uso de modelos marinos durante la cobertura de un evento radiológico o nuclear:
* El uso previsto de la modelización marina durante una emergencia
* El alcance de la capacidad deseada de los modelos marinos en las primeras 24 horas, semana y mes (ya que las capacidades pueden aumentar con el tiempo durante un evento)
* Cómo se presentarán los modelos al público y a los técnicos
* Cómo se gestionará el uso de modelos marinos y mediciones marinas durante un evento
* El resultado de los modelos marinos debe estar en un formato simplificado que sea fácil de entender por el equipo técnico del IEC.
* El equipo técnico del IEC necesitará una formación específica sobre la interpretación de dichos modelos para poder transmitir adecuadamente las incertidumbres asociadas (esto no es diferente a la formación actual sobre los modelos de la pluma contaminante).
* Los modelos podrían volver a ejecutarse durante un evento con nueva información a intervalos fijos (como dos veces al día o diariamente).
* Se observó que el movimiento de los modelos marinos suele ser más lento que el de los modelos de la pluma contaminante y, por tanto, solicitar datos con una frecuencia demasiado rápida puede no proporcionar información útil (es decir, <4h).
* Es factible que el IEC utilice modelos marinos para dar a conocer en general a dónde puede ir el material durante un evento (de manera similar a como se utilizan actualmente los modelos meteorológicos en el IEC)
* La configuración utilizada actualmente por el IEC para recibir apoyo meteorológico de los RSMC de la OMM sería útil para utilizarla como base para establecer acuerdos similares de modelización marina
* El nivel adicional de apoyo posible mediante el contacto 24/7 con estos centros sería muy útil para que el IEC mantuviera cualquier capacidad de modelización marina para ayudar a la interpretación de dichos modelos
* El apoyo adicional de un contacto 24/7, sería útil si el IEC necesita algún modelo especializado durante un evento
* El enfoque actual del IEC con la modelización de la pluma contaminante (utilizando un término ilustrativo de origen de 1 Bq/h) puede aplicarse con éxito a la modelización marina con fines de conciencia situacional
* Los debates con las organizaciones externas que puedan prestar este tipo de apoyo (por ejemplo, la CMOMM) podrían utilizarse para ayudar a definir el alcance de cualquier servicio futuro de este tipo
* Los modelos que abordan tanto un punto (directo al mar) como la deposición (es decir, desde una pluma de contaminación) deben estar disponibles durante un evento, ya que el perfil de dispersión puede ser muy sensible a la distancia de la costa
* Los modelos marinos son muy sensibles a la resolución de los datos; se recomienda utilizar las capacidades de modelización de alta resolución cuando estén disponibles
* La resolución requerida para que un modelo sea útil depende del escenario como, por ejemplo, lo que se requiere cuando se modela cerca de una costa
* Cuando los efectos de las mareas son importantes, la frecuencia de entrada/salida de un modelo puede tener que ser tan frecuente como una hora
* El IEC debe considerar el uso potencial de la cartografía de las zonas de riesgo (por ejemplo, la provisión de un mapa de probabilidad de la distribución futura basado en datos históricos) como un producto que se proporcionará durante un evento
* La implementación de una capacidad de modelado marino en el IEC debe abordar cómo se archivan los resultados y, eventualmente, se proporcionan a otros departamentos internos de la Agencia para un análisis a más largo plazo
* Habrá que evaluar todas las capacidades de estos modelos una vez que se apliquen y se pongan a disposición del IEC
* El IEC tendrá que determinar la forma más eficaz de integrar en el proceso de toma de decisiones existente el uso de cualquier capacidad de modelización marina

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## **ANEXO 2**

## **MARCOS Y PROGRAMAS INTERNACIONALES, GLOBALES Y REGIONALES RELEVANTES PARA LA MEER Y LA SAR**

En este anexo se expone el contexto de los diversos marcos y programas que pueden influir en el apoyo de la OMM a la respuesta de los Miembros a las emergencias ambientales marinas y a la SAR.

### **Convenios y actividades asociadas relevantes para la MEER y la SAR**

1.1.1 La Organización Marítima Internacional (OMI) y los convenios

La OMI es un organismo especializado de la ONU que se ocupa de la seguridad y la protección del transporte marítimo internacional y de la prevención de la contaminación procedente de los buques. Es responsable de dos convenios internacionales directamente relacionados con la MEER y la SAR. Para ambos, la OMM contribuye a los trabajos y reuniones de la OMI, y es copatrocinadora de varios documentos obligatorios, especialmente relacionados con la seguridad marítima.

El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL)

El Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques (MARPOL) es el principal convenio internacional sobre la prevención de la contaminación del medio marino por los buques por causas operativas o accidentales.

El Convenio MARPOL se adoptó el 2 de noviembre de 1973 en la OMI. El Protocolo de 1978 se adoptó en respuesta a una serie de accidentes de petroleros en 1976-1977. Como el Convenio MARPOL de 1973 aún no había entrado en vigor, el Protocolo MARPOL de 1978 absorbió el Convenio matriz. El instrumento combinado entró en vigor el 2 de octubre de 1983. En 1997 se adoptó un Protocolo para modificar el Convenio y se añadió un nuevo Anexo VI que entró en vigor el 19 de mayo de 2005. MARPOL ha sido actualizado mediante enmiendas a lo largo de los años.

El Convenio incluye normas destinadas a prevenir y reducir al mínimo la contaminación de los buques tanto la accidental como la derivada de las operaciones rutinarias y actualmente incluye seis anexos técnicos. En la mayoría de los anexos se incluyen zonas especiales con controles estrictos de los vertidos operativos:

|  |  |
| --- | --- |
| **Anexo** | Reglamento para: |
| I | La prevención de la contaminación por petróleo |
| II | El control de la contaminación por sustancias líquidas nocivas en bloque |
| III | La prevención de la contaminación por sustancias nocivas transportadas por mar en forma de paquetes |
| IV | La prevención de la contaminación por aguas residuales de los buques |
| V | Prevención de la contaminación por residuos de los buques |
| VI | Prevención de la contaminación atmosférica de los buques |

El comité de protección del medio marino (MEPC) de la OMI, que está formado por todos los Estados Miembro de la OMI, está facultado para examinar cualquier asunto dentro del ámbito de la OMI que tenga que ver con la prevención y el control de la contaminación procedente de los buques contemplados en MARPOL. También incluye el petróleo, los productos químicos transportados en grandes cantidades, las aguas negras, la basura y las emisiones de los buques (como los contaminantes atmosféricos y las emisiones de gases de efecto invernadero). También se consideran la gestión de las aguas de lastre, los sistemas antiincrustantes, el reciclaje de buques, la preparación y la respuesta a la contaminación y la identificación de zonas especiales y zonas marítimas sensibles. En particular, se ocupa de la adopción y modificación de los convenios y otros reglamentos y de las medidas para garantizar su cumplimiento.

El MEPC se creó por primera vez como órgano subsidiario de la Asamblea de la OMI y se elevó a la categoría constitucional plena en 1985. Varios subcomités apoyan el trabajo del MEPC, de los cuales el subcomité de prevención y respuesta a la contaminación (PPR) es el que más directamente se relaciona con la agenda de la MEER.

Seguridad internacional de la vida en el mar (SOLAS)

El Convenio Internacional para la SOLAS incluye a todos los Estados Miembro de la OMI, así como a aquellos países que son parte de convenios como la SOLAS aunque no sean Estados Miembro de la OMI.

El Comité de Seguridad Marítima (MSC) es el máximo órgano técnico de la OMI y, al igual que el MEPC, está formado por todos los Estados Miembro de la OMI. Las funciones del MSC consisten en "examinar cualquier asunto dentro del ámbito de la Organización que tenga que ver con las ayudas a la navegación, la construcción y el equipamiento de los buques, la dotación desde el punto de vista de la seguridad, las normas para la prevención de abordajes, la manipulación de cargas peligrosas, los procedimientos y requisitos de seguridad marítima, la información hidrográfica, los cuadernos de bitácora y los registros de navegación, la investigación de siniestros marítimos, el salvamento y el rescate y cualquier otro asunto que afecte directamente a la seguridad marítima".

El MSC también debe proporcionar maquinaria para llevar a cabo cualquier tarea que le sea asignada por el convenio de la OMI o cualquier tarea dentro de su ámbito de trabajo que pueda serle asignada por o en virtud de cualquier instrumento internacional y aceptada por la OMI. También tiene la responsabilidad de examinar y presentar recomendaciones y directrices sobre seguridad para su aprobación por la Asamblea. El MSC ampliado adopta enmiendas a los convenios, como la SOLAS. El MSC tiene varios subcomités para apoyar su mandato, de los cuales el de navegación, comunicación, búsqueda y salvamento (NCSR) es uno en el que la OMM participa como observador. Este es el organismo que, entre otros muchos temas, se ocupa del Servicio Mundial de Información y Avisos Meteorológicos y Oceanográficos de la OMI y la OMM (WWMIWS) y de su información de seguridad marítima meteorológica y oceánica (MSI) proporcionada por las metáreas de la OMM. Aunque la SAR no está directamente en las discusiones de la MSI, su alcance se sigue considerando para responder a las solicitudes de la SAR, donde la información meteorológica es fundamental para el proceso. Para conocer el papel de la OMM en el WWMIWS y la SAR, véase (enlace al sitio web de la OMM).

1.1.2 Centro Regional de Respuesta a Situaciones de Emergencia de Contaminación Marina en el Mar Mediterráneo (REMPEC)

El objetivo del REMPEC (www.rempec.org) es contribuir a la prevención y reducción de la contaminación procedente de los buques y a la lucha contra la contaminación en caso de emergencia. A este respecto, la misión del REMPEC es asistir a las partes contratantes en el cumplimiento de sus obligaciones en virtud de los artículos 4.1, 6 y 9 del Convenio de Barcelona; el Protocolo de Emergencia de 1976; el Protocolo de Prevención y Emergencia de 2002 y la aplicación de la estrategia regional para la prevención y la respuesta a la contaminación marina por los buques, adoptada por las partes contratantes en 2005, cuyos objetivos y metas principales se reflejan en la Estrategia Mediterránea para el Desarrollo Sostenible (MSSD). El centro también ayudará a las partes contratantes que lo soliciten a movilizar la asistencia regional e internacional en caso de emergencia en el marco del Protocolo Offshore, si este instrumento entra en vigor.

Los principales ámbitos de actuación del REMPEC para la prevención de la contaminación del medio marino desde los buques y el desarrollo de la preparación y la respuesta a la contaminación marina accidental y la cooperación en caso de emergencia consisten en:

* Reforzar las capacidades de los Estados ribereños de la región para prevenir la contaminación del medio marino por los buques y garantizar la aplicación efectiva en la región de las normas generalmente reconocidas a nivel internacional en materia de prevención de la contaminación por los buques, así como para reducir, combatir y, en la medida de lo posible, eliminar la contaminación del medio marino por las actividades marítimas, incluidas las embarcaciones de recreo;
* Desarrollar la cooperación regional en el ámbito de la prevención de la contaminación del medio marino por parte de los buques y facilitar la cooperación entre los Estados ribereños del Mediterráneo para responder a los incidentes de contaminación que den o puedan dar lugar a un derrame de petróleo u otras sustancias peligrosas y nocivas que requieran acciones de emergencia u otra respuesta inmediata;
* Ayudar a los Estados ribereños de la región mediterránea que lo soliciten a desarrollar sus propias capacidades nacionales de respuesta en caso de incidentes de contaminación que den o puedan dar lugar a un derrame de petróleo u otras sustancias peligrosas y nocivas y facilitar el intercambio de información, la cooperación tecnológica y la formación;
* Proporcionar un marco para el intercambio de información sobre cuestiones operativas, técnicas, científicas, jurídicas y financieras, y promover el diálogo para llevar a cabo una acción coordinada a nivel nacional, regional y mundial para la aplicación del Protocolo de Prevención y Emergencia; y
* Ayudar a los Estados ribereños de la región que, en caso de emergencia, lo soliciten, ya sea directamente o recabando la ayuda de las demás partes o cuando no existan posibilidades de asistencia dentro de la región, a obtener ayuda internacional de fuera de la región.

1.1.3 Agencia Europea de Seguridad Marítima (AESM)

La Agencia Europea de Seguridad Marítima es una de las agencias descentralizadas de la UE. Con sede en Lisboa, la Agencia proporciona asistencia técnica y apoyo a la Comisión Europea y a los Estados Miembro en el desarrollo y aplicación de la legislación de la UE sobre seguridad marítima, contaminación por buques y protección marítima. También se le han encomendado tareas operativas en el ámbito de la lucha contra la contaminación por hidrocarburos, la monitorización de buques y la identificación y seguimiento de buques a larga distancia.

Un importante impulso político para la creación de la AESM en 2003 fueron las consecuencias de los accidentes del Erika (1999) y del Prestige (2002) y sus consiguientes derrames de petróleo. Estos incidentes provocaron enormes daños ambientales y económicos en las costas de España y Francia. También han servido para recordar a los responsables de la toma de decisiones que Europa debe invertir en una mejor preparación en caso de un derrame de petróleo a gran escala, es decir, más allá de los recursos disponibles a nivel de cada Estado Miembro.

La AESM realiza una serie de tareas principalmente preventivas, pero también reactivas, en determinados ámbitos clave para cumplir sus objetivos.

En primer lugar, la Agencia se ha encargado de asistir a la Comisión en el monitoreo de la aplicación de la legislación de la UE relativa, entre otras cosas, a la construcción y el mantenimiento planificado de buques, la inspección de buques y la recepción de desechos de buques en los puertos de la UE, la certificación de equipos marinos, la seguridad de los buques, la formación de la gente de mar en países no pertenecientes a la UE y el control por el Estado del puerto.

En segundo lugar, la Agencia opera, mantiene y desarrolla las capacidades de información marítima a nivel de la UE. Ejemplos significativos son el sistema de seguimiento de buques SafeSeaNet, que permite el seguimiento de los buques y sus cargas en toda la UE; y el Centro de Datos Cooperativos LRIT de la UE, para garantizar la identificación y el seguimiento de los buques con pabellón de la UE en todo el mundo.

Paralelamente, se ha creado una capacidad de preparación, detección y respuesta a la contaminación marina, que incluye una red europea de buques de reserva para la lucha contra los derrames de petróleo, así como un servicio europeo de monitoreo por satélite de los derrames de petróleo y de detección de buques (CleanSeaNet), ambos con el objetivo de contribuir a un sistema eficaz de protección de las costas y aguas de la UE contra la contaminación por buques.

Por último, la Agencia presta asesoramiento técnico y científico a la Comisión en el ámbito de la seguridad marítima y la prevención de la contaminación por los buques en el proceso continuo de evaluación de la eficacia de las medidas vigentes, así como en la actualización y desarrollo de nueva legislación. También proporciona apoyo y facilita la cooperación entre los Estados Miembros y difunde las mejores prácticas. Como organismo de la Unión Europea, la Agencia se sitúa en el centro de la red de seguridad marítima de la UE y colabora con muchas partes interesadas del sector y organismos públicos, en estrecha cooperación con la Comisión y los Estados Miembros.

### Programas internacionales y/o regionales de relevancia para la MEER y la SAR

El Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) y las actividades de respuesta en caso de emergencia de la OMM

El OIEA es una agencia intergubernamental centrada en la cooperación científica y técnica en el ámbito nuclear. Esto incluye trabajar para lograr usos seguros y pacíficos de la tecnología científica nuclear. Dado el alto riesgo de los peligros nucleares, desempeña un papel en la respuesta en caso de emergencias ambientales, especialmente a través de las medidas de salvaguardia y el monitoreo de las sustancias peligrosas. Esto tiene un vínculo directo con la ERA de la OMM, que implica la aplicación de técnicas especializadas de modelización de la dispersión atmosférica para rastrear y predecir la propagación de sustancias peligrosas transportadas por el aire en caso de emergencia ambiental, como se indica en la sección 1.2.

El OIEA lleva a cabo actividades de I+D sobre la contaminación marina en su laboratorio de estudios del medio marino. El trabajo del laboratorio se centra en el desarrollo y la validación de métodos analíticos para la medición de contaminantes en muestras marinas. Se trata de un elemento potencialmente importante de cualquier sistema futuro de respuesta en casos de emergencia por radiactividad en el océano.

El Sistema Mundial de Observación del Océano (GOOS)

El GOOS es una plataforma de colaboración con seis componentes clave que ayudan a definir los requisitos de observación de los océanos, a coordinar las redes de observación y a garantizar el flujo de datos y previsiones. Copatrocinado por la COI, la OMM, el PNUMA y el Consejo Internacional de Ciencias (ISC), apoya a una comunidad que abarca a todos los que desempeñan un papel en el sistema de observación: programas de observación internacionales, regionales y nacionales, gobiernos, organismos de las Naciones Unidas, organizaciones de investigación y científicos individuales. Mediante el trabajo conjunto en las herramientas y tecnologías de observación de los océanos, la libre circulación de datos, los sistemas de información, las previsiones y los análisis científicos, esta comunidad mundial puede aprovechar el valor de todas estas inversiones.

Los grupos de expertos sintetizan los requisitos y ofrecen orientación sobre el diseño del sistema de observación con la intención de reforzar y ampliar su aplicación, promoviendo las mejores prácticas. Un equipo de sistemas de predicción se centra también en la mejora de la capacidad y la calidad de las previsiones oceánicas, lo que tiene una importancia directa para los servicios de modelización y producción relacionados con la deriva oceánica y los objetos flotantes, y por tanto con la MEER y la SAR. Además de que la OMM es copatrocinadora del GOOS, la comunidad del GOOS también colabora en actividades mutuas con la INFCOM y la SERCOM de la OMM, respectivamente, incluso para hacer progresar las capacidades de predicción oceánica para los servicios meteorológicos. Junta Mixta de Colaboración OMM-COI (JCB) proporciona asesoramiento estratégico tanto a la COI como a la OMM para fomentar la coordinación cruzada de estas actividades.

Otros datos de importancia para la respuesta en casos de emergencias marinas

Hay una serie de alianzas regionales creadas para prevenir, reaccionar y gestionar las emergencias marinas, especialmente las ambientales. Por lo general, tienen una base geográfica que va desde el Caribe hasta Asia y el Lejano Oriente. En general, estos trabajan en estrecha colaboración con la División de Medio Ambiente de la OMI. El mejor uso de los recursos para comprometerse con ellos y para proporcionar un mecanismo de respuesta más cohesivo, puede ser trabajar con la OMI directamente.

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

## **ANEXO 3**

## **REFERENCIAS**

Allen, A. A. (2005). Divergencia del abatimiento. CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE LA GUARDIA COSTERA, GROTON CT.

Allen, A., Plourde, J. V., 1999. Revisión del abatimiento: experimentos de campo y aplicación. Tech. Rep. CG-D-08-99, US Coast Guard Research and Development Center, 1082 Shennecossett Road, Groton, CT, USA, available through http://www.ntis.gov.

Ambjorn, C. (2007). SeatrackWeb, forecasts of oil spills, a new version, Environ. *Res.* *Eng.* Manage, 3, 60-66.

Azevedo, A., Oliveira, A., Fortunato, A.B. y Bertin, X., (2009). Application of an Eulerian-Lagrangian oil spill modeling system to the Prestige accident: trajectory analysis. Journal of Coastal Research, pp.777-781.

Barrick, D., Fernández, V., Ferrer, M. I., Whelan, C., Breivik, Ø., 2012. A short-term predictive system for surface currents from a rapidly deployed coastal HF radar network. Ocean Dynam 62, 725-740, doi:10.1007/s10236-012-0521-0.

Blanke, B., y Raynaud, S. (1997). Kinematics of the Pacific equatorial undercurrent: An Eulerian and Lagrangian approach from GCM results. Journal of Physical Oceanography, 27(6), 1038-1053.

Breivik, Ø., A Allen, C Maisondieu, M Olagnon, 2013. Advances in Search and Rescue at Sea, Ocean Dynam, 63(1), 83-88, doi:10.1007/s10236, arXiv:1211.0805.

Breivik, Ø., Allen, A., Maisondieu, C., Roth, J.-C., Forest, B. (2012a). The Leeway of Shipping Containers at Different Immersion Levels. Ocean Dynam 62, 741–752, doi:10.1007/s10236–012–0522–z, arXiv:1201.0603.

Breivik, Ø., Allen, A. A. (2008). An operational search and rescue model for the Norwegian Sea and the North Sea. J Marine Syst 69 (1–2), 99–113, doi:10.1016/j.jmarsys.2007.02.010, arXiv:1111.1102.

Breivik, Ø., Allen, A. A., Maisondieu, C., Roth, J. C. (2011). Wind-induced drift of objects at sea: The leeway field method. Appl Ocean Res 33, 10 pp, doi:10.1016/j.apor.2011.01.005, arXiv:1111.0750.

Breivik, Ø., Bekkvik, T. C., Ommundsen, A., Wettre, C. (2012b). BAKTRAK: Backtracking drifting objects using an iterative algorithm with a forward trajectory model. Ocean Dynam 62, 239-252, doi:10.1007/s10236-011-0496-2, arXiv:1111.0756.

Carrier, M. J., Ngodock, H. E., Smith, S. R., Souopgui, I., & Bartels, B. (2016). Examining the Potential Impact of SWOT Observations in an Ocean Analysis–Forecasting System, Monthly Weather Review, 144(10), 3767-3782. Recuperado el 4 de julio de 2022, de https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/144/10/mwr-d-15-0361.1.xml

Choi, Y., S. Kida, and K. Takahashi, 2013, The impact of oceanic circulation and phase transfer on the dispersion of radionuclides released from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant, Biogeosciences, 10, 4911–4925, 2013, doi:10.5194/bg-10-4911-2013

Christensen, K. H., Breivik, Ø., Dagestad, K. F., Röhrs, J., & Ward, B. (2018). Short-term predictions of oceanic drift. Oceanography, 31(3), 59-67.

Coppini, G., Jansen, E., Turrisi, G., Creti, S., Shchekinova, E.Y., Pinardi, N., Lecci, R., Carluccio, I., Kumkar, Y.V., D'Anca, A. and Mannarini, G. (2016). A new search-and-rescue service in the Mediterranean Sea: a demonstration of the operational capability and an evaluation of its performance using real case scenarios. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16(12), pp.2713-2727.

Dagestad, K-F, J Röhrs, Ø Breivik, and B Ådlandsvik (2018). OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modeling, Geosci Model Dev, 11(4), pp 1405-1420, doi:10.5194/gmd-11-1405-2018

Daling, P. S., Moldestad, M. Ø., Johansen, Ø., Lewis, A., and Rødal, J. (2003). Nor-

wegian testing of emulsion properties at sea – the importance of oil type and release

conditions. Spill Science & Technology Bulletin, 8(2):123–136.

Daniel, P., and R. Virasami (2021): Oil spill management and salvage in the Indian Ocean. En el Boletín Vol. 70 (1), Organización Meteorológica Mundial, Ginebra.

Davidson, W. F., K. Lee and A. Cogswell (Eds.) (2008). Oil Spill Response: A Global Perspective. Proceedings of the NATO CCMS Workshop on Oil Spill Response, Dartmouth, Nova Scotia, Canada, 11-13 October 2006. Springer Science and Business, Dordecht, 365 pp.

Davidson, F. J. M., Allen, A., Brassington, G. B., Breivik, Ø., Daniel, P., Kamachi, M., Sato, S., King, B., Lefevre, F., Sutton, M., Kaneko, H., 2009. Applications of GODAE ocean current forecasts to search and rescue and ship routing. Oceanography 22 (3), 176–181, doi:10.5670/oceanog.2009.76

Duffa, C., Bailly du Bois, P., Caillaud, M., Charmasson, S., Couvez, C., Didier, D., Dumas, F., Fievet, B., Morillon, M., Renaud, P., Thebault, H., 2016. Development of emergency response tools for accidental radiological contamination of French coastal areas. J. Environ. Radioact. 151, 487–494.

Döös, K., Kjellsson, J., & Jönsson, B. (2013). TRACMASS—A Lagrangian trajectory model. In Preventive methods for coastal protection (pp. 225-249). Springer, Heidelberg.

Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. Journal of Atmospheric and Oceanic technology, 19(2), 183-204.

Estournel, C., Bosc, E., Bocquet, M., Ulses, C., Marsaleix, P., Winiarek, V., Osvath, I., Nguyen, C., Duhaut, T., Lyard, F., Michaud, E., Auclair, F., 2012. Assessment of the amount of Cesium-137 released into the Pacific Ocean after the Fukushima accident and analysis of its dispersion in Japanese coastal waters. J. Geophys. Res. Oceans. 117 (C11014).

Fay, J. A. (1971) Physical processes in the spread of oil on a water surface, in Proceedings of the International Oil Spill Conference, vol. 1971. Washington, DC: American Petroleum Institute, pp. 463–467. doi: 10.7901/2169-3358-1971-1-463

Fingas M. (Ed.) (2015) Oil and petroleum evaporation, Ch. 7. in Handbook of oil spill science and technology, 207. John Wiley and Sons Inc.

Fingas, M. (Ed.) (2017). Oil spill science and technology, 2nd edition. Gulf professional publishing.

Garraffo, Z., Kim, H., Mehra, A., Spindler, T., Rivin, I., Tolman, H.L., 2016. Modeling of 137Cs as a tracer in a regional model for the Western Pacific, after the Fukushima–Daiichi nuclear power plant accident of March 2011. Wea. Forecasting. 31, 553-579.

Griffa, A. (1996). Applications of stochastic particle models to oceanographic problems. In Stochastic modelling in physical oceanography (pp. 113-140). Birkhäuser Boston.

Hackett, B., Breivik, Ø., Wettre, C., 2006. Forecasting the drift of objects and substances in the oceans. In: Chassignet, E. P., Verron, J. (Eds.), Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography. Springer, pp. 507–524.

Hackett, B., E. Comerma, P. Daniel and H. Ichikawa, 2009: Marine oil pollution prediction.

Oceanography, 22 (3), 168-175.

Hernandez-Lasheras, J., Mourre, B., Orfila, A., Santana, A., Reyes, E., & Tintoré, J. (2021). Evaluating high-frequency radar data assimilation impact in coastal ocean operational modelling. Ocean Science, 17(4), 1157-1175.

Hodgins, D.O. and R.Y. Mak, 1995. "Leeway Dynamic Study Phase I Development and Verification of a Mathematical Drift Model for Four-person Liferafts." Prepared for Transportation Development Centre, Transport Canada Report # TP 12309E.

Hodgins, D. O., Hodgins, S. L. M., 1998. Phase II Leeway Dynamics Program: Development and Verification of a Mathematical Drift Model for Liferafts and Small Boats. Tech. Rep., Guardia Costera Canadiense, Nueva Escocia, Canadá.

Iosjpe, M., Karcher, M., Gwynn, J., Harms, I., Gerdes, R., Kauker, F., 2009. Improvement of the dose assessment tools on the basis of dispersion of the 99 Tc in the Nordic Seas and the Arctic Ocean. Radioprotection 44 (5), 531-536.

Ivorra, B., S. Gomez, J. Carrera, A. Ramos (2021). A compositional Eulerian approach for modeling oil spills in the sea. Ocean Engineering, Volume 242, 110096, ISSN 0029-8018. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110096.

Jacobs, G., D’Addezio, J. M., Ngodock, H., & Souopgui, I. (2021). Observation and model resolution implications to ocean prediction. Ocean Modelling, 159, 101760.

JMA (2002) Marine Pollution transport model. in Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.

https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/246209/www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline-nwp/pdf/ol6\_7.pdf

JMA (2021) Oil Spill Prediction Model. in Outline of the operational numerical weather prediction at the Japan Meteorological Agency.

https://www.jma.go.jp/jma/jma-eng/jma-center/nwp/outline2022-nwp/pdf/outline2022\_05.pdf

Jones, R. K. (1997). A simplified pseudo-component oil evaporation model.

Jones, C, K-F Dagestad, O Breivik, B Holt, J Rohrs, K Christensen, M Espeseth, C Brekke, S Skrunes (2016). Measurement and Modeling of Oil Slick Transport, J Geophys Res: Oceans, 121(10), pp 7759-7775, doi:10.1002/2016JC012113

Kawamura, H., Kobayashi, T., Furuno, A., In, T., Ishikawa, Y., Nakayama, T., Shima, S., Awaji, T., 2011. Preliminary numerical experiments on oceanic dispersion of 131 I and 137 Cs discharged into the ocean because of the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. J. Nucl. Sci. Technol. 48, 1349-1356.

Klemas,V. 2010. Tracking oil slicks and predicting their trajectories using remote sensors and models: Case studies of the sea Princess and Deepwater Horizon oil spills. J. Coast. Res., 26(5), 789-797.

Kratzke, T. M., Stone, L. D., Frost, J. R., 2010. Search and Rescue Optimal Planning System. In: Proceedings of the 13 International Conference on Information Fusion. IEEE, p. 8 pp.

Legrand, S., and V. Duliere, 2014: OSERIT: a downstream service dedicated to the Belgian Coast Guard Agencies. In Proceedings of the Sixth International Conference on EuroGOOS, 4-6 October 2011, Sopot, Poland, eds. H. Dahlin, N.C. Flemming and S.E. Petersson, 181-188. EuroGOOS AISBL, Brussels, Belgium.

Lepicard, S., Heling, R., Maderich, V., 2004. POSEIDON/RODOS model for radiological assessment of marine environment after accidental releases: application to coastal areas of the Baltic, Black and North seas. J. Environ. Radioact. 72 (1-2), 153-161.

Maderich, V., Brovchenko, I., Dvorzhak, A., Ievdin, Y., Koshebutsky, V., Periañez, R., 2016. Integration of 3D model THREETOX in JRODOS-HDM, implementation studies and model validation on marine Fukushima scenarios. Radioprotection (Special issue)

Min et al, 2013, Marine dispersion assessment of 137Cs released from the Fukushima nuclear accident, Marine Pollution Bulletin 72 (2013) 22–33, http://dx.doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.05.008

Keramea, P., Spanoudaki, K., Zodiatis, G., Gikas, G., Sylaios, G. (2021) Oil Spill Modeling: A Critical Review on Current Trends, Perspectives, and Challenges. J. Mar. Sci. Eng*.* 9, 181. https://doi.org/10.3390/

Nordam, T., & Duran, R. (2020). Numerical integrators for Lagrangian oceanography. Geoscientific Model Development, 13(12), 5935-5957.

Penna, N. T., Morales Maqueda, M. A., Martin, I., Guo, J., & Foden, P. R. (2018). Sea surface height measurement using a GNSS wave glider. Geophysical Research Letters, 45(11), 5609-5616.

Periáñez, R., 2003. Redissolution and long-term transport of radionuclides released from a contaminated sediment: a numerical modelling study. Estuar. Coast. Shelf Sci. 56, 5-14.

Periáñez, R., Pascual-Granged, A., 2008. Modelling surface radioactive, chemical and oil spills in the strait of Gibraltar. Comput. Geosci. 34, 163-180.

Periáñez, R., Suh, K.-S., Min, B.-I., 2012. Local scale marine modelling of Fukushima releases. Assessment of water and sediment contamination and sensitivity to water circulation description. Mar. Pollut. Bull. 64, 2333–2339.

Periáñez R., R. Bezhenar, M. Iosjpe, V. Maderich, H. Nies, I. Osvath, I. Outola, G. de With (2014). A comparison of marine radionuclide dispersion models for the Baltic Sea in the frame of IAEA MODARIA program. Journal of Environmental Radioactivity 139, 66-77.

Reed, M., Johansen, Ø., Brandvik, P. J., Daling, P. S., Lewis, A., Fiocco, R., Mackay,

D., and Prentki, R. (1999). Oil spill modeling towards the close of the 20th century:

overview of the state of the art. Spill Science & Technology Bulletin, 5(1):3–16.

Reisser, J., Slat, B., Noble, K., du Plessis, K., Epp, M., Proietti, M., de Sonneville, J., Becker, T., and Pattiaratchi, C. (2015): The vertical distribution of buoyant plastics at sea: an observational study in the North Atlantic Gyre, Biogeosciences, 12, 1249–1256, https://doi.org/10.5194/bg-12-1249-2015.

Röhrs, J., Christensen, K., Hole, L., Broström, G., Drivdal, M., Sundby, S., 2012. Observation based evaluation of surface wave effects on currents and trajectory forecasts. To appear in Ocean Dynam, 14 pp, doi:10.1007/s10236–012–0576–y.

Röhrs, J., Dagestad, K.-F., Asbjørnsen, H., Nordam, T., Skancke, J., Jones, C. E., and Brekke, C. (2018). The effect of vertical mixing on the horizontal drift of oil spills, Ocean Sci., 14, 1581–1601, https://doi.org/10.5194/os-14-1581-2018.

Röhrs, J., Sutherland, G., Jeans, G., Bedington, M., Sperrevik, A. K., Dagestad, K. F., Gusdal, Y., Mauritzen, C., Dale, A. and LaCasce, J.H (2021). Surface currents in operational oceanography: Key applications, mechanisms, and methods. Journal of Operational Oceanography, 1-29.

Schwab, D. J., Bennett, J. R., & Lynn, E. W. (1984). "PATHFINDER": A Trajectory Prediction System for the Great Lakes (No. 414). National Oceanic and Atmospheric Administration, Environmental Research Laboratories, Great Lakes Environmental Research Laboratory.

Shibata T., T. Nakajima, Y. Igarashi, H. Tsuruta, M. Ebihara, T. Hattori, M. Hoshi, T. Ishimaru, K. Masumoto, P. Bailly du Bois, M. Bocquet, D. Boust, I. Brovchenko, I. Choe, T. Christoudias, D. Didier, H. Dietze, P. Garreau, H. Higashi, K. T. Jung, S. Kida, P. Le Sager, J Lelieveld, V. Maderich, Y. Miyazawa, S. U. Park, D. Quélo, K. Saito, T. Shimbori, Y. Uchiyama, P. van Velthoven, V. Winiarek, and S. Yoshida. A review of the model comparison of transportation and deposition of radioactive materials released to the environment as a result of the Tokyo Electric Power Company's Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant accident. Technical report, Sectional Committee on Nuclear Accident Committee on Comprehensive Synthetic Engineering, Science Council of Japan, September 2014.

Spaulding M.L. (1988). A state-of-art review of oil spill trajectory and fate modeling, Oils & Chemical pollution, 4, 39-55.

Sperrevik, A. K., Christensen, K. H., & Röhrs, J. (2015). Constraining energetic slope currents through assimilation of high-frequency radar observations. Ocean Science, 11(2), 237-249.

Stiver, W, and Mackay, D. (1984). Evaporation rate of spills of hydrocarbons and petroleum mixtures. Environmental Science & Technology, 834.

Sutherland, G., Soontiens, N., Davidson, F., Smith, G.C., Bernier, N., Blanken, H., Schillinger, D., Marcotte, G., Röhrs, J., Dagestad, K.F. and Christensen, K.H. (2020). Evaluating the leeway coefficient of ocean drifters using operational marine environmental prediction systems. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 37(11), 1943-1954.

Tipton, M., McCormack, E., Elliott, G., Cisternelli, M., Allen, A., & Turner, A. C., (2022). Survival Time and Search Time in Water: Past, Present and Future. TB-D-21-00612, Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=3986715 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3986715.

Tolman H., Z. Garaffo, A. Mehra, I. Rivin and T. Spindler, 2013. Ocean Plume Modeling for the Fukushima Dai’ichi Event: Particle tracing. NOAA/NWS/NCEP technical note.

Solabarrieta, L., Hernández-Carrasco, I., Rubio, A., Campbell, M., Esnaola, G., Mader, J., Jones, B.H. and Orfila, A. (2021). A new Lagrangian-based short-term prediction methodology for high-frequency (HF) radar currents. Ocean Science, 17(3), pp.755-768.

Turner, A.C., Lewandowski, M., Parker, J., McClay, T. (2009). Recommendations for the U.S. Coast Guard Survival Prediction Tool. U.S. Coast Guard, New London CT, USA.

van Sebille. E., S. M. Griffies, R. Abernathey, T. P. Adams, P. Berloff, A. Biastoch, B. Blanke, E. P. Chassignet, Y. Cheng, C. J. Cotter, E. Deleersnijder, K. Döös, H. F. Drake, S. Drijfhout, S. F. Gary, A. W. Heemink, J. Kjellsson, I. M. Koszalka, M. Lange, C. Lique, G. A. MacGilchrist, R. Marsh, C. G. M, Adame, R. McAdam, F. Nencioli, C. B. Paris, M. D. Piggott, J. A. Polton, S. Rühs, S. H.A.M. Shah, M. D. Thomas, J. Wang, P. J. Wolfram, L. Zanna, J. D. Zika (2018). Lagrangian ocean analysis: Fundamentals and practices, Ocean Modelling, Volume 121, 49-75, ISSN 1463-5003, https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2017.11.008.

Vives i Batlle, J., Beresford, N., Beaugelin-Seiller, K., Bezhenar, R., Brown, J., Cheng, J.J., Cujic, M., Dragovic, S.S., Duffa, C., Fievet, B., Hosseini, A., Jung, K.T., Kamboj, S., Keum, D.K., Kryshev, A., Le Poire, D., Maderich, V., Min, B.I., Periáñez, R., Sazykina, T., Suh, K.S., Yu, C., Wang, C., Heling, R., 2016. Inter-comparison of dynamic models for radionuclide transfer to marine biota in a Fukushima accident scenario. J. Environ. Radioact. 153, 31-50.

Wilkinson, M., Dumontier, M., Aalbersberg, I. et al. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Sci Data, 3, 160018. https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18

WMO (1984): Commission For Marine Meteorology Abridged Final Report Of The Ninth Session, World Meteorological Organisation, Geneva.

WMO (2006): Joint WMO/IOC Technical Commission for Oceanography and Marine Meteorology (JCOMM) - Second session: abridged final report with resolutions and recommendations (WMO-No 995). Organización Meteorológica Mundial, Ginebra.

WMO (2018a): Manual on Marine Meteorological Services (WMO-No. 558), Volume I – Global Aspects, World Meteorological Organization, Geneva.

WMO (2018b): Guide to Marine Meteorological Services (WMO-No. 471), World Meteorological Organization, Geneva.

WMO (2018c): Guide to Wave Analysis and Forecasting (WMO-No. 702), World Meteorological Organization, Geneva.

WMO (2021): Sea-ice Information and Services (WMO-No. 574), World Meteorological Organisation, Geneva.

Zodiatis, G., R. Lardner, D. Solovyov, X. Panayidou, and M. De Dominicis. 2012. Predictions for oil slicks detected from satellite images using MyOcean forecasting data. Ocean Sci., 8, 1105–1115. doi: 10.5194/os-8-1105-2012.

Zodiatis, G., De Dominicis, M., Perivoliotis, L., Radhakrishnan, H., Georgoudis, E., Sotillo, M., Lardner, R.W., Krokos, G., Bruciaferri, D., Clementi, E., Guarnieri, A., Ribotti, A., Drago, A., Bourma, E., Padorno, E., Daniel, P., Gonzalez, G., Chazot, C., Gouriou, V., Kremer, X., Sofianos, S., Tintore, J., Garreau, P., Pinardi, N., Coppini, G., Lecci, R., Pisano, A., Sorgente, R., Fazioli, L., Soloviev, D., Stylianou, S., Nikolaidis, A., Panayidou, X., Karaolia, A., Gauci, A., Marcati, A., Caiazzo, L., and Mancini, M. (2016). The Mediterranean Decision Support System for Marine Safety dedicated to oil slicks predictions, Deep-Sea Research Part II, http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2016.07.014.

Zodiatis, G., R. Lardner, T.M. Alves, Y. Krestenitis, L. Perivoliotis, S. Sofianos, and K. Spanoudaki (2017). Oil Spill forecasting (prediction), in THE SEA: THE SCIENCE OF OCEAN PREDICTION, J. Mar. Res., 75, 923–953, 2017.

### **Anexo 3.1 Páginas web de interés**

HYPERLINK "https://www.imo.org/" https://www.imo.org/

HYPERLINK "https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx" https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx

HYPERLINK "https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/SOLAS.aspx" https://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/ConferencesMeetings/Pages/SOLAS.aspx

HYPERLINK "https://www.rempec.org/en" https://www.rempec.org/en

HYPERLINK "https://www.emsa.europa.eu/" https://www.emsa.europa.eu/

HYPERLINK "https://www.iaea.org/" https://www.iaea.org/

HYPERLINK "https://www.goosocean.org/" https://www.goosocean.org/

HYPERLINK "https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER" \l "Background" https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#Background

HYPERLINK "http://weather.gmdss.org/" http://weather.gmdss.org/

HYPERLINK "https://hab.ioc-unesco.org/" https://hab.ioc-unesco.org/

HYPERLINK "https://data.hais.ioc-unesco.org/" https://data.hais.ioc-unesco.org/

HYPERLINK "https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER" \l "MPERSS" https://community.wmo.int/activity-areas/Marine/MEER#MPERSS

HYPERLINK "http://weather.gmdss.org/" http://weather.gmdss.org/

HYPERLINK "https://public.wmo.int/en/governance-reform/infrastructure-commission" https://public.wmo.int/en/governance-reform/infrastructure-commission

<https://public.wmo.int/en/governance-reform/services-commission>

\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_\_

1. https://www.bbc.com/news/world-europe-47574143 [↑](#footnote-ref-2)
2. https://www.bbc.com/news/world-latin-america-60180226 [↑](#footnote-ref-3)
3. Hay que tener en cuenta que las proliferaciones de algas nocivas (PAN) no se tienen en cuenta en esta revisión debido a que la predicción de las PAN se enfoca de forma diferente al seguimiento/modelización de emergencias marinas, ya que la predicción de las PAN utiliza un modelo acoplado de circulación oceánica-ecosistema que es menos avanzado (y menos preciso) que la modelización MEER y SAR en la actualidad. [↑](#footnote-ref-4)
4. Ver página 114, Informe final de la CMOMM-II con resoluciones y recomendaciones, OMM N°995 [↑](#footnote-ref-5)