

Predicción oceánica: modelización para el futuro

por Fraser Davidson¹, Andrew Robertson², Frédéric Vitart², Anthony Rea³, Michel Jean⁴, Andreas Schiller⁵, Thomas J. Cuff⁶, Sarah Grimes³, Eunha Lim³, Estelle de Coning³ y Peiliang Shi³

El océano es el ecosistema más grande de la Tierra. Desempeña un papel fundamental en la regulación del tiempo y el clima del planeta. Además, el océano modera el calentamiento global a través de la absorción de CO₂ y de su enorme capacidad calorífica.

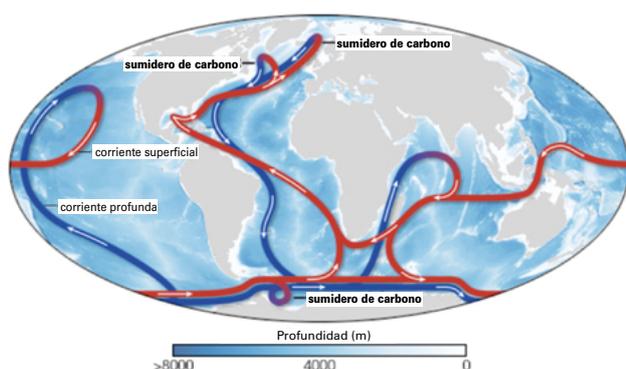


Figura 1. La capa oceánica superficial (entre 0 y 40 metros) absorbe el carbono atmosférico y este es transportado a las profundidades del océano en áreas específicas cerca de los polos (sumideros de carbono), que es donde interactúan la capa de mezcla y el océano profundo. (Mapa de Robert Simmon, NASA, adaptado de IPCC, 2001 y Rahmstorf, 2002).

Los informes de las Naciones Unidas señalan que el 40 % de la población mundial, casi 2 400 millones de personas, vive a menos de 100 km de la costa, y estiman

- 1 Copresidente del Equipo Científico del programa OceanPredict
- 2 Copresidentes del proyecto PMIM/PMIC S2S
- 3 Secretaria de la OMM
- 4 Presidente de la Comisión de Observaciones, Infraestructura y Sistemas de Información (INFCOM)
- 5 Departamento de Océanos y Atmósfera de la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia (CSIRO)
- 6 Director de la Oficina de observaciones del Servicio Meteorológico Nacional de la NOAA; presidente del Comité Permanente de Servicios Meteorológicos Marinos y Oceanográficos de la OMM

que la magnitud de las economías costeras oscila entre los 3 y los 6 billones de dólares de los Estados Unidos de América al año⁷. Las zonas costeras contienen infraestructuras esenciales como puertos comerciales, puertos deportivos, plantas desalinizadoras, centrales eléctricas, cercados para acuicultura, etc. El océano proporciona alimentos, permite el comercio y ejerce un papel importante en muchas culturas indígenas. El conocimiento de las características físicas y de la vida biológica que hay en el océano tiene utilidad para el turismo, la pesca, el transporte marítimo, la extracción de energía tanto renovable como no renovable, y mucho más. El océano mismo puede ser una fuente de minerales e ingredientes con valor medicinal.

Por lo tanto, no se puede subestimar la importancia de la seguridad marina y costera ni la resiliencia de los océanos. La información sobre el clima es esencial para orientar el desarrollo costero futuro, y adaptar las infraestructuras existentes, con el fin de reducir los impactos del tiempo adverso marino y oceánico. Las alertas tempranas basadas en impactos de peligros naturales, así como la predicción y las proyecciones climáticas ayudan a las comunidades y empresas costeras a evitar riesgos y aumentar la resiliencia.

El propio océano es un componente esencial del sistema Tierra en las proyecciones del cambio climático. Comprender el océano es fundamental para comprender el planeta y los cambios que la actividad humana está provocando en él. Hoy en día, el ecosistema oceánico y sus características físicas se ven afectados por las acciones humanas, y sus consecuencias nos afectarán a todos. No puede haber demora en promover el conocimiento y la comprensión del océano, su interacción con la atmósfera y el impacto de la humanidad en el océano.

7 <https://www.un.org/sustainabledevelopment/wp-content/uploads/2017/05/Ocean-fact-sheet-package.pdf>

Desde la perspectiva de la OMM, la predicción oceánica y la atmosférica están intrínsecamente vinculadas a través de procesos físicos que los modelizadores de ambos dominios tienen cada vez más en cuenta. En escalas de tiempo de hasta unos pocos días, la interacción entre el océano y la atmósfera tiene una gran influencia en el tiempo meteorológico en ciertos lugares, como cerca de las costas que experimentan afloramientos oceánicos, especialmente cuando estos están relacionados con cambios repentinos en la capa de hielo. En escalas de tiempo que van más allá de unos pocos días, la interacción océano-atmósfera afecta a los pronósticos meteorológicos en todos los lugares y su importancia aumenta cuanto mayores son los plazos de predicción. En las escalas temporales de la predicción climática y estacional, el acoplamiento del océano y la atmósfera en los sistemas de predicción es fundamental.

La predicción del tiempo, en casos como la formación e intensidad de ciclones tropicales, y las predicciones a más largo plazo, como la precipitación estacional, dependen de las observaciones de temperatura y corrientes en el océano (Weller y otros, 2019).

Estado de la predicción oceánica

Para conocer el estado de la predicción oceánica, primero hay que tener una visión general del estado actual de los sistemas de predicción oceánica y de la red internacional que los interconecta, y así obtener una perspectiva de los avances futuros de la ciencia que hay detrás de la predicción oceánica, de la capacidad del sistema de predicción y del potencial para una próxima integración de los sistemas oceánicos en modelos sin discontinuidad del sistema Tierra. La madurez de las observaciones oceanográficas, los sistemas de predicción e investigación, las técnicas fundamentales de la predicción oceánica como la asimilación de datos, la modelización oceánica, la verificación de predicciones y la evaluación de los sistemas de observación permiten ahora que prosperen nuevas áreas operativas y de investigación.

La clave para cualquier sistema de predicción es la disponibilidad en tiempo real de observaciones desde la superficie y desde plataformas espaciales. En este aspecto, las grandes diferencias entre la atmósfera y el océano se vuelven muy evidentes. Desde la perspectiva de un satélite de teledetección, el océano es menos transparente y, por lo tanto, menos medible en profundidad que la atmósfera. La información satelital, por lo tanto, en gran parte solo está disponible para la superficie misma del océano. Sin embargo, los altímetros satelitales que miden la altura de la superficie del mar

son un punto fuerte de la teledetección oceanográfica. La altura del océano es representativa de los procesos integrados en profundidad entre la superficie y el fondo del océano, y la altimetría satelital permite definir los remolinos oceánicos a gran escala en tiempo real en los sistemas de predicción. Además, la altimetría facilita la vigilancia de los cambios a largo plazo de la profundidad del océano, como el aumento del nivel del mar.

El Sistema de Observación del Pacífico tropical (TPOS), que mide los cambios a largo plazo en el intercambio de calor entre el océano y la atmósfera, fue diseñado en la década de 1980 para mejorar la comprensión científica del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) con el fin de predecir mejor sus eventos. Desde entonces, ha proporcionado datos vitales que han contribuido a mejorar los pronósticos ENOS para las decisiones sobre agricultura (por ejemplo, Hansen y otros, 1998; Chiodi y Harrison, 2017). Se han desarrollado sistemas de observación oceánica para el Atlántico (PIRATA) y el océano Índico (RAMA) siguiendo el modelo TPOS, que también se está adaptando para satisfacer las necesidades de observación, experimentales y operativas de hoy y del futuro.

Asimilación de datos. Los esquemas de asimilación de datos varían entre los grupos de predicción oceánica. El objetivo principal es minimizar el desajuste de los resultados del modelo con las observaciones, respetando las leyes de la física. Las observaciones asimiladas en los sistemas de predicción oceánica actuales incluyen altimetría, color del océano, velocidades superficiales, hielo marino y datos de plataformas novedosas como los planeadores oceánicos. Muchos sistemas usan en la actualidad aproximaciones multimodelo o técnicas de modelización por conjuntos. Un próximo cambio que resultará fundamental en la asimilación de datos será la llegada del altímetro SWOT de superficie de agua y topografía oceánica, que proporcionará una imagen bidimensional real de la topografía de la superficie del océano con una resolución de aproximadamente 2 km, en lugar de las mediciones a lo largo de la trayectoria satelital, donde las bandas observadas están espaciadas por 200 km y separadas en el tiempo.

Predicción a corto plazo. Las predicciones oceánicas a corto plazo abarcan escalas de tiempo desde las próximas horas hasta diez días o más y, a menudo, se denominan simplemente predicciones. Ha habido un progreso significativo en la predicción oceánica en los últimos años (Bell y otros, 2015; Davidson y otros, 2019). Las mejoras de los sistemas de predicción han sido una mayor resolución (horizontal y vertical), la inclusión de mareas, deriva y espesor del hielo marino, las aproximaciones al ecosistema, la mejora de los sesgos de

mezcla, la ampliación de las áreas en modo regional (por ejemplo, regiones polares) y el progreso en materia de modelos acoplados (acoplamiento de olas, hielo marino, modelos de huracanes, etc.).

La predicción acoplada hielo-océano-olas-atmósfera a corto y medio plazo se está usando para mejorar las predicciones meteorológicas en una escala de tiempo de tres días a dos semanas, lo que permitirá operaciones más seguras en el mar y en la costa mediante una mejor predicción de fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, como los ciclones tropicales. El aumento de las actividades en las latitudes altas también está impulsando un mayor desarrollo de la predicción operativa del hielo y del océano.

Predicción subestacional a estacional. A diferencia de los episodios atmosféricos de gran envergadura que evolucionan en escalas de tiempo de días, los episodios oceánicos de gran magnitud generalmente evolucionan en escalas de tiempo semanales a mensuales e incluyen olas de calor marino y variaciones en el nivel del mar, que pueden causar inundaciones con buen tiempo y aumentar el riesgo de inundación de las tormentas tropicales y extratropicales.

La predicción subestacional a estacional, con un plazo de pronóstico entre más de dos semanas y menos de una estación, se realiza actualmente de manera rutinaria utilizando modelos acoplados océano-atmósfera. Para tiempos de predicción superiores a dos semanas, el acoplamiento de la atmósfera con el océano contribuye, por ejemplo, a la predecibilidad de las variaciones del monzón y a la Oscilación de Madden-Julian (por ejemplo, Woolnough y otros, 2007). Además, las observaciones satelitales sugieren que las temperaturas de la superficie del mar inducidas por remolinos oceánicos de mesoescala en latitudes medias pueden influir en la capa límite planetaria atmosférica, lo que condicionaría la predecibilidad de las trayectorias de los temporales invernales en escalas de tiempo subestacionales a estacionales (Saravanan y Chang, 2019).

La predicción subestacional de las variaciones regionales en la temperatura de la superficie del mar, y las corrientes cercanas a la superficie, también es de interés directo para una amplia gama de actividades y empresas, incluida la gestión de la pesca, las actividades mineras en alta mar y el transporte oceánico.

Predicción costera. Por lo que respecta a las costas, los responsables de la toma de decisiones que afectan a las áreas costeras, cada vez más pobladas y urbanizadas, reciben los beneficios de la oceanografía operativa costera. Esto se debe a que la oceanografía operativa es,

cada vez más, capaz de proporcionar información precisa sobre fenómenos como los penachos de sedimentos y nutrientes que provienen de los ríos costeros, prediciendo así la súbita proliferación de algas nocivas, su evolución y la erosión costera.

Hielo marino. El hielo marino se considera también parte del sistema oceánico acoplado. Debido a sus propiedades aislantes y reflectantes, el hielo marino regula los intercambios entre la atmósfera y el océano. En la escala de tiempo subestacional a estacional, los sistemas de predicción tienen cada vez más en cuenta el hielo marino, ya sea para mejorar los pronósticos en sí mismos o para proporcionar predicciones específicas del hielo marino. La predicción subestacional del hielo marino también tiene amplias aplicaciones potenciales (por ejemplo para el cálculo de rutas de barcos), pero estas aún no se han aprovechado por completo (Chevallier y otros, 2019).



Ejemplo de resumen de una página del estado del océano, extraído de los sistemas de reanálisis del océano del Servicio de vigilancia marina Copernicus de la Unión Europea (fuente: Informe anual sobre el estado del océano, von Schuckmann y otros, 2019).

Reanálisis climáticos e informes oceánicos. Paralelamente a los esfuerzos de la comunidad climática para generar "reanálisis" de las condiciones pasadas, el análisis del

estado del océano tiene como objetivo reproducir las condiciones del océano durante los últimos 30 años a escala mundial y regional. Se están desarrollando análisis tridimensionales del estado oceánico pasado y presente, desde la escala global a la costera, basados en la misma infraestructura de modelización y asimilación utilizada para la predicción oceánica. Esto sigue el enfoque de los reanálisis atmosféricos utilizando las observaciones históricas disponibles para generar cubos de datos físicamente consistentes. El informe anual sobre el estado del océano (von Schuckmann y otros, 2019) del Servicio de vigilancia marina Copernicus de la Unión Europea es un excelente ejemplo de análisis cuidadoso de los datos analizados de un año en un contexto histórico. Se resume en un gráfico que proporciona tendencias a gran escala de las principales variables oceánicas en varias regiones del mundo.

Comunicación y verificación. Se ha mejorado la comunicación y la difusión de información a los usuarios intermedios. Hoy en día, la difusión de los resultados de los sistemas de predicción es similar a los enfoques adoptados por la OMM en la distribución de productos de predicción numérica del tiempo. La mayoría de los sistemas de predicción oceánica también están dedicando actualmente esfuerzos en verificación, seguimiento y validación para poder mostrar el valor de sus productos a sus usuarios.

Fortalecimiento de las predicciones oceánicas mediante asociaciones

El Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible brinda la oportunidad de impulsar aún más la oceanografía operativa. El Decenio ofrece un impulso para que las comunidades oceánicas nacionales e internacionales se unan para ampliar la red y la ciencia esenciales para la generación de información oceánica exhaustiva. Un objetivo clave del Decenio es un océano previsto, en el que la sociedad tenga la capacidad de comprender las condiciones oceánicas actuales y futuras.

La OMM y la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO, han reconocido desde hace mucho tiempo el valor y la necesidad de los servicios de predicción oceánica, y han trabajado juntos para habilitar y comprender la cadena de valor completa de la predicción oceánica. En los últimos años, el Sistema Mundial de Observación del Océano (GOOS)⁸ ha enfatizado este enfoque sobre la predicción oceánica para

ofrecer servicios relevantes en beneficio de la sociedad. La comunidad internacional de predicción oceánica está colaborando a través del programa OceanPredict, el GOOS, la OMM, la COI, el Comité sobre Satélites de Observación de la Tierra (CEOS) y la iniciativa Planeta Azul del Grupo intergubernamental de Observación de la Tierra (GEO). Estas asociaciones refuerzan el intercambio de ideas y ponen en contacto a la comunidad científica oceanográfica y atmosférica con los modelizadores. Las asociaciones dentro de los entornos nacionales también están impulsando las predicciones oceánicas en beneficio de la sociedad. Los ejemplos de los gobiernos de Australia, Canadá y los Estados Unidos de América muestran el éxito de la colaboración entre instituciones meteorológicas y oceanográficas.

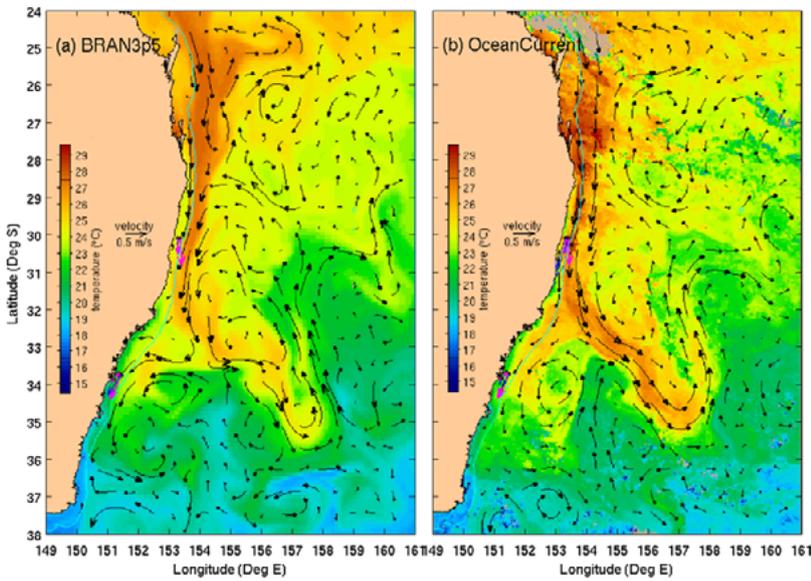
Bluelink, predicción oceánica en Australia

Bluelink es una asociación entre la Oficina de Meteorología de Australia (BOM), la Organización de Investigación Científica e Industrial del Commonwealth de Australia (CSIRO) y el Departamento Australiano de Defensa con socios colaboradores que incluyen el Sistema Integrado de Observación Marina, el Grupo de Ciencia y Tecnología de Defensa, la Infraestructura Computacional Nacional y el sector universitario.

El sistema operativo de predicción oceánica Bluelink se utiliza para convertir las observaciones oceanográficas físicas en análisis y predicciones coherentes. Estos análisis y predicciones forman la base de los servicios de información sobre el medio marino y su ecosistema y pueden proporcionar condiciones de contorno para las predicciones meteorológicas. Los servicios de información de Bluelink están disponibles para las industrias marinas (pesca comercial, acuicultura, transporte marítimo, compañías de petróleo y gas, energía renovable), para las agencias gubernamentales (búsqueda y rescate, defensa, ordenación costera, protección ambiental), y otras partes interesadas (recreo, deportes náuticos, pesca artesanal y deportiva), que dependen de la información oportuna y precisa sobre el medio marino.

En esencia, Bluelink consta de tres sistemas de componentes interconectados a escalas global, regional y cercana a la costa (zona litoral). El principal objetivo científico es proporcionar predicciones oceánicas operativas y fiables, así como reanálisis de mesoescala oceánica (sistema global), submesoescala (sistema regional) y circulación cercana a la costa (sistema de la zona litoral) en escalas de tiempo de días a semanas. Más allá del pronóstico tradicional a corto plazo de las

8 Copatrocinado por la COI, la OMM, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y el Consejo Internacional de Ciencias



Ejemplo típico de a) campos de reanálisis de Bluelink y b) campos observados para el mar de Tasmania. El color muestra la temperatura de la superficie del mar, y las flechas, la velocidad de la superficie. (Esta comparación está adaptada de: www.marine.csiro.au/ofam1/bran1/br3p5_EAC_tv12/20120111.html).

propiedades físicas del océano (temperatura, salinidad, altura de la superficie, corrientes, olas), las actividades marinas como la gestión de la calidad del agua y del hábitat, así como la vigilancia del clima, dependen cada vez más de datos y productos oceanográficos operativos.

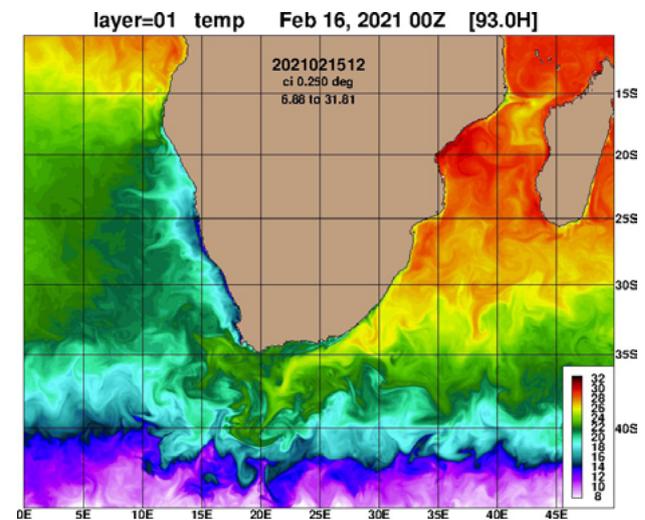
en el desarrollo del GOFS por parte de la Marina de los Estados Unidos, la NOAA también incorporó en su RTOFS el sistema de asimilación de datos oceánicos costeros de la Marina. La versión 2.0 del RTOFS, implementada en

Asociación estadounidense de modelización oceánica para un sistema terrestre

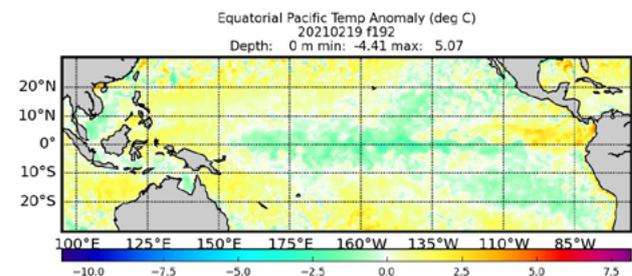
Dentro de los Estados Unidos de América, la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera (NOAA) y el Departamento de Marina se han asociado desde hace más de una década para desarrollar e implementar predicciones oceánicas operativas. El resultado de estos modelos proporciona la base para una variedad de servicios de predicción meteorológica y oceánica, que ayudan a la seguridad de las operaciones marítimas; se incluyen las predicciones de ciclones tropicales, las operaciones de búsqueda y rescate, la respuesta a emergencias ambientales marinas, como los derrames de petróleo, y las operaciones cercanas a los márgenes de la zona del hielo marino.

La Marina de los Estados Unidos comenzó a utilizar modelos de circulación oceánica global en 1999 (Rhodes y otros, 2002). La versión actual del sistema GOFS de predicción oceánica global de la Marina, operativo en 2020, combina el modelo oceánico de coordenadas híbridas con el modelo CICE de hielo marino de Community Ice Code. En 2021, la Marina pondrá en operación un sistema GOFS de 1/25 grados con CICE y mareas.

La NOAA implementó su sistema RTOFS de predicción oceánica global en tiempo real en 2011. Basado inicialmente



Predicción del GOFS de la temperatura de la superficie del mar, día 7-1/2 (fuente: Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos).



Predicción del RTOFS global de la anomalía de la temperatura de la superficie del mar, día 8 (fuente: NOAA).

diciembre de 2020, incorporó un sistema actualizado de asimilación de datos oceánicos de la NOAA.

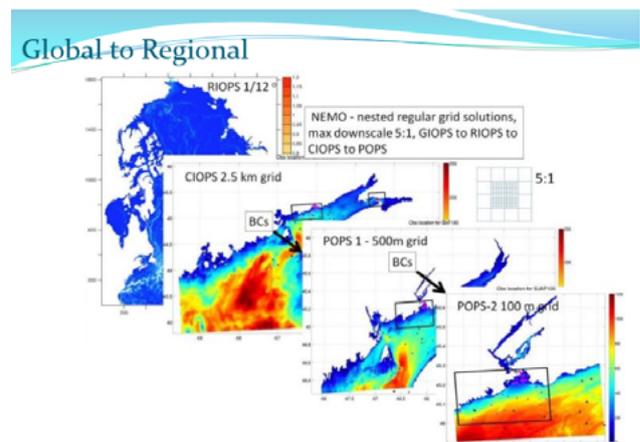
En 2017, como parte del proyecto de mejora del pronóstico de huracanes, la NOAA puso en marcha un nuevo modelo acoplado océano-atmósfera a escala regional. El modelo HMON de huracanes no hidrostático acoplado con el océano a multiescala, proporciona a los predictores una guía sobre la trayectoria y la intensidad entre 0 y 5 días, para respaldar los avisos oficiales y los productos de predicción del Centro Nacional de Huracanes/Centro Meteorológico Regional Especializado (CMRE) de Miami. Al igual que HMON, el modelo operativo de investigación y predicción meteorológica de huracanes también usa estados oceánicos acoplados especificados usando las condiciones iniciales y de contorno de RTOFS.

Esfuerzos como los anteriores, que representan solo una parte de los trabajos de modelización oceánica operativa de los Estados Unidos, están ayudando a desarrollar capacidades de predicción de un sistema terrestre totalmente acoplado. Como parte de una iniciativa nacional, recogida en la legislación como la Ley de Innovación en Investigación y Predicción Meteorológica de 2017, la NOAA está colaborando con empresas meteorológicas de todo el país (organismos gubernamentales, centros de formación y el sector privado) para mejorar su predicción numérica del tiempo. Y quiere hacerlo a través del Centro de innovación de la predicción de la Tierra, comprometiéndose a la empresa para acelerar la investigación científica y las contribuciones en modelización al Sistema de predicción unificado. Puesto que el sistema de asimilación de datos terrestres y el sistema de predicción están basados en la comunidad, el Sistema de predicción unificado aunará esfuerzos en los próximos cinco años hacia un acoplamiento completo de los sistemas terrestres (océano, atmósfera, tierra, hielo marino y biosfera) para aplicaciones meteorológicas y climáticas. El Centro de innovación de la predicción de la Tierra facilitará esta amplia colaboración con un entorno de desarrollo en la nube, un repositorio de código, observaciones y herramientas, y apoyo y participación de la comunidad.

Asociación canadiense para la vigilancia de la atmósfera, el océano y el hielo, la predicción acoplada y los servicios oceánicos

La red operativa canadiense CONCEPTS de sistemas acoplados de predicción ambiental es una colaboración entre tres ministerios federales: los de Pesca y Océanos, Medio Ambiente y Cambio Climático, y Defensa Nacional. La red trabaja para desarrollar e implementar

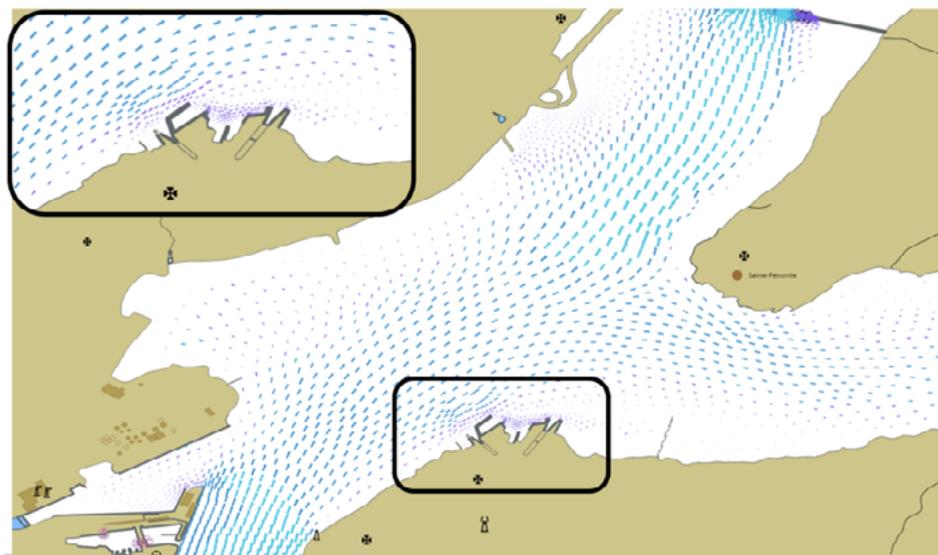
modelos informáticos que apoyen los avances en materia de predicción del hielo oceánico. El objetivo es aprovechar los progresos en la modelización oceánica y los nuevos sistemas de observación oceanográfica mundial en tiempo real para obtener productos de predicción oceanográfica y mejorar las predicciones climáticas estacionales e interanuales. Esta red central se está beneficiando de múltiples colaboraciones con instituciones académicas, el sector privado e instituciones en el extranjero como Mercator Ocean International.



Ejemplo del enfoque en cascada de los sistemas de predicción utilizados para generar productos y servicios con alta resolución espacial y temporal, para la bahía de Fundy (Canadá). (Paquin y otros, 2019).

Con el fin de facilitar la colaboración entre ministerios gubernamentales y con los socios externos de la red CONCEPTS, en 2009 se llevó a cabo una estrategia de tres ejes:

1. la recopilación y difusión de medidas de las propiedades físicas del medio marino, para su asimilación en modelos y así mejorar los pronósticos de los sistemas de predicción ambiental (tiempo, hielo, olas y océano) en el Canadá;
2. el desarrollo de sistemas de predicción ambiental acoplados para mejorar los análisis y pronósticos de los sistemas de predicción ambiental (tiempo, hielo, olas y océano) en el Canadá; y
3. la disponibilidad de los productos y servicios de CONCEPTS para los usuarios finales, entre ellos:
 - a) proporcionar retroalimentación de los sistemas de vigilancia y predicción para realizar mejoras continuas, y
 - b) permitir la colaboración dentro y fuera de CONCEPTS desarrollando y suministrando



Ejemplo de producto para la aplicación de la navegación electrónica, generado por un sistema de predicción 2D de alta resolución del estuario de un río, ejecutado por el Centro Canadiense de Predicción Meteorológica y Ambiental H2D2 (Matte y otros, 2017).

sistemas de descubrimiento, visualización y accesibilidad de las observaciones y las salidas de modelos.

El paquete actual de sistemas de predicción acoplados atmósfera-océano-hielo, incluye:

1. el sistema global GIOPS de predicción de hielo oceánico funcionando con una resolución de $\frac{1}{4}$ de grado⁹;
2. el sistema regional RIOPS de predicción de hielo oceánico que corre a una resolución de $\frac{1}{12}$ de grado sobre el Pacífico norte, el Ártico y el Atlántico norte^{10,11};
3. el sistema costero CIOPS de predicción de hielo oceánico que corre a $\frac{1}{36}$ grados sobre el Atlántico noroccidental y el Pacífico nororiental¹²;
4. el sistema de predicción del ciclo hidrológico de los Grandes Lagos (atmósfera, océano, hielo, hidrología) con una resolución horizontal de 2 km; y
5. la modelización hidrodinámica del río San Lorenzo desde Montreal hasta la ciudad de Quebec.

9 G. Smith y otros, *QJRMS*, volumen 142, número 695, enero de 2016, parte B, páginas 659-671

10 J. F. Lemieux y otros, 2016, *QJRMS*, volumen 142, número 695, enero de 2016, parte B, páginas 632-643

11 Smith, G. C., Liu, Y., Benkiram, M., Chikhar, K., Surcel Colan, D., Testut, C. E., Dupont, F., Lei, J., Roy, F., Lemieux, J. F. y Davidson, F., 2020. The Regional Ice Ocean Prediction System v2: a pan Canadian ocean analysis system. Geoscientific Model development Discussions, páginas 1-49

12 Artículo en preparación

El enfoque en cascada que se utiliza abre la puerta a productos y servicios en múltiples escalas espaciales y temporales. Actualmente se está pensando en acoplarlo con sistemas de modelización biogeoquímicos. La red general de sistemas suministra la información necesaria para permitir una aproximación a la navegación electrónica.

Proyecto de Predicción Subestacional a Estacional

Para estrechar la brecha existente entre las predicciones meteorológicas a medio plazo y las predicciones estacionales, los Programas Mundiales de Investigación Meteorológica (PMIM) y de Investigaciones Climáticas (PMIC)¹³ de la OMM, iniciaron el Proyecto de Predicción Subestacional a Estacional (S2S). El objetivo principal del proyecto es mejorar la capacidad de pronóstico y la comprensión de la escala de tiempo subestacional a estacional, y promover la adopción de las predicciones S2S por parte de los centros operativos y su explotación por parte de las comunidades de aplicaciones (www.s2sprediction.net). La primera fase del S2S se desarrolló entre 2013 y 2017 y la segunda fase, que comenzó en 2018, finalizará en 2023. Una de las investigaciones de la fase 2 centra su atención en la predecibilidad subestacional a estacional y en la predicción oceánica y del hielo marino. El S2S trabaja en coordinación con los grupos de trabajo sobre predicción subestacional a interdecadal, sobre asimilación de datos y sistemas de observación, y sobre predecibilidad, dinámica y

13 Copatrocinado por la OMM, la COI y el Consejo Internacional de Ciencias

predicción por conjuntos para promover predicciones subestacionales optimizadas gracias a una mejor inicialización del estado del océano y del hielo marino, así como a una mayor descripción de los procesos fundamentales del océano y del hielo marino, que proporcionan predecibilidad en escalas de tiempo subestacionales.

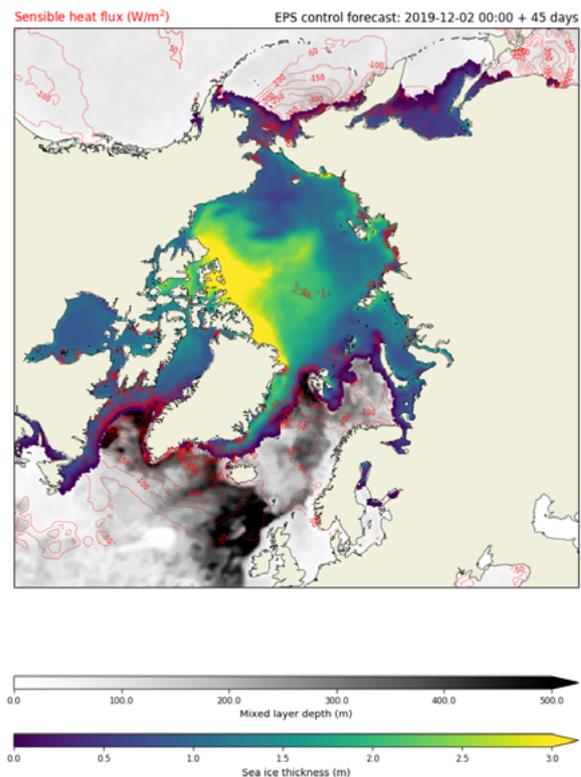
El mayor logro de la primera fase del S2S fue la creación, en 2015, de la base de datos S2S, que contiene las predicciones subestacionales en tiempo casi real (hasta 60 días) y las repredicciones (a veces conocidas como predicciones retrospectivas) de 11 centros operativos. La mayoría de los modelos S2S son acoplados de océano/atmósfera/hielo marino, y la lista de parámetros disponibles en la base de datos S2S siempre ha incluido la temperatura de la superficie del mar y la cobertura de hielo marino.

Desde enero de 2020, se han añadido los nueve nuevos parámetros oceánicos y de hielo marino siguientes a la base de datos S2S: profundidad de la isoterma de 20 °C, espesor de la capa de mezcla, salinidad y temperatura potencial en los 300 m superiores, corrientes superficiales, salinidad, altura de la superficie del mar y espesor del hielo marino. La disponibilidad de este amplio conjunto de variables oceánicas y de hielo marino aumenta sustancialmente el valor de la base de datos para la investigación del sistema acoplado S2S y para abordar cuestiones científicas esenciales. Actualmente, las nuevas variables están disponibles en cuatro modelos: Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Plazo Medio (ECMWF), E3C, Administración Meteorológica China (CMA) y Météo-France, tres semanas después de las predicciones en tiempo real (desde enero de 2020) y de las correspondientes predicciones retrospectivas, que se realizan en tiempo casi real. El próximo año, las nuevas variables estarán disponibles en un conjunto ampliado de modelos S2S.

Como ejemplo de lo que ya se está haciendo, Zampieri y otros (2018) evaluaron la capacidad de la predicción de varios modelos de la base de datos S2S y encontraron que algunos de ellos mostraban una pericia significativa para predecir la cobertura de hielo marino con hasta un mes de antelación. Este importante resultado sugiere que los pronósticos subestacionales a estacionales de última generación podrían ser potencialmente útiles para aplicaciones como el trazado de rutas para barcos en las regiones árticas. La disponibilidad de las nuevas variables oceánicas debería impulsar nuevos estudios científicos sobre la predecibilidad de las situaciones meteorológicas oceánicas de alto impacto, como las olas de calor, que proporcionarán información sobre el

posible uso de estas predicciones subestacionales para aplicaciones como la pesca. La siguiente imagen proporciona un ejemplo del posible uso de estos datos en mapas meteorológicos oceánicos. En el ejemplo, se muestra una predicción a 3 o 4 semanas de las anomalías del nivel del mar respecto a los valores climatológicos.

La incorporación de los nuevos parámetros también hará que la base de datos S2S sea más adecuada a la hora de ayudar a entender las interacciones aire-hielo-océano en los márgenes del hielo marino, como se ilustra en la imagen inferior. También ayudará a diagnosticar la evolución de la deriva oceánica con los períodos de predicción que tienen los pronósticos S2S.



Espesor del hielo marino, profundidad de la capa de mezcla y flujos de calor sensible sobre el océano, según la predicción de control de plazo ampliado del ECMWF, iniciada el 2 de diciembre de 2019 y válida para el 16 de enero de 2020 (período de predicción de 45 días).

Para coordinar estas actividades, la fase 2 del S2S incluye un subproyecto oceánico, que desarrollará un protocolo para estudios coordinados de casos, que se pueden llevar a cabo en los centros que realizan predicciones S2S de fenómenos extremos oceánicos específicos e interacciones aire-mar, por ejemplo, el inicio de ENOS. Como

ejemplos se pueden citar un estudio de predecibilidad de un evento importante de blanqueamiento de corales en 2017 y la interacción aire-mar intraestacional al inicio del episodio de El Niño 2015/2016.

Organización de la predicción oceánica internacional

Artículos recientes^{14,15} han documentado la fortaleza del enfoque como un ciclo de valor (Day, 1999) en la investigación de la transferencia de tecnología de operaciones a servicios. En particular, Ruti y otros (2020) proporcionan una descripción de este ciclo en el contexto meteorológico actual y como un componente esencial para permitir el enfoque de los sistemas terrestres. Esta cadena de valor vincula la producción y prestación de estos servicios, con las decisiones de los usuarios y con los resultados y valores resultantes de esas decisiones. La información suministrada por los usuarios se envía luego a Investigación y Operaciones para mejorar aún más los servicios. Se está produciendo un pensamiento similar en otras disciplinas.

La siguiente imagen (adaptada de Schiller y otros, 2019) muestra la cadena de valor marina. Hay dos iniciativas internacionales fundamentales que apoyan las predicciones oceánicas: OceanPredict y GOOS. Durante más de dos décadas, OceanPredict y sus predecesores se han centrado en la investigación y la implementación operativa de sistemas de predicción oceánica. El GOOS ha proporcionado observaciones oceánicas para inicializar y validar las predicciones oceánicas, impulsadas por la colaboración entre la OMM y la COI.



14 OMM, 2015. *El valor del tiempo y el clima: evaluación económica de los servicios meteorológicos e hidrológicos*. OMM-N° 1153, 308 págs.

15 Ruti y otros, 2020. Advancing Research for Seamless Earth System Prediction, *Bull. Amer. Met. Soc.*, DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0302.1>

OceanPredict

A fines de la década de 1990, se lanzó el Experimento mundial de asimilación de datos oceánicos (GODAE) para i) demostrar la viabilidad y la utilidad de la vigilancia y la predicción oceánica en una escala de tiempo de días a semanas y ii) contribuir a la construcción de una infraestructura oceanográfica operativa mundial (Smith y Lefebvre, 1997; Schiller y otros, 2018). Sobre la base de su éxito, se creó en 2009 GODAE OceanView (Bell y otros, 2009) para definir, vigilar y promover acciones encaminadas a coordinar e integrar la investigación asociada con sistemas de predicción y análisis oceánicos de múltiples escalas y multidisciplinarios.

En 2019, GODAE OceanView se convirtió en OceanPredict, que continúa ampliando sus actividades con un énfasis adicional en la predicción oceánica como parte de la red más amplia de iniciativas internacionales vinculadas a la oceanografía operativa. OceanPredict está desarrollando así asociaciones estrechas con entidades internacionales como la OMM, la COI, el GOOS y la iniciativa Planeta Azul del GEO.

Un total de 14 países mantienen OceanPredict, aunque los participantes científicos y técnicos de cualquier país son bien recibidos en OceanPredict y sus equipos de trabajo. Participantes de 41 países asistieron al simposio OceanPredict19 (Vinaychandran y otros, 2020), entre ellos científicos de centros de predicción operativa, organismos gubernamentales, instituciones académicas y consorcios o empresas privados.

La mayoría de los grupos de OceanPredict están vinculados o forman parte de centros de predicción numérica del tiempo y del medioambiente como la NOAA, E3C, Météo-France y el Servicio Meteorológico del Japón, por nombrar algunos. De hecho, siete de los nueve Centros meteorológicos mundiales de la OMM son miembros de OceanPredict. Además, todos los centros de predicción cuentan con colaboradores académicos que apoyan algunas de sus investigaciones. OceanPredict coordina las actividades de investigación y desarrollo en asimilación de datos oceánicos, evaluación de los sistemas oceánicos, predicción de los ecosistemas marinos, predicción oceánica costera, sistemas de predicción acoplados atmósfera-oceano e intercomparaciones y validaciones de los sistemas de predicción oceánica.

La colaboración en estos temas incluye a investigadores académicos, científicos de organismos de predicción operativa y equipos de desarrollo que dan apoyo al desarrollo, las operaciones y la difusión en los organismos

de predicción. A través de talleres internacionales, OceanPredict reúne a las diversas comunidades para promover la ciencia y las aplicaciones de la predicción oceánica bajo el liderazgo de un equipo científico dedicado. Los principales expertos de la comunidad de la OMM son los portavoces, y algunos talleres tienen lugar conjuntamente con asociados de la OMM como el ECMWF. El equipo científico de OceanPredict tiene tres objetivos principales:

- realizar evaluaciones del sistema de pronóstico y del rendimiento de los componentes combinados con mejoras de estos últimos;
- emprender iniciativas destinadas a explotar los sistemas de predicción para un mayor beneficio social; y
- llevar a cabo evaluaciones de la dependencia de los sistemas de predicción y de los beneficios sociales de los componentes del sistema de observación.

Perspectiva

A medida que avancen los modelos de pronóstico oceánico, será cada vez más importante definir y proyectar qué tipo de situaciones serán predecibles mediante los sistemas de pronóstico oceánico y los sistemas acoplados de predicción atmósfera-oceano, con una exactitud y unos intervalos de confianza útiles.

Un aspecto a tener en cuenta es la capacidad de los sistemas y de los usuarios para consumir productos de predicción. Un buen ejemplo de esto es la navegación electrónica para apoyar la seguridad marítima, donde los nuevos estándares de archivos y metodologías permitirán que los sistemas de navegación portátiles o integrados en los puentes de los barcos saquen el máximo provecho de las salidas numéricas de los sistemas de predicción oceánica y atmosférica en tiempo real. Esto permitirá crear programas informáticos avanzados de planificación de rutas, pero también facilitará modelos de ingeniería numérica (gemelos digitales) de un barco, convirtiendo la información de la predicción ambiental en información sobre el impacto en el barco. Es importante tener en cuenta que para la mayoría de las actividades en el mar, el usuario desea información y predicciones ambientales marinas completas y coherentes, que podrían incluir variables como el viento, las olas, las condiciones de hielo, la temperatura atmosférica, la presión atmosférica, el nivel del mar, la temperatura del agua y la salinidad del agua.

Vínculos con la meteorología y la OMM

Para avanzar, es necesario fortalecer el vínculo entre la oceanografía y la meteorología operativas. Más específicamente, la cadena de valor completa en oceanografía operativa requerirá entornos de trabajo nacionales e internacionales para productos con valor útil para el usuario final. Ya existe una interacción significativa con los grupos de oceanografía de la OMM, como lo demuestra el incremento en el uso del Sistema de Información de la OMM para las observaciones de los océanos. Para avanzar, si bien la mayoría de los centros de predicción meteorológica incluyen el pronóstico oceánico en sus actividades, será importante fortalecer la relación entre el océano y el tiempo atmosférico, desde las observaciones hasta la predicción y el uso final.

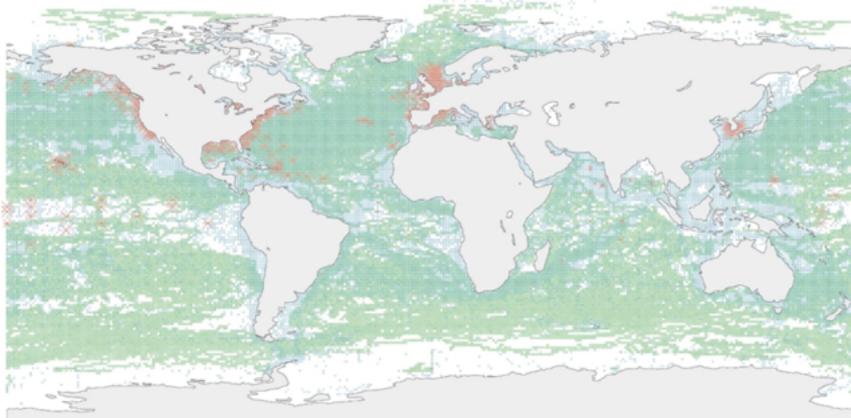
Aprovechamiento de los sistemas de la OMM en el futuro de la predicción oceánica

La OMM cuenta con entornos de trabajo bien desarrollados que abarcan toda la cadena de valor de los servicios meteorológicos, que a su vez evoluciona para satisfacer los requerimientos y, al mismo tiempo, permite nuevos flujos de información y trabajo en toda la cadena de valor del sistema Tierra. En esta sección se analizan tres de estos entornos en lo que respecta a la cadena de valor de la predicción oceánica.

WIGOS

El Sistema Mundial Integrado de Sistemas de Observación de la OMM (WIGOS) ofrece un marco general que integra las diversas fuentes de observaciones que contribuyen a las áreas de aplicación de la OMM. El examen continuo de las necesidades de la OMM compara los requisitos de los usuarios de observación con las capacidades de los sistemas observacionales para determinar cómo debe evolucionar el diseño de WIGOS. Además de los estudios de impacto para identificar lagunas en la observación, el examen continuo de las necesidades se utiliza para dar prioridad a la mejora de los sistemas mundiales de observación y recomendar acciones fundamentales a los Miembros de la OMM y a otros programas importantes para abordar las deficiencias.

El marco del WIGOS proporciona un enfoque sistemático que puede permitir que los grupos de predicción oceánica implementen evaluaciones sistemáticas de los impactos observados frente a los pronósticos, y así



Observaciones de la superficie marina transmitidas a través del SMT en 2018

Barcos (+) Boyas a la deriva (x) Boyas fijas (*)

El tamaño del símbolo indica el número de días en 2018 en que la celda 1° x 1° ha sido observada de: 30 días o menos, a X: 335 días o más

Cobertura de datos de los tres componentes principales del Sistema Mundial de Observación (SMO) (es decir, barcos, boyas a la deriva y boyas fijas) según la información recibida por Météo-France a través del SMT en 2018 (véase la leyenda para los detalles de cada símbolo). (De Frontiers in Marine Science, 30 de agosto de 2019, <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00419>)

valorar su comportamiento en toda la cadena de valor de la predicción oceánica. En particular, la ejecución de un examen continuo de las necesidades desde el punto de vista de la predicción oceánica conectaría mejor con toda la cadena de valor oceanográfica, y garantizaría que la inversión en observaciones oceánicas proporcione la mejor relación calidad-precio con respecto a unos mejores servicios de información en materia de predicción oceánica.

WIS

El **Sistema de Información de la OMM (WIS)** une los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN) y las regiones para el intercambio, la gestión y el procesamiento de datos. En la actualidad, la mayor parte de las observaciones oceánicas utilizadas en los sistemas de predicción en tiempo casi real se transmite a través del Sistema Mundial de Telecomunicación de la OMM (SMT) (consulte en la figura la cobertura de las observaciones transmitidas por el SMT en 2018).

También se ha puesto de relieve que el SMT es un medio eficaz para las alertas de tsunamis, distribuyendo los mensajes con un retraso, en la mayoría de los casos, de menos de dos minutos. La OMM está reformando el WIS/SMT para utilizar las nuevas tecnologías de intercambio de datos, y WIS 2.0 proporcionará mejores medios para suscribirse a los flujos de datos y formas efectivas de enviar mensajes de aviso.

En el futuro, la disponibilidad de datos oceánicos en el WIS tendrá muchos beneficios. El WIS proporciona la infraestructura mundial para el intercambio de datos y

de información entre todos los SMHN, e incorpora el SMT creado desde hace tiempo para la distribución en tiempo real de los datos de observación necesarios para sus requisitos operativos y, cada vez más, los metadatos necesarios para hacer un mejor uso de los datos en tiempo real. Si bien el SMT sigue siendo el método estándar de intercambio mundial de datos entre los SMHN y cumple con sus requisitos y aplicaciones de carácter operativo, la comunidad académica y el público tienen una clara necesidad de una arquitectura de gestión de datos más simplificada y sólida, que debería proporcionar acceso a los datos y metadatos en un formato común.

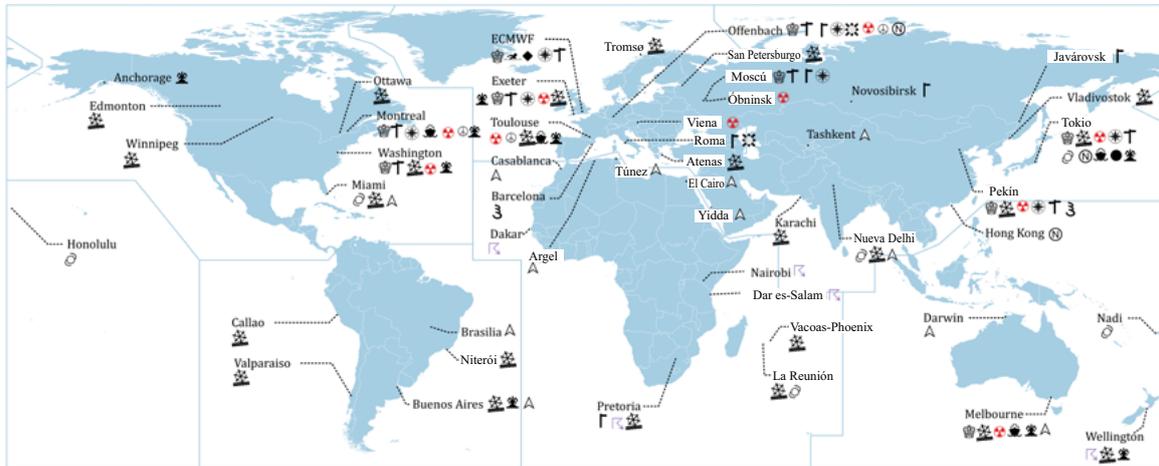
GDPFS

El **Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción (GDPFS) de la OMM** permite a todos los SMHN hacer uso de los avances en la predicción numérica del tiempo (PNT) al proporcionar un marco para compartir datos relacionados con la meteorología, la hidrología, la oceanografía y la climatología operativas. El GDPFS es un proceso en cascada que traslada la fuerza de la PNT de los Centros meteorológicos mundiales de la OMM (CMM) a los Centros meteorológicos regionales especializados (CMRE) y luego a los SMHN, de manera coordinada. Los CMRE permiten la prestación de servicios armonizados, abarcando los temas marinos y oceánicos. Más de 40 CMRE tienen la responsabilidad de respaldar los servicios relacionados con los océanos, incluidos los de meteorología marina, predicción de olas oceánicas, tiempo adverso y ciclones tropicales.

Como se mencionó anteriormente, siete de los nueve CMM designados tienen sistemas de predicción oceánica

Centros designados del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción de la OMM Predicción inmediata y meteorológica (hasta 30 días)

Actualizado el 19 de agosto de 2019



Leyenda

- ☉ Centros meteorológicos mundiales (CMM)* (9)
- △ Centros meteorológicos regionales especializados (CMRE) con especialización geográfica (12)
- ✈ CMRE*** principal en la coordinación de predicciones de olas (1)
- CMRE*** principal en la coordinación de la verificación de sistemas de predicción por conjuntos (1)
- ◆ CMRE*** principal en la coordinación de la verificación de predicciones numéricas del tiempo (PNT) deterministas (1)
- ⊙ CMRE de predicción numérica de olas oceánicas (4)
- ☉ CMRE de predicción de ciclones tropicales (6)
- ⚡ CMRE de predicción de fenómenos meteorológicos extremos (5)
- ⚓ CMRE de servicios meteorológicos marítimos (24)
- ⚓ CMRE de respuesta a emergencias nucleares** (10)
- ⊙ CMRE de respuesta a emergencias no nucleares** (3)
- ⚓ CMRE de predicción de tormentas de arena y polvo (2)
- ⊙ CMRE de predicción inmediata (3)
- ⚓ CMRE de PNT por conjuntos de área limitada (2)
- ⊙ CMRE de PNT por conjuntos mundial (7)
- ⚓ CMRE de PNT determinista de área limitada (6)
- ⚓ CMRE de PNT determinista mundial (6)
- ⚓ Centros de avisos de cenizas volcánicas designados por la Organización de Aviación Civil Internacional (9)

* Los CMM también son Centros mundiales de producción de: a) predicciones meteorológicas numéricas deterministas, b) predicciones meteorológicas numéricas por conjuntos, y c) predicciones a largo plazo.
 ** Los CMRE de respuesta a emergencias nucleares y no nucleares tienen capacidades en materia de modelización de transporte y dispersión en la atmósfera.

*** En tiempo casi real

DENOMINACIONES UTILIZADAS

La representación y el uso de fronteras, nombres geográficos y datos mostrados en mapas, listas, tablas, documentos y conjuntos de datos de este sitio web no se garantiza que estén libres de errores ni implican necesariamente su aprobación o aceptación por parte de la OMM.

Centros designados del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción de la OMM Predicción a largo plazo y climática (más 30 días)

Actualizado el 4 de julio de 2019



Leyenda

- ☉ Centros meteorológicos mundiales (CMM)* (9)
- ⊙ CMRE** principal en la coordinación de ADCP*** (1)
- ⊙ CMRE** principal en la coordinación de PLPMME**** (2)
- ⊙ CMRE** principal en la coordinación de la verificación de las predicciones a largo plazo (2)
- ⊙ Centro Regional sobre el Clima (CRC) – Nodos de las redes regionales de predicción y vigilancia del clima (11)
- ⊙ CRC de predicción y vigilancia regional del clima (9)
- ⊙ Centros mundiales de producción de ADCP*** (4)
- ⊙ Centros mundiales de producción de predicciones a largo plazo (13)

* Los CMM también son Centros mundiales de producción de: a) predicciones meteorológicas numéricas deterministas, b) predicciones meteorológicas numéricas por conjuntos, y c) predicciones a largo plazo.

** En tiempo casi real

*** ADCP significa Predicción Climática Anual a Decenal

**** PLPMME significa Predicción a Largo Plazo mediante Conjuntos Multimodelos

DENOMINACIONES UTILIZADAS

La representación y el uso de fronteras, nombres geográficos y datos mostrados en mapas, listas, tablas, documentos y conjuntos de datos de este sitio web no se garantiza que estén libres de errores ni implican necesariamente su aprobación o aceptación por parte de la OMM.

Centros del GDPFS responsables de la predicción meteorológica hasta 30 días (arriba) y de la predicción a largo plazo y climática (abajo).

incluidos en la iniciativa OceanPredict que se ejecutan en modos de predicción acoplados o desacoplados como parte de sus operaciones diarias. Incluir los sistemas de predicción oceánica dentro de este marco tiene muchas ventajas, entre ellas la integración de los avances científicos en las predicciones oceánicas y la aplicación de nuevos sistemas de observación (por ejemplo, el altímetro SWOT) en los sistemas operativos de predicción oceánica y ambiental.

Esta colaboración meteorológica y oceánica ya está en marcha —como lo pone de manifiesto la reciente reunión del ECMWF y OceanPredict sobre asimilación de datos, en mayo de 2021— y debe prosperar. Se prevé que, en el contexto del Decenio de las Naciones Unidas de las Ciencias Oceánicas para el Desarrollo Sostenible, se podrá establecer un marco para toda la cadena de valor oceanográfica operativa, similar al del GDPFS. Para el final del Decenio, se prevé una cadena de valor totalmente integrada para la predicción del medio marino (oceanografía y meteorología operativas), sin embargo, queda una pregunta abierta: ¿cómo debería construirse su componente oceánica? Las opciones son crear primero un marco de cadena de valor oceánico completo o bien incorporar las componentes oceánicas en los elementos existentes de la cadena de valor meteorológica elaborada por la OMM.

Para avanzar, es necesario fortalecer el vínculo entre la oceanografía y la meteorología operativas. Más específicamente, la cadena de valor completa en oceanografía operativa necesitará marcos nacionales e internacionales para ofrecer valor útil al usuario final. Ya existe una interacción significativa con los grupos de oceanografía de la OMM, como lo demuestra el uso del SMT para las observaciones oceánicas. Para progresar, si bien la mayoría de los centros de predicción meteorológica incluyen la predicción oceánica en sus actividades, será importante fortalecer la relación de la meteorología oceánica desde las observaciones hasta la predicción y los productos y servicios de uso final.

Asociaciones para el futuro

Tal y como se establece en el Plan Estratégico de la OMM para 2020-2023, la visión de la OMM es que “todas las

naciones del mundo, especialmente las más vulnerables, serán más resilientes a las consecuencias socioeconómicas de fenómenos extremos relacionados con el tiempo, el clima, el agua y otros fenómenos ambientales; y su desarrollo sostenible se sustentará en los mejores servicios disponibles, ya sea en tierra, mar o aire”. Para lograrlo, la OMM está adoptando un enfoque del sistema Tierra que permitirá el acceso y el uso de los análisis numéricos y de los productos de predicción del sistema Tierra, en todas las escalas temporales y espaciales del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción Sin Discontinuidad de la OMM.

Para mejorar continuamente los productos y servicios, todos los componentes fundamentales del sistema Tierra deben integrarse en sistemas de predicción y asimilación de datos sin discontinuidad, aprovechando el WIGOS, el WIS 2.0 y el GDPFS sin Discontinuidad de la OMM. Dentro de la comunidad de la OMM, la reforma de la Organización ha proporcionado el marco para lograr la integración de las disciplinas necesarias para lograr este objetivo y ofrece asimismo mecanismos para asociarse mejor con las organizaciones nacionales e internacionales, instituciones académicas y empresas del sector privado que resulte oportuno. Un solo organismo no puede lograr ese objetivo por sí solo, y la falta de recursos es tal que no será posible replicar la infraestructura existente. Además, el requerimiento de informática, almacenamiento y telecomunicaciones de altas prestaciones probablemente superará lo que las naciones por sí solas pueden permitirse.

Por tanto, las asociaciones públicas, académicas y privadas son fundamentales. Aprovechar la infraestructura mundial, regional y nacional existente permitirá que todas las comunidades se beneficien de la información disponible para suministrarla a sus sistemas de toma de decisiones. La OMM y sus asociados creen firmemente que juntos se conseguirá afrontar los grandes desafíos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad, como se subraya en los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, y se estará mejor preparado para encontrar soluciones para las generaciones venideras.

**Las referencias están disponibles
en la versión en línea**