

Asimilación de datos oceánicos en el sistema de predicción Mercator Ocean



**Por P. Bahurel, N. Ferry
y el equipo de asimilación de datos
de Mercator Ocean**

Introducción

Mercator Ocean ofrece cálculos de la circulación y de la termodinámica del océano a alta resolución, de escalas mundiales a regionales. Desde principios de 2001 este servicio operativo de oceanografía ha incrementado de manera continua su capacidad de predicción en el Atlántico Norte (desde enero de 2001), el Mar Mediterráneo (enero de 2003) y el Océano Mundial

(julio de 2003). Ya usan sus productos más de 150 usuarios con referencias de varias comunidades: organismos públicos como los Servicios Meteorológicos y agencias que se ocupan del océano y de su entorno, y también organismos privados que están vinculados de manera directa con clientes que trabajan en el medio marino.

Asignado por el programa de la Vigilancia Mundial para el Medio Ambiente y la Seguridad (GMES) (una iniciativa conjunta de la Comisión Europea y de la Agencia Espacial Europea) para desarrollar e integrar la capacidad europea de vigilancia y predicción del océano mundial, Mercator Ocean dará un paso importante a finales de 2005 al iniciar las observaciones en tiempo real de su nuevo sistema de 1/4° del océano mundial, la componente central de una capacidad europea integrada con componentes regionales. Como parte de esta misión, el centro operativo de Mercator Ocean también ofrecerá a socios y usuarios su experiencia de 10 años en desarrollos y usos en oceanografía operativa, manejando tres clases de componentes científicas que se perfeccionan con regularidad:

- Una serie de modelos de circulación general del océano (MCGO).
- El proceso en tiempo real de observaciones de teledetección e in situ.
- Técnicas de asimilación de datos.

Este artículo proporciona una visión de conjunto de estas componentes científicas desarrolladas y dirigidas en el centro de Mercator Ocean.

En este artículo nos centramos en una componente particular del sistema de análisis del océano, que es la asimilación de datos. La asimilación de datos constituye una técnica que combina, de manera óptima, las observaciones del océano con los resultados de simulaciones de modelos numéricos del océano para obtener un análisis óptimo del estado del mismo (es decir, campos tridimensionales de temperatura, salinidad y corrientes y elevación

de la superficie del mar). Existen varias técnicas y presentaremos algunas en los distintos sistemas de análisis de Mercator Ocean.

En primer lugar, se da una breve visión de conjunto de Mercator Ocean, seguida de una breve descripción de los modelos de circulación general del océano (MCGO) utilizados y de las observaciones disponibles para la asimilación de datos. La última sección está dedicada a la descripción de la asimilación de datos en los sistemas de Mercator Ocean.

Mercator Ocean: un centro operativo para la vigilancia y predicción de los océanos

Mercator Ocean es el centro operativo francés de vigilancia y predicción de los océanos. Su misión principal consiste en la simulación del océano mundial con modelos de alta resolución de ecuaciones primitivas, asimilando datos de satélites e in situ, para ofrecer predicciones retrospectivas y pronósticos y predicciones inmediatas en tiempo casi real de la circulación del océano mundial de manera operativa, es decir, información continua y bien evaluada del estado del océano a escalas de mundiales a regionales.

Creado con éxito en 1995 como un proyecto conjunto entre las seis agencias principales de Francia implicadas en la oceanografía¹, la actividad fue trasladada en 2002 a la empresa pública del consorcio Mercator Ocean para preparar el centro operativo, ahora completamente comprometido.

¹ A saber: el Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), el Centro Nacional de Investigación Científica (CNRS), el Instituto Francés de Investigación para la Explotación del Mar (IFREMER), el Instituto de Investigación para el Desarrollo (IRD), Météo-France, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Marina (SHOM), con el compromiso de sus subsidiarios CLS y CERFACS.

Mercator Ocean es miembro de Euro-SMOO, un actor clave del Experimento internacional Mundial de Asimilación de Datos Oceánicos (GODAE) y del proyecto europeo GMES de MERSEA de oceanografía operativa. Está implicado de manera activa en los proyectos de los Elementos de Servicio de la GMES de la ESA.

El sistema Mercator Ocean ofrece una representación completa en tres dimensiones de la dinámica y de la circulación termohalina del océano (temperatura, salinidad, corrientes, elevación de la superficie del mar, etc.), dando prioridad a las escalas de alta resolución (capaces de resolver los remolinos). La información está disponible en tiempo casi real y de manera rutinaria, mediante el suministro semanal de análisis en tiempo casi real y de predicciones a dos semanas; y en un modo de reanálisis, con asimilación de datos. Las salidas en tiempo real, al igual que los informes de validación, están disponibles en <http://www.mercator.eu.org>. Desde 2001, el equipo ha suministrado boletines oceánicos semanalmente sin ninguna interrupción del servicio a una amplia gama de usuarios, y ha sufrido tres importantes estrenos del sistema de predicción.

El sistema se ha mejorado de manera regular, ampliando la cobertura geográfica del océano regional al mundial, mejorando los modelos y los esquemas de asimilación, añadiendo nuevos datos y creando nuevos productos. La fase siguiente, traer la resolución de $1/4^\circ$ a escala mundial, es tanto un logro de esta inversión a varios años como el punto de partida del camino del océano mundial para resolver los remolinos.

Como parte de sus misiones nacional y europea, el centro de oceanografía operativa de Mercator Ocean tiene la tarea de desarrollar un nuevo "servicio central" oceánico, para atender a las siguientes necesidades de los usuarios finales:

- Aplicaciones operativas institucionales
- Investigación

- Aplicaciones operativas del sector privado
- Políticas medioambientales

La información genérica que se tiene que entregar a esta gran variedad de usuarios es múltiple: información (datos en tres dimensiones en tiempo real y operativos, simulaciones a largo plazo), herramientas (configuraciones del océano, herramientas de asimilación, etc.) y conocimientos técnicos (boletín del predictor, estudios de evaluación, etc.). Algunas componentes de este servicio de oceanografía operativa ya están instaladas y activas; otras están bajo desarrollo y se activarán de manera progresiva a través de colaboraciones estrechas con los usuarios. Sin embargo, ya existen las bases, gracias a una inversión plurianual y constante en investigación y desarrollo en modelización, manejo y asimilación de datos.

Modelos numéricos oceánicos y observaciones asimiladas

El sistema Mercator Ocean se basa en la jerarquía de prototipos y, en la actualidad, se están utilizando tres prototipos. Cada uno consta de un modelo oceánico, de los distintos conjuntos de datos que se asimilan y de un sistema de asimilación. Describimos a partir de aquí las dos primeras componentes de un prototipo, a saber, el modelo y las observaciones que se van a asimilar.

Modelos

El primer prototipo es una configuración de baja resolución ($\sim 2^\circ$) del océano mundial; el segundo abarca el Atlántico Norte y ecuatorial con una resolución media ($1/3^\circ$); y el tercero tiene alta resolución ($1/15^\circ$) en el Atlántico Norte

y en el Mar Mediterráneo. Pronto se logrará una mejora en la resolución para la configuración mundial, pasando de 2° a $1/4^\circ$. A finales de 2005, deberían funcionar de manera operativa cuatro prototipos de manera semanal, ofreciendo análisis y predicciones oceánicas mundiales a una resolución mesoescalar². La Figura 1 ilustra la cobertura espacial de estos modelos y las estructuras oceánicas típicas presentes en las salidas del modelo numérico.

Mercator Ocean utiliza el código oceánico de ecuaciones primitivas OPA-NEMO, desarrollado en el Laboratorio de Oceanografía Dinámica y Climatología de París [Madec y otros, 1998]. La idea básica de un modelo numérico oceánico es dividir el océano en cajas pequeñas en las que se considera que la temperatura y la salinidad son homogéneas. La evolución temporal de las propiedades de cada caja viene gobernada por las ecuaciones termodinámicas de Navier-Stokes. Estas ecuaciones describen cómo los campos de temperatura y de salinidad se modifican por las corrientes horizontales y verticales o por mezcla y viceversa. Estas ecuaciones describen también cómo el forzamiento superficial (en otras palabras, el viento, la lluvia, la radiación solar, las nubes, etc.) influye en las capas superiores del océano.

El forzamiento superficial consta de campos diarios de tensión del viento (es decir, la fricción del viento sobre la superficie del océano), evaporación, precipitación, flujos calóricos solares y no solares, suministrados por los análisis y predicciones del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (CEPMMP). El forzamiento superficial incluye un término retroactivo en el flujo calórico neto, basado en la diferencia entre la temperatura de la superficie del mar (TSM) del modelo y el producto de la TSM

² La mesoescala es la escala típica de los remolinos sinópticos más pequeños presentes en el océano. Esta escala depende de la latitud y para el océano es de varias decenas de kilómetros a latitudes medias, un valor unas cien veces menor que la escala atmosférica equivalente.



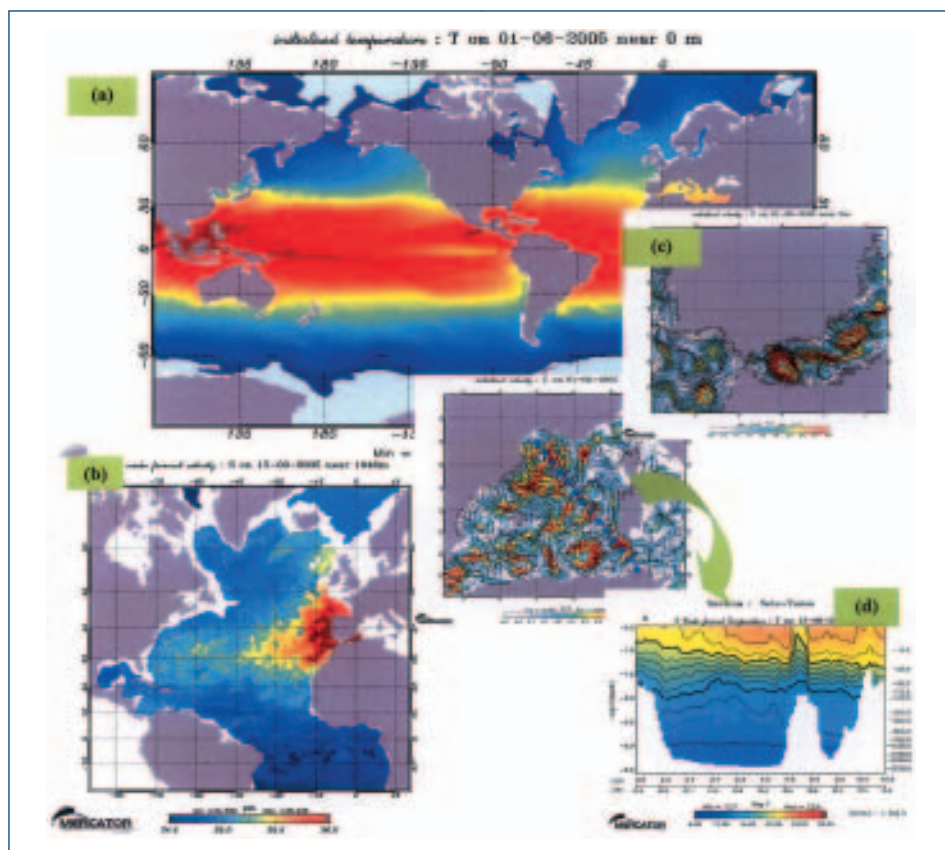


Figura 1 — Ejemplos de salidas del sistema Mercator Ocean. (a) Campo de temperaturas de la superficie del mar del océano mundial (modelo de $\sim 2^\circ$), análisis en tiempo real del 1 de junio de 2005, calculado el 1 de junio de 2005; (b) salinidad a 1 000 m de profundidad en el Atlántico Norte y tropical (modelo de $1/3^\circ$), predicción a dos semanas del 15 de junio de 2005, calculada el 1 de junio de 2005; (c) corrientes de superficie en el Estrecho de Gibraltar (modelo de 5-7 km, $\sim 1/15^\circ$) (obsérvese la presencia de remolinos); análisis en tiempo real del 1 de junio de 2005; (d) sección vertical de la temperatura en el Mar Mediterráneo (modelo de 5-7 km, $1/16^\circ$) entre Sète y Túnez (y mapa de la corriente superficial); predicción a dos semanas del 15 de junio de 2005, calculada el 1 de junio de 2005.

de Reynolds semanal, para describir el acoplamiento entre el océano y la atmósfera. Los principales flujos fluviales están representados por un aporte de agua dulce en la desembocadura del río dado por la base de datos climatológicos mensuales de la UNESCO [Vörösmarty, 1996]. También se añade un flujo de agua dulce a lo largo de la costa antártica para simular la fusión del hielo continental.

Dos configuraciones son configuraciones objetivo de Mercator Ocean para la fase intensiva del GODAE (2003-2005), para abarcar las cuencas del Atlántico

Norte y del Mar Mediterráneo con una resolución capaz de resolver remolinos³ y el océano mundial con una resolución que permita remolinos⁴:

- La primera configuración es una configuración de cuenca de alta resolución (de 5 a 7 km de resolución horizontal,

43 niveles verticales desde 6 m en la superficie a 200 m y 300 m en el fondo del Mar Mediterráneo y del Atlántico, respectivamente) que abarca el Atlántico Norte desde 9°N hasta 70°N y el Mar Mediterráneo. Esta configuración se centra en los procesos de mesoescala [Drillet y otros, 2004] y ofrece condiciones de contorno para la modelización costera de los mares europeos. La próxima versión del modelo de alta resolución del Atlántico diseñará el futuro modelo mundial de alta resolución ($1/12^\circ$) con una superficie libre, una coordenada parcial de paso vertical, el uso de un conjunto de fórmulas atmosféricas y un modelo de hielo marino.

- La segunda configuración abarca el océano mundial con una resolución media (resolución horizontal de $1/4^\circ$, 46 niveles verticales desde 6 m en la superficie hasta 250 m en el fondo). Pretende ofrecer los mejores cálculos del estado del océano para el análisis del océano mundial y condiciones de contorno para los modelos regionales de todo el mundo. Esta configuración utiliza la misma parametrización que el modelo de alta resolución descrito anteriormente.

Mercator Ocean también aplica dos configuraciones más pequeñas en tiempo real para demostrar y probar nuevos algoritmos:

- Una configuración de cuenca de resolución media desarrollada durante el proyecto Clipper (resolución horizontal de $1/3^\circ$, 43 niveles verticales desde 12 m en la superficie hasta 200 m en el fondo) que abarca el Atlántico Norte y tropical (Benkiran, 2004).

3 Capaz de resolver de remolinos: esto corresponde a la resolución horizontal de un MCGO capaz de reproducir con una buena precisión las estructuras finas de los remolinos oceánicos. De manera típica, esta escala es de aproximadamente $1/12^\circ$ (~ 7 kilómetros) en latitudes medias ($\sim 40^\circ\text{N/S}$).

4 Que permita remolinos: esto corresponde a la resolución horizontal de un MCGO capaz de reproducir algunas características de los remolinos oceánicos. De manera típica, esta escala es de aproximadamente $1/3^\circ$ (~ 30 kilómetros) en latitudes medias ($\sim 40^\circ\text{N/S}$).

- Una configuración mundial de baja resolución (resolución horizontal de $\sim 2^\circ$, 31 niveles verticales) que abarca el océano mundial (Ferry, 2004).

En la actualidad, las dos configuraciones de cuenca (resoluciones media y alta) y también la configuración del océano mundial de baja resolución están operativas, y el modelo de océano mundial de $1/4^\circ$ está en desarrollo. Este sistema estará operativo en los próximos meses.

Datos oceánicos

Mercator Ocean depende de los centros de recogida de datos existentes para recopilar, procesar y validar las observaciones que utiliza como entrada en tiempo real y en modo diferido. Los datos de entrada de Mercator Ocean incluyen observaciones in situ y también de teledetección. Merece la pena destacar que los datos oceánicos constituyen una componente clave de los sistemas de análisis del océano y se utilizan en varias aplicaciones: forzamiento, asimilación de datos y validación de modelos. Aquí nos centraremos en los datos empleados para la asimilación.

La Figura 2 muestra los distintos tipos de observaciones —in situ y de teledetección— utilizadas para la asimilación de datos en los sistemas de análisis y predicción del océano como los prototipos de Mercator Ocean. Las observaciones in situ constan de cuatro categorías de datos. En primer lugar, las boyas a la deriva (1) son capaces de suministrar parámetros de la superficie del mar como la temperatura y la velocidad horizontal. Siguen las corrientes oceánicas superficiales y transmiten sus mediciones a través del sistema de satélite de ARGOS.

Los dispositivos fijos (2) son instrumentos más sofisticados que miden varios parámetros (temperatura, salinidad, corriente horizontal, parámetros bioló-

gicos) a distintas profundidades de un lugar particular. Un buen ejemplo es el dispositivo de observación océano-atmósfera en los mares tropicales (TAO) que consta de más de 60 boyas fijas y que ofrece mediciones de alta precisión del Pacífico tropical, desde la superficie hasta 500 m de profundidad (véase <http://www.pmel.noaa.gov/tao/index.shtml>). Los perfiles verticales de temperatura y de salinidad también están disponibles a través de los cruceros oceanográficos (3) y de las mediciones realizadas por los batitermógrafos no recuperables (XBT) de los barcos de observación voluntaria.

Por último, hace poco apareció una nueva categoría de datos in situ: los perfiles de temperatura y de salinidad medidos por los flotadores perfiladores verticales de ARGO (4). Esta clase de flotadores toma muestras de parámetros internos del océano, conforme ascienden y descienden en el mismo.



Figura 2 — Distintos tipos de datos oceánicos asimilados: (1) Boyas a la deriva; (2) dispositivos fijos; (3) medidas de barcos; (4) flotadores perfiladores verticales de ARGO. Las observaciones de teledetección son suministradas a través de satélite (véase el texto para ampliar detalles).

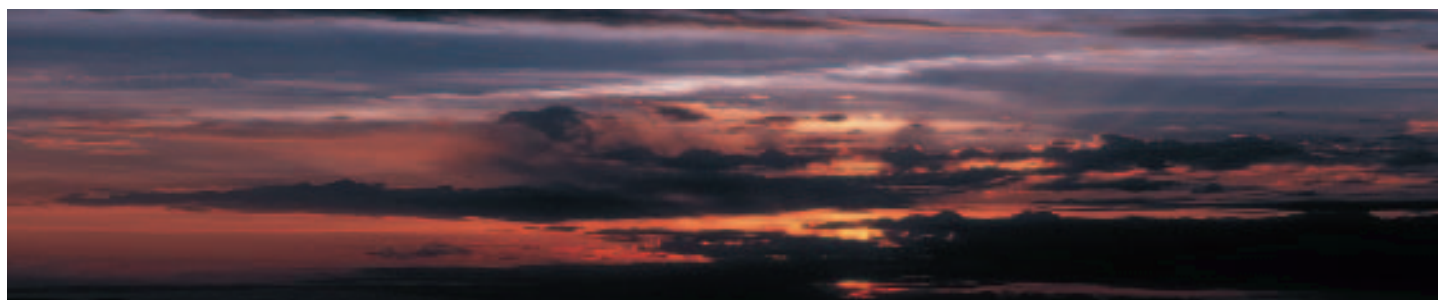
Las mediciones se transmiten a través del sistema de satélite de ARGOS cuando el flotador está en la superficie. En la actualidad están operativos en el océano más de 1 900 flotadores (véase <http://w3.jcommops.org/cgi-bin/WebObjects/Argo>) y unos 3 000 flotadores cubrirán el océano mundial a finales de 2007 (véase también la página 121).

La segunda componente importante de la red de observación del océano mundial son los datos de teledetección suministrados por los satélites. Ofrecen una gran variedad de medidas de superficie, tales como la temperatura de la superficie del mar, la anomalía del nivel del mar, el color del océano (es decir, una medida de la concentración de zooplancton en la superficie) y, en los próximos años, se espera que nuevos instrumentos puedan medir la salinidad de la superficie del mar desde el espacio.

Entre estas mediciones de satélite, son de especial interés las mediciones altimétricas (o de nivel del mar) que suministran TOPEX/Poseidón, Jason 1, ERS2, ENVISAT o GEOSAT Follow-On (GFO), ya que miden la elevación de la superficie del mar que es representativa tanto de la circulación en la superficie del océano como del contenido termohalino⁵ del mismo. La mayoría de los grandes avances de los sistemas de análisis y predicción operativa ha sido posible gracias a la disponibilidad de estos datos altimétricos.

Para ilustrar esto, la Figura 3 muestra una estimación de la técnica de asimilación del prototipo multivariante de $1/3^\circ$ del Atlántico Norte de Mercator Ocean al asimilar datos de TSM, de perfiles verticales de temperatura y de salinidad y de la anomalía del nivel del mar (ANA). Podemos ver que, cuando faltan datos altimétricos en julio (ERS2) y octubre (GFO) (Figura 3(a)), aumenta el error de predicción de la ANA en el

⁵ Contenido de calor y de sal del océano



Atlántico (Figura 3(b)). Esto significa que los datos altimétricos tienen un gran efecto sobre la técnica de predicción del océano y son cruciales para la asimilación de datos.

Como conclusión, es importante tener en cuenta que la disponibilidad de datos oceánicos resulta crucial para la asimilación. La calidad de los sistemas de análisis operativo del océano solo puede garantizarse si las actuales redes de observación se mantienen y amplían. El éxito de la continuidad del dispositivo ARGO y el lanzamiento de la misión del satélite altimétrico Jason-2 tendrán un gran efecto sobre la oceanografía operativa. También debería destacarse la naturaleza complementaria de los datos in situ y de teledetección: los flotadores ARGO suponen la única manera de acceder a escala mundial a las observaciones de subsuperficie, mientras que las mediciones de satélite ofrecen una visión sinóptica y mundial única de la superficie del océano a una resolución muy alta.

Asimilación de datos oceánicos

Un sistema de vigilancia y de predicción del océano se basa en dos componentes integrados: las observaciones (descritas en la sección anterior) de teledetección (p. ej., la TSM, los datos altimétricos) e in situ (p. ej., los perfiles de temperatura y de salinidad) y el modelo termodinámico del océano, que se combinan para dar la mejor descripción posible del océano real. La forma de combinar de manera óptima la información proporcionada por cada componente del sistema se denomina "asimilación de datos". Esta combinación óptima (es decir, la asimilación de datos) se logra aprovechando la información contenida en las observaciones del océano real y a partir de las restricciones impuestas por la física del modelo oceánico (es decir, las ecuaciones físicas que gobiernan el modelo oceánico). La asimilación de datos posibilita, por ejemplo, que

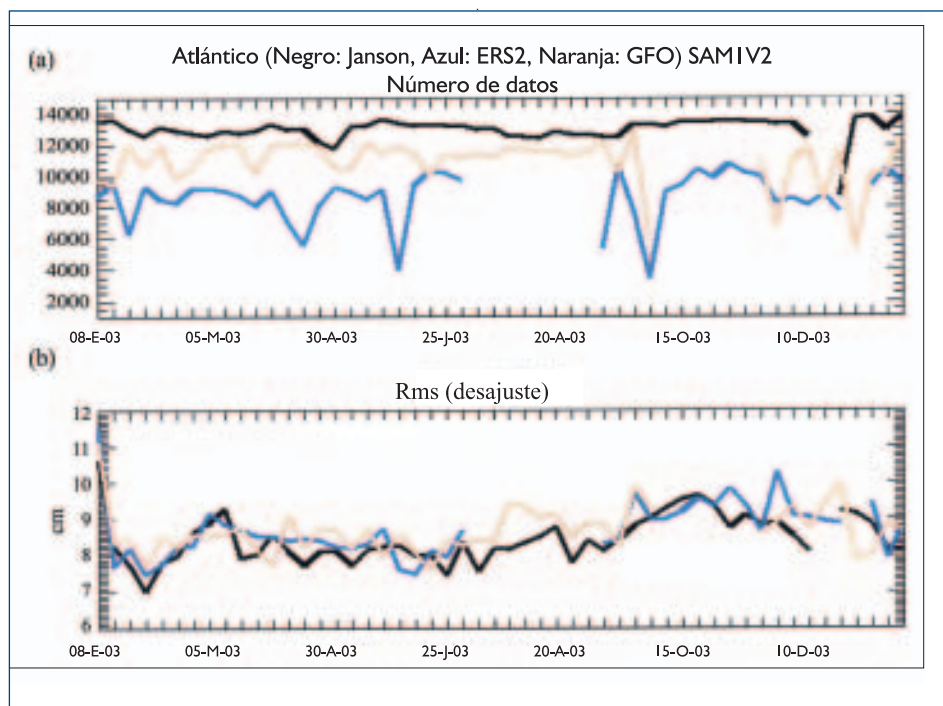


Figura 3 — Técnica de asimilación del prototipo multivariante de 1/3° del Atlántico Norte de Mercator Ocean en 2003: (a) número de datos altimétricos disponibles y (b) error de la predicción del modelo a siete días en la anomalía del nivel del mar (en cm).

los modelos oceánicos que permiten remolinos tengan estructuras mesoescalares que están en fase con lo que se puede observar. El resultado es una descripción del océano más próxima a la realidad.

Mercator Ocean está desarrollando un conjunto de herramientas de asimilación (llamado "SAM," por *Système d'Assimilation Mercator* [Sistema de Asimilación Mercator]) de complejidad cada vez mayor, que van desde métodos secuenciales a variacionales: la primera versión, SAM-1, se basa en la interpolación óptima; la segunda, SAM-2, tendrá en cuenta el método de análisis de filtrado de Kalman Evolutivo Ampliado Singular (SEEK); y la tercera, SAM-3, considerará métodos avanzados tales como el método variacional en cuatro dimensiones.

Desde principios de 2001 se ha venido utilizando SAM1 de forma operativa en tiempo real; SAM2 está en desarrollo y pronto se integrará en la cadena

operativa; y SAM3 se está estudiando científicamente.

Se considera la asimilación en cuestiones relativas a predicciones inmediatas y pronósticos rutinarios en tiempo casi real, pero también para productos de reanálisis a largo plazo (más de diez años).

SAM-1

La herramienta de asimilación SAM-1 se basa en un método de interpolación óptima de orden reducido. En los prototipos de Mercator Ocean se utilizan dos versiones distintas de asimilación de este sistema: las técnicas SAM-1v1 y SAM-1v2.

La versión 1 (SAM-1v1) se basa en el enfoque de ascenso y descenso de las isopícnas (superficies de densidad constante) y permite solo la asimilación de datos de ANA. La idea subyacente es analizar la diferencia entre el modelo

y el satélite a lo largo de la trayectoria de las anomalías del nivel del mar a lo largo de una semana y deducir cómo las superficies isopícnas tienen que desplazarse verticalmente para reducir la inadaptación de los datos del modelo. Esta técnica de asimilación de datos se basa en el hecho de que el nivel del mar está estrechamente relacionado con la profundidad de las isopícnas: cuanto más profundas son las isopícnas más alto es el nivel del mar. Conceptualmente, si asumimos que los cambios de densidad se deben solo a la temperatura, esto significa que el agua caliente (que es menos densa y ocupa más lugar que el agua fría) producirá ANA altas y a la inversa.

Para ilustrar esto, la Figura 4 representa el nivel del mar y también las isopícnas a lo largo del Pacífico ecuatorial antes y después de la asimilación de datos para el 22 de junio de 1993. Podemos ver que entre 180°W y 140°W, el efecto de la asimilación es desplazar las isopícnas hacia arriba (Figura 4(b)). En términos de temperatura, esto es equivalente a elevar la isoterma; en otras palabras, enfriar el agua a una profundidad fija. El efecto sobre el nivel del mar es claro: al decrecer el contenido en calor del océano, la elevación de la superficie disminuye (Figura 4(a)) y se aproxima más a las observaciones.

Aunque este método da resultados satisfactorios en latitudes medias, su principal desventaja es que no es posible ajustar los modelos oceánicos con otras observaciones, tales como la TSM o los perfiles in situ de la temperatura y la salinidad.

Esta limitación hizo que Mercator Ocean desarrollara técnicas de asimilación multivariante de datos múltiples que permiten la asimilación de perfiles in situ, de datos altimétricos y de TSM. Esta técnica de asimilación de datos se ha utilizado de manera operativa desde enero de 2004 en el sistema de análisis y predicción del océano capaz de resolver remolinos (1/3°) de Mercator del Atlántico Norte

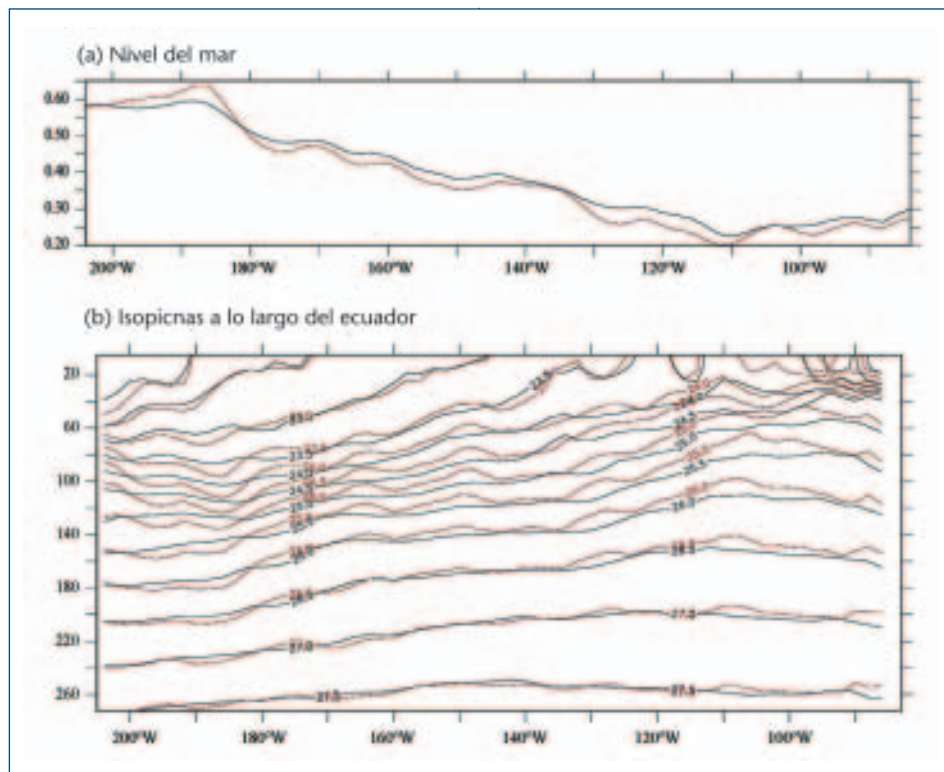


Figura 4 — Nivel del mar (a) e isopícnas como función de la profundidad (b) en el Ecuador en el Pacífico para el 23 de junio de 1993, simulados por el sistema de análisis del océano mundial con baja resolución de Mercator Ocean. El estado del modelo antes (después, respectivamente) de la asimilación se representa en líneas negras (rojas, respectivamente). El nivel del mar se expresa en metros, las isopícnas (densidad del agua menos 1 000) se expresan en kg/m³.

(http://bulletin.mercator-ocean.fr/html/produits/psy1v2/psy1v2_courant_en.jsp). Este sistema utiliza Funciones Empíricas Ortogonales (FEO) unidimensionales completamente multivariantes de los perfiles verticales de temperatura y de salinidad y una función barotrópica de corriente para llevar a cabo una interpolación óptima de orden reducido (Benkiran, 2004).

Este sistema de asimilación trabaja de la siguiente manera: en primer lugar, las diferencias entre la ANA observada y simulada, la TSM y los perfiles in situ de temperatura y de salinidad se calculan a lo largo de una integración del modelo de siete días. Después se analizan estas diferencias, llamadas innovación,

utilizando un método de interpolación óptima completamente multivariante. El estado del modelo se actualiza mediante la suma de la contribución de cada FEO elegida, correspondiente a la ganancia de Kalman multiplicada por la innovación. Este tipo de esquema se llama "multivariante": esto significa que una única observación modificará todas las variables del modelo oceánico (es decir, la temperatura, la salinidad y las corrientes) mediante estadísticos multivariantes (FEO).

La Figura 5 muestra un ejemplo de datos (datos de ANA, de perfiles de temperatura y de salinidad) asimilados en una ventana de asimilación de siete días y el estado del modelo resultante tras la asimilación. Se puede advertir la gran cobertura espacial de los datos altimétricos (se dispone de tres



satélites (Figura 5(a)) y la escasez relativa de datos in situ, sobre todo de perfiles de salinidad (Figura 5(c)). La línea continua de la Figura 5(b) corresponde a los perfiles de temperatura XBT recogidos a lo largo de las trayectorias de navegación. El campo de TSM analizado que integra la información proveniente tanto del modelo oceánico como de las observaciones se muestra en la Figura 5(d) y pone de manifiesto importantes estructuras mesoescalares.

SAM-2

La siguiente generación del sistema de asimilación multivariante, a la que llamamos SAM-2, se está desarrollando a partir de filtros de Kalman de orden reducido que utilizan la descomposición modal multivariante tridimensional (3D) de la covarianza del error de la predicción. El uso de la representación modal en tres dimensiones para los estadísticos del error pretende superar alguna de las limitaciones de SAM-1v2 en regiones muy inhomogéneas, anisótropas y no separables del océano mundial, tales como áreas profundas y también en la capa superficial.

Como ilustración, la Figura 6 muestra la función que representa la temperatura de la superficie del mar en dos regiones distintas: el Pacífico ecuatorial a 0°N, 140°W (sistema de baja resolución de Mercator) (Figura 6(a)) y las proximidades de la costa oriental de Florida, a 27°N, 80°W, en el Atlántico (modelo de 1/3°, Figura 6(b)). La función de representación revela cómo la TSM del modelo se modifica por la asimilación de una única observación de TSM 1°C más caliente que la TSM del modelo.

En la Figura 6(a), el efecto de esta observación virtual de la TSM se amplía hacia el este y hacia el oeste (unos $\pm 10^\circ$ de longitud) pero también $\sim 1^\circ$ de latitud hacia el norte y hacia el sur. De hecho, la forma de la función de representación es ligeramente anisótropa, una característica que

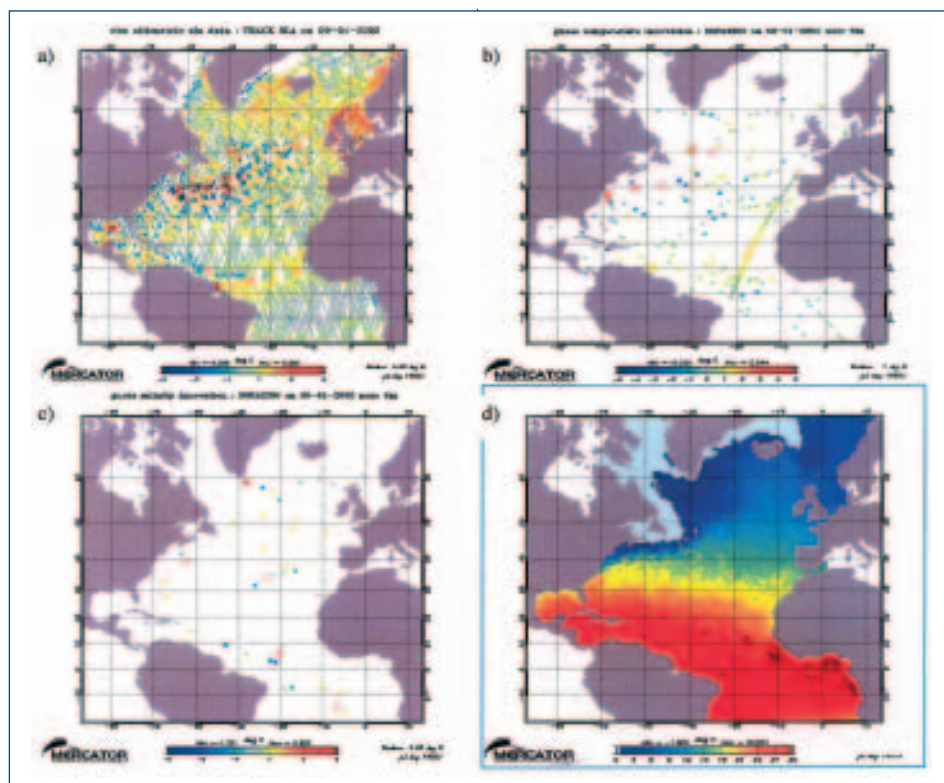


Figura 5 — Distintos tipos de datos asimilados para una semana particular y temperatura de la superficie del mar resultante analizada por el prototipo Mercator del Atlántico Norte (1/3°): (a) a lo largo de los datos de ANA en la trayectoria (Jason1, ERS2, GFO); (b) temperatura disponible; (c) perfiles verticales de salinidad; y (d) temperatura analizada de la superficie del mar.

solo puede representar la técnica multivariante tridimensional. En la Figura 6b, la función de representación muestra una estructura influida por la Corriente del Golfo que fluye hacia el este desde el Mar del Caribe y circula hacia el norte, siguiendo la costa americana. Los valores más altos de la función de representación están situados cerca de 27°N, 80°W con una estructura meridional. También pueden encontrarse valores superiores a 0,5°C al oeste de Florida, lo que puede indicar que los cambios de la TSM también pudieran deberse a los flujos de calor superficiales en esta zona concreta.

SAM-3

En Mercator Ocean también se estudian técnicas avanzadas de

asimilación de datos, tales como la aproximación variacional. La aproximación variacional (de tres o cuatro dimensiones) se basa en la minimización del error cuadrático de la observación del modelo a lo largo de un período de tiempo con sus errores a priori dados. La solución proporcionada es la trayectoria del modelo más cercana a las observaciones dinámicamente consistente con las ecuaciones del modelo. En un sistema de asimilación variacional de cuatro dimensiones, en un momento dado, la solución está forzada por las observaciones pasadas y futuras disponibles en la ventana de asimilación. Esta técnica se está desarrollando y se utilizará por primera vez con la configuración del océano mundial de baja resolución ($\sim 2^\circ$), para assimilar tanto datos in situ como altimétricos.

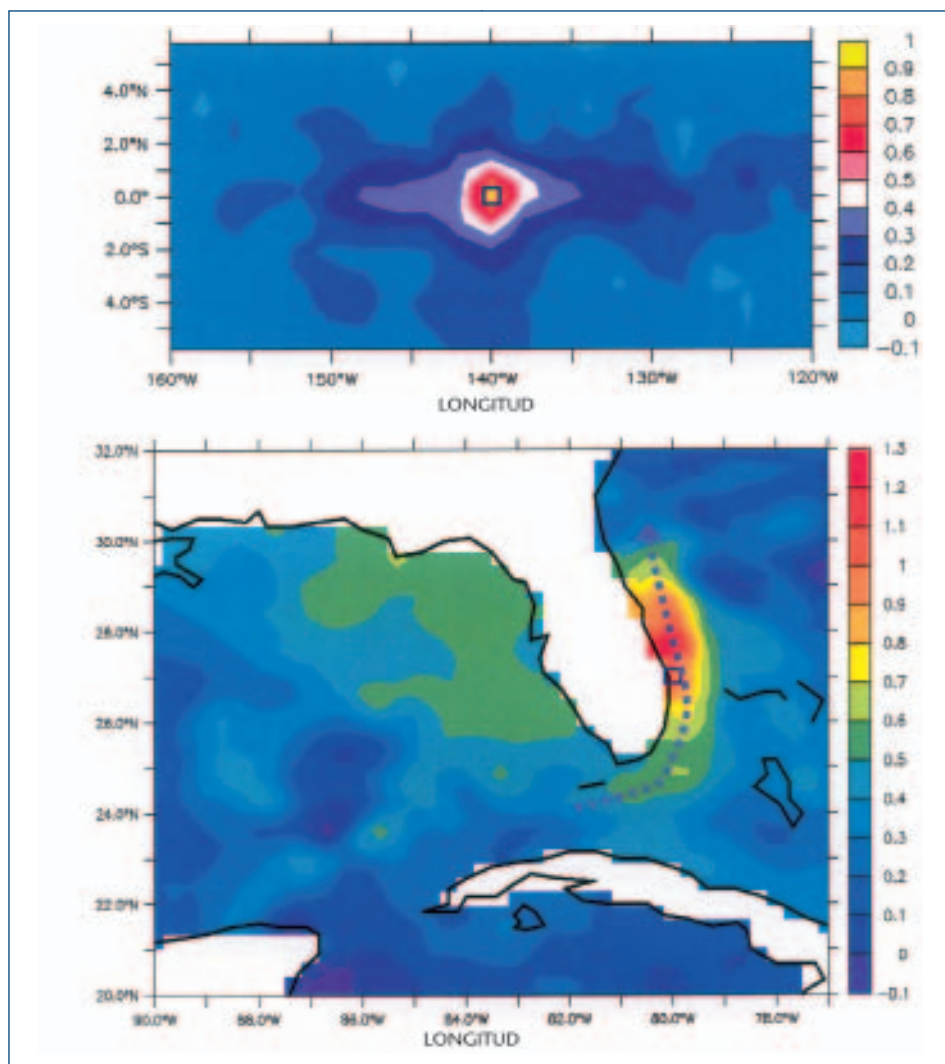


Figura 6 — Función de representación de una anomalía de observación de la temperatura de la superficie del mar de +1°C. Basada en estadísticos de modelos, la función de representación revela cómo el estado del modelo (en esta figura se muestra el campo de TSM) se modifica por una única observación de la TSM (°C). (a): La función de representación está relacionada con un punto de TSM situado a 0°N, 140°W (cuadrado azul), en el Pacífico. (b): La función de representación está relacionada con un punto de TSM situado a 27°N, 80°W (cuadrado azul), en el Atlántico. La flecha indica el recorrido de la Corriente del Golfo.

Conclusión

La asimilación de datos es una componente principal del sistema Mundial de Vigilancia y Predicción de Mercator Ocean. El equipo de Mercator Ocean ha desarrollado un conjunto completo de distintas herramientas de asimilación para fines operativos y de reanálisis y las ha validado en distintas configuraciones del océano. La técnica

de asimilación de interpolación óptima —en configuraciones de una sola variable y multivariantes— se ha aplicado con éxito en modo operativo de manera continua durante más de cuatro años y se están introduciendo de manera progresiva en la cadena operativa métodos de asimilación avanzada.

Esta experiencia plurianual sobre algoritmos operativos supone una contribución

clave a la misión europea de Mercator Ocean para la oceanografía operativa. Responsable del sistema del océano mundial, Mercator Ocean empezará a finales de 2005 las operaciones en tiempo real del sistema del océano mundial a 1/4°, y después mejorará de manera progresiva su servicio oceánico perfeccionando el esquema de asimilación (p. ej., para aplicaciones de predicción estacional) e incrementado la resolución para resolver remolinos (para aplicaciones operativas de mesoescala).

Agradecimientos

Muchas gracias al equipo del proyecto de Mercator Ocean por el trabajo presentado aquí, especialmente a B. Tranchant (de Cerfacs), a C. - E. Testut (de MGC) y a M. Benkiran (de CLS) por su contribución a este artículo.

Referencias

- BENKIRAN, M., 2004: Multivariate and multi-data assimilation in Mercator. *Mercator Newsletter* 13, 1-12. Disponible en http://www.mercator-ocean.fr/html/lettre/presentation_lettre_en.html.
- DRILLET, Y., R. BOURDALLE-BADIE, L. SIEFRIDT y C. LE PROVOST, 2005: The MED-DIES in the Mercator North Atlantic and Mediterranean Sea eddy-resolving model. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110, C03016, doi:10.1029/2003JC002170.
- FERRY, N., 2004: PSY2G: Moving towards global operational oceanography. *Mercator Newsletter* 13, 1-12. Disponible en http://www.mercator-ocean.fr/html/lettre/presentation_lettre_en.html.
- MADEC, G., P. DELECLUSE, M. IMBARD y C. LÉVY, 1998: OPA 8.1 *Ocean General Circulation Model Reference Manual*, Notes du pôle de modélisation IPSL, 91 pp.
- VÖRÖSMARTY, C. J., B. FEKETE y B. A. TUCKER, 1996: River discharge database, Version 1.0 (RivDIS v1.0), Vols. 0-6. A contribution to IHP-V, Theme 1, *Technical Documents in Hydrology Series*, UNESCO, París.