

EL EXPERIMENTO MUNDIAL DE LA CIRCULACION OCEANICA (WOCE)

Por R. Allyn CLARKE *

El papel de los océanos en el sistema climático

Más del 70 por ciento de la superficie de la Tierra la forman los océanos; por lo que una gran parte de la energía solar incidente se absorbe primeramente por la parte superior de los océanos y, a continuación, se transfiere a la atmósfera por radiación, conducción o evaporación. El agua posee una gran capacidad calorífica y, en consecuencia, permite almacenar grandes cantidades de calor en la parte superior del océano con sólo cambios moderados en la temperatura de la superficie del mar. De esta forma, los océanos actúan suavizando las fluctuaciones de temperatura en escalas cronológicas que varían entre el día y la estación.

El océano es algo más que un mecanismo de almacenamiento local de calor. Su circulación transporta calor y agua dulce desde los trópicos a latitudes más altas y desde una cuenca oceánica a otra. Se cree que transporta tanto o más calor meridionalmente, a través de la banda de latitud de 30° S a 40° N, que a la atmósfera.

El océano realiza estos transportes, mediante dos mecanismos; las circulaciones de vórtices a escala de cuencas oceánicas y el vuelco termohalino de gran escala del océano. Las circulaciones de vórtices vienen forzadas por el rotacional de la tensión del viento a gran escala que aparece por los cambios en velocidad y dirección del viento cuando se pasa de los alisios a los "oestes". Estos vórtices se caracterizan (en los subtrópicos) por un ancho flujo hacia el Ecuador en sus partes central y oriental y una intensa corriente de contorno hacia el polo a lo largo de su borde occidental. Las corrientes del Golfo y de Kuroshio son las corrientes de contorno occidentales de los vórtices subtropicales del Atlántico Norte y del Pacífico respectivamente. Las aguas que fluyen hacia el polo de las corrientes de contorno

occidentales son varios grados más cálidas que el ancho flujo hacia el Ecuador en el interior, creándose un transporte neto de calor hacia el polo.

La circulación termohalina consta de células de gran escala que voltean y que distribuyen las aguas intermedias y profundas de los océanos. Estas aguas se renuevan durante el invierno mediante procesos convectivos en un número limitado de pequeñas regiones en las latitudes altas. Puesto que el Atlántico es el más salino de todos los océanos y puesto que el agua marina se hace más densa cuando se enfría y aumenta la salinidad, las aguas profundas e intermedias del océano mundial se forman en gran medida en la parte septentrional del Atlántico Norte y en el sector Atlántico del océano Austral. Las profundas corrientes de contorno del oeste transportan estas aguas desde sus regiones de origen hasta el resto de los océanos del mundo. El análisis de las distribuciones de los radioisótopos de larga vida, tales como el carbono 14, indica que las aguas profundas emplean varios siglos para moverse desde las regiones de origen a las regiones situadas en el interior de la cuenca del Pacífico Norte. Las aguas intermedias que se encuentran a profundidades de 1 a 2 kilómetros tienen unas escalas cronológicas de algunos decenios en lugar de siglos.

Experimentos recientes con los modelos climáticos oceánicos han indicado que la circulación termohalina es bastante sensible a los flujos aire-mar en latitudes altas, especialmente el flujo de agua dulce en la parte septentrional del Atlántico Norte. La circulación termohalina en estos modelos puede hacerse colapsar en escalas cronológicas de decenios a siglos —escalas cronológicas que son concordantes con las de las propias circulaciones. Las evidencias paleoclimáticas muestran variaciones de

* Copresidente del Grupo director científico del WOCE, Ciencias Físicas y Químicas, Instituto Bedford de Oceanografía, Dartmouth, Canadá.

escalas cronológicas similares en las últimas decenas de miles de años.

Desarrollo de la oceanografía mundial.

La oceanografía mundial hasta el decenio de 1950 fue fundamentalmente exploratoria. Las expediciones nacionales fueron de gran escala hacia cuencas oceánicas particulares, durando varios años. Los oceanógrafos creían que las aguas profundas eran casi constantes en sus propiedades y que las corrientes profundas eran anchas y muy lentas. La circulación profunda a gran escala se infería a partir de combinaciones de datos de muchos años y de muchos buques y naciones diferentes.

Los oceanógrafos sabían que las aguas en los primeros 1-2 kilómetros poseían una variabilidad interanual y estacional considerable. Los científicos de las pesquerías habían estado haciendo observaciones periódicas de temperatura y salinidad en diferentes localizaciones en las costas o en sus proximidades desde finales del siglo XIX. Se formaron organizaciones para coordinar este trabajo en varias regiones al mismo tiempo y comenzó la ocupación anual o estacional de secciones hidrográficas en los Océanos Pacífico y Atlántico Norte. En el decenio de 1950 se estableció por parte de los organismos meteorológicos una red de buques meteorológicos oceánicos; se establecieron observaciones oceánicas regulares en algunos de los buques y los datos proporcionaron a los oceanógrafos algunas series capaces de describir ambos ciclos estacional e interanual en el océano abierto.

Los oceanógrafos sabían que la velocidad de sus buques de investigación limitaba su capacidad para realizar observaciones sinópticas de las características cambiantes del océano. El decenio de 1950 vio la organización de algunas operaciones con muchos buques, tales como la Operación Cabot en la Corriente del Golfo corriente abajo del Cabo Hatteras, el análisis del Atlántico en el IG y los análisis NORPAC del Pacífico Norte. Estos conjuntos de datos se utilizan todavía en los análisis y estudios modernos de la circulación regional.

Con el decenio de 1960 llegaron los instrumentos que podían permanecer en el océano durante períodos de meses; los instrumentos electrónicos que podían revelar la estructura vertical del océano a una escala

inferior al metro; los flotadores de flotabilidad neutra que podían mostrar la estructura del campo de corriente en el momento de la medida a profundidades abisales y las medidas de radiación desde satélites y aeronaves que revelaban una gran variabilidad a escalas de uno a varios cientos de kilómetros en períodos de días a meses. Aunque hubo algunos estudios a gran escala multiinstitucionales y con muchos buques, tales como la Expedición del Océano Índico, los oceanógrafos físicos comenzaron a centrarse en los detalles de la variabilidad oceánica a escalas espaciales desde 0,1 hasta 500 kilómetros y a escalas cronológicas desde horas hasta 100 días.

Al mismo tiempo, los geoquímicos aprendieron que los radioisótopos y los trazadores antropogénicos podían utilizarse para estimar cómo se mueven las aguas profundas en las cuencas oceánicas. En 1972 organizaron una gran expedición mundial, GEOSECS, que tomó muestras de las cuencas profundas de todos los océanos. Estos datos proporcionaron la primera estimación cuantitativa y uniforme de las edades de las diferentes aguas profundas de los océanos mundiales.

En el decenio de 1980, los oceanógrafos volvieron a los procesos oceánicos a gran escala. Los ordenadores alcanzaron tal tamaño y velocidad que parecía una posibilidad en un futuro cercano la modelización de una cuenca oceánica con resoluciones vertical y horizontal. El sistema ARGOS, la altimetría por satélite y la radiometría por satélite ofrecieron medios para medir por primera vez y mundialmente el océano. A los científicos se les preguntaba que evaluaran temas tales como el depósito de desechos radiactivos en el océano profundo o la predicción del cambio climático debido a cambios en las concentraciones de gases radiativamente activos.

Desarrollo del plan científico del WOCE

El Experimento mundial de circulación oceánica (WOCE) tuvo más de 10 años de planificación y está terminado actualmente el segundo año de su período intensivo de campo. A finales del decenio de 1970, la breve misión SEASAT había demostrado a la comunidad oceánica que un altímetro desde satélite podía medir cambios en la elevación de la superficie del mar, tanto mundial como sinópticamente. Esto significaba que por primera vez los

oceanógrafos podían tener el equivalente al campo de presión al nivel del mar de los meteorólogos a partir del cual podrían calcularse las corrientes de la superficie del océano.

El SEASAT también llevaba un "scatterómetro" que prometía una nueva cobertura mundial y precisión para los vientos y las tensiones superficiales. Las diferentes climatologías del campo de viento diferían notablemente las unas de las otras, incluso sobre el Atlántico Norte, donde se realiza un número relativamente grande de observaciones meteorológicas desde buques. Prácticamente no hay medidas *in situ* de los parámetros atmosféricos sobre los océanos más remotos durante los meses de invierno, que es cuando son mayores los intercambios aire-mar.

El plan científico de WOCE se desarrolló a fin de que, mediante la modelización y las observaciones *in situ* y los nuevos sistemas desde satélite, se pudiera obtener la primera estimación cuantitativa de la totalidad del campo de la circulación oceánica mundial. Se precisó de un período de planificación de un decenio antes de que estuviesen situados y fueran operativos los sistemas necesarios de observación *in situ* y desde satélite. A pesar de este largo período de gestación, la totalidad de los sistemas de observación no estará en su posición hasta el tercer año o después. Sin embargo, el programa de campo WOCE está en marcha y el WOCE ya ha cambiado la forma en la que muchos oceanógrafos trabajarán en el futuro.

Los objetivos del WOCE.

Objetivo 1 – Desarrollar modelos útiles para la predicción del cambio climático y recopilar los datos necesarios para evaluarlos.

Dentro del objetivo 1, los específicos son la determinación y la comprensión, desde una perspectiva mundial de los siguientes aspectos de la circulación oceánica mundial y su relación con el clima:

- Los flujos a gran escala de calor y de agua dulce, sus divergencias a lo largo de cinco años y su variabilidad anual e interanual;
- El balance dinámico de la circulación oceánica mundial y su respuesta al cambio en los flujos en la superficie;
- Las componentes de la variabilidad

oceánica desde meses a años, desde megámetros a la escala mundial, y las estadísticas de las escalas más pequeñas; y

- Las tasas y la naturaleza de la formación, ventilación y circulación de las masas de agua que influyen en el sistema climático en escalas cronológicas de 10 a 100 años.

Objetivo 2 - Determinar la representatividad de los conjuntos de datos específicos WOCE para el comportamiento a largo plazo de los océanos y para encontrar métodos para la determinación de los cambios a largo plazo de la circulación oceánica.

Dentro del objetivo 2, los objetivos específicos son:

- Determinar la representatividad de los conjuntos de datos específicos WOCE;
- Identificar aquellos parámetros, índices y campos oceanográficos que son esenciales para la continuación de las medidas en un sistema de observación climático en escalas cronológicas de decenios; y
- Desarrollar técnicas rentables adecuadas para su uso en un sistema continuo de observación climática.

Desarrollo de modelos

El Grupo de experimentación numérica (GEN) se estableció al principio en el ciclo de planificación del WOCE y ha servido como un mecanismo valioso para la coordinación y comunicación dentro de la creciente comunidad de modelización oceánica a gran escala. Durante el decenio de 1980 el GEN estimuló el desarrollo de los modelos de circulación oceánica capaces de resolver los vértices y las técnicas de asimilación de datos/inversión de datos. Más recientemente, se ha investigado la extensión de los modelos oceánicos operativos desde el océano superior tropical hasta latitudes más altas y a la totalidad de la profundidad oceánica. Esto se considera como un importante paso adelante hacia los modelos climáticos totalmente acoplados atmósfera-océano.

Desarrollo de modelos capaces de resolver los vórtices

Los grupos WOCE de modelización del Reino Unido, EE.UU. y Alemania han elaborado

modelos capaces de resolver los vórtices tanto del Océano Antártico (modelo antártico de alta resolución: FRAM) como del Atlántico Norte (modelo comunitario del Atlántico Norte). Los responsables de las observaciones están comenzando a considerar los productos que salen de estos modelos como parte de su diseño experimental y de su trabajo de análisis. El estrecho de Drake es uno de los pocos lugares del océano mundial en que se cree que ha sido bien medido el transporte oceánico. A partir de una larga fila de medidores de corriente se estima que el transporte en la corriente antártica circumpolar es de $150 \pm 10 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, mientras que el resultado del modelo FRAM era de $200 \cdot 10^6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Sin embargo, si las corrientes se miden con el modelo FRAM sólo en los lugares en los que hay medidores de corrientes, el transporte resultante está próximo a la estimación original a partir de las observaciones. Aunque se cree que el modelo FRAM no posee una resolución suficientemente fina para resolver completamente los vórtices más energéticos a esta latitud; sus resultados apuntan a la importancia de observar el océano con una resolución adecuada.

El modelo comunitario del Atlántico Norte fue utilizado con el fin de investigar el papel de los vórtices en la circulación oceánica. Utilizando la variabilidad del desplazamiento de la superficie del mar como una medida de la señal del vórtice, la energía de los vórtices del modelo decrece demasiado rápidamente a medida que se aleja hacia el este de la Corriente del Golfo y, excepto para la región ecuatorial, es demasiado pequeña en un factor de 2. Si se pasaba desde $1/3$ de grado a una resolución más fina se producía un fuerte aumento en la energía cinética de los vórtices atrapados en la superficie; esto sugiere que todavía no es suficiente la resolución para proporcionar una representación adecuada del campo de vórtices. Actualmente se están dirigiendo muchos esfuerzos hacia los efectos de la resolución vertical y horizontal, de la topografía del fondo y de los lapsos sobre la intensidad y la estructura de las circulaciones de rotación y de los vórtices.

Asimilación de datos

La oceanografía física clásica siempre ha estado limitada por la falta de medios para medir el campo de flujo barotrópico a gran

escala. Durante el decenio de 1980, se desarrollaron varias técnicas de inversión que estimaban la velocidad tridimensional que sería más concordante con la densidad, la temperatura, la salinidad y los campos de trazadores. Sin embargo, las respuestas que proporcionan estas técnicas están fuertemente influidas por las hipótesis en que se basa la primera estimación. Estas técnicas se han ampliado para incluir otra información tal como la tensión en la superficie, la elevación de la superficie del mar o los campos de velocidad del océano superior. Las medidas del WOCE de la elevación de la superficie del mar y de la velocidad lagrangiana en un nivel de referencia profundo deberían dar lugar a una mejora significativa en la precisión del campo inicial y, por tanto, del final invertido.

El programa de campo del WOCE

El programa de campo WOCE durará desde 1990 hasta 1997 y abarcará todo el océano mundial excepto algunos mares marginales y el Océano Artico. Se centra en mejorar nuestras estimaciones de: a) los flujos aire-mar; b) la circulación del océano superior; c) la circulación forzada por el viento, y d) el vuelco termohalino considerado en escala mundial.

Mientras que los campos de flujo aire-mar se han calculado a partir de datos de superficie climatológicos, se conoce poco sobre su precisión. El WOCE utilizará observaciones oceánicas para proporcionar límites de gran escala a dichas estimaciones. Por ejemplo, el transporte de la corriente de Florida es ampliamente concordante con las estimaciones de las distribuciones de tensión del viento sobre el rotor subtropical del Atlántico Norte. Varios modelos de predicción del tiempo a medio plazo han mejorado sus formulaciones de la capa límite atmosférica y están comenzando a asimilar datos de "scatterómetro" del ERS-1. Estos modelos deberían proporcionar nuevas estimaciones de la tensión del viento y de otros flujos en el marco cronológico del WOCE. Una red de secciones XBT permitirá el cálculo al menos con periodicidad bimensual del contenido en calor del océano superior en una escala desde 500 a 1000 km. sobre los océanos Pacífico y Atlántico norte y tropical. Los cambios en el contenido de calor de océano superior en períodos de meses se utilizarán para limitar las estimaciones de los flujos aire-mar producidos

por las diferentes técnicas y modelos de predicción.

El Programa de velocidad en superficie WOCE/TOGA está utilizando boyas a la deriva en la superficie para dibujar el campo lagrangiano de corriente en la superficie dependiente de la cronología en las principales cuencas oceánicas. Estas boyas a la deriva también informan de la temperatura de la superficie del mar (TSM) y se utilizan para calibrar los mapas de TSM obtenidos por satélites. Este programa está bastante adelantado en el Océano Pacífico y está comenzando a extenderse en el Atlántico. Los altímetros desde satélite (ERS-1 y TOPEX-Poseidón) dibujarán el campo de elevación de la superficie del mar en el mundo entre cada dos semanas y un mes. Una combinación de los datos de altímetro y de boyas permitirá trazar algunas de las características de mesoscala del campo de circulación oceánica superior a lo largo del período del WOCE. A partir del viento de la superficie, la velocidad lagrangiana de la superficie, las pendientes de la superficie del mar y la estratificación del océano superior del programa XBT, el WOCE permitirá una mejor comprensión del papel que juegan las corrientes ageostróficas en los transportes de masa, de calor y de agua dulce en el océano superior.

Se ha designado una parte principal del programa de campo para obtener una descripción mundial de la distribución tridimensional de un campo "promedio" de velocidad oceánica. Esta estimación se hará a partir de las secciones transversales hidrográficas en profundidad, de alta calidad, y capaces de resolver los vórtices y los rotores oceánicos en cada una de las grandes cuencas, tanto zonal como meridionalmente, la colocación mundial de flotadores en profundidad, las filas de medidores de corriente a través de todas las principales corrientes de contorno en el oeste y la cobertura mundial de altímetro desde satélite acoplados una dispersa red de medida de nivel del mar en islas. Las secciones hidrográficas de cada cuenca oceánica necesitan completarse en el más corto lapso cronológico posible –idealmente en períodos menores de cinco años– de forma que las variaciones a largo plazo en la estructura de la masa de agua no complique la interpretación dinámica de los datos. En las regiones en las que se sabe que la variabilidad estacional es grande,

se especifica la repetición de secciones en estaciones particulares. Los flotadores profundos proporcionarán una estimación de la velocidad lagrangiana a una profundidad de unos 1500 m. Promediados sobre cinco años y sobre escalas especiales de 500 km., esta velocidad debería tener una precisión de $0,01 \text{ ms}^{-1}$. Las filas de boyas fijas se dispondrán durante períodos de uno a dos años y se diseñarán para proporcionar estimaciones de los transportes medios de la corrientes de contorno con una precisión de aproximadamente el 10 por ciento. Estos datos proporcionarán una estimación mundial del transporte de calor del océano, que proporcionará otra limitación a los campos de flujo aire-mar calculados a partir de los datos meteorológicos de superficie. Se harán medidas en el Atlántico Norte con una resolución más fina espacial y cronológica, con la finalidad de aumentar la comprensión de cómo varía la circulación de los rotores en escalas cronológicas de algunos meses a dos años.

Se requieren medidas adicionales y técnicas de análisis para cuantificar la circulación termohalina más lenta. Se dispondrán filas de correntímetros para medir las corrientes profundas occidentales de contorno y los flujos a través de los pasos que conectan las diferentes cuencas profundas a lo largo del océano mundial. El estudio hidrográfico mundial también descubrirá la distribución de una variedad de trazadores químicos e isotópicos que, bien a causa de la historia de su liberación en el medio ambiente o por su desintegración radiactiva, proporcionan una información para datar en escalas cronológicas de años a siglos. Se realizarán estudios detallados en la Cuenca de Brasil del Atlántico Sur, a fin de obtener una mejor comprensión de los balances entre la advección y la mezcla en las circulaciones profundas. Se realizarán repetidas medidas hidrográficas y de trazadores en las regiones en las que las aguas profundas se renuevan durante el invierno; estas medidas documentarán los cambios en las propiedades de estas masas de agua a lo largo del período del WOCE.

El programa de campo del WOCE recopilará un volumen de datos sin precedentes. Solamente en el programa hidrográfico, el WOCE requiere un período de 25 años de un barco de investigación para

observar más de 23.000 estaciones hidrográficas y trazadores. El mayor programa internacional anterior al WOCE –el Año Geofísico Internacional (AGI)– recopiló 3.444 estaciones hidrográficas. Análogamente, el WOCE representa un aumento en el número de perfiles XBT, boyas a la deriva superficiales y flotadores de profundidad. A fin de que el WOCE tenga éxito, la comunidad oceanográfica necesitará mejorar muchísimo su capacidad para procesar, intercambiar y analizar sus conjuntos de datos. Aunque el WOCE está utilizando los mecanismos de intercambio de datos internacionalmente establecidos, también ha establecido centros y unidades de datos que son responsables de la vigilancia e información del flujo de datos entre los buques e instrumentos y los productos requeridos por los modelizadores oceánicos y otros científicos del océano.

Lo que ya se ha conseguido en el programa de campo del WOCE.

Una gran parte de las aguas profundas del Atlántico Norte, y por lo tanto, del océano mundial, se producen en invierno en los mares Nórdicos al norte de Islandia y las Faroes. Estas aguas entran en el Atlántico Norte rebosando el umbral poco profundo del Estrecho de Dinamarca y el Canal Faroe-Shetland. Durante la planificación del WOCE se pensó que los transportes así como las propiedades del agua en estos flujos deberían medirse continuamente a lo largo de todo el experimento. Se instalaron filas de correntímetros en tres años sucesivos por el Fisheries Laboratory, Lowestoft, Reino Unido, y mostraron que el transporte era notablemente constante durante períodos mayores de 20 días. Sobre esta base, se decidió no continuar esta fila e instalarlos de nuevo en el Océano Austral.

La sección hidrográfica desde Labrador a Groenlandia y hasta Irlanda se ha ocupado de una a tres veces cada año desde 1990. Estas secciones repetidas son una muestra de la mayor parte de las aguas profundas e intermedias de la parte principal del Atlántico Norte. Estas aguas aparecen menos salinas y más frías que lo que se había observado anteriormente. La serie final de siete años presentará un desafío a los modelos del Océano Atlántico destinados a explorar la variabilidad climática.

El trabajo en la Cuenca de Brasil del oeste del Atlántico Sur está casi completo. Se está

utilizando un gran número de correntímetros anclados, flotadores a diferentes niveles de profundidad y una detallada hidrografía para obtener una mejor descripción y comprensión de la circulación de las aguas profundas. Estudiando cuidadosamente a los flujos que entran y salen de la Cuenca de Brasil los oceanógrafos pueden hacer estimaciones cuantitativas tanto de la mezcla como de la advección, que pueden usarse a continuación para mejorar los componentes de la circulación profunda de los modelos oceánicos.

El principal esfuerzo del WOCE se dirige actualmente hacia el mayor océano, el Pacífico. La anchura de este océano presenta un verdadero desafío. La mayoría de las embarcaciones oceanográficas no pueden transportar suficiente combustible, agua o alimentos para permanecer en el mar los 60-120 días que se requieren para completar toda una sección de costa a costa según las especificaciones del WOCE. El buque ruso, *Ioffe*, con una tripulación científica conjunta rusa y de los EE.UU., acaba de completar con éxito una sección en las latitudes entre 65 y 67° S. desde el Estrecho de Drake hasta el sur de Nueva Zelanda. A finales de 1992 se habrán completado la mayor parte de las secciones meridionales largas en el Pacífico central y oriental por buques de EE.UU. y una fila de flotadores exploradores de circulación lagrangiana autónomos (ALACE) describirán el campo de flujo a 1.000 m. Japón y China continúan ocupando varias secciones repetidas zonales y meridianas en el oeste del Pacífico Norte, se han establecido a lo largo del océano algunas secciones XBT capaces de resolver los vórtices, las boyas a la deriva en superficie y las observaciones XBT de baja densidad están bien distribuidas a lo largo del Pacífico norte y ecuatorial.

Experimentos oceánicos mundiales en el siglo próximo

La oceanografía a gran escala será solamente posible cuando puedan en gran medida sustituirse los análisis tradicionales utilizando buques oceanográficos con paquetes de instrumentos autónomos y basados en la teledetección. El flotador ALACE, desarrollado y comprobado durante el WOCE, será una contribución importante a este fin. Equipado con sensores de salinidad y de temperatura, un flotador ALACE no sólo registra la velocidad lagrangiana en algunos niveles de alguna

profundidad, sino que también proporciona hasta 75 perfiles de salinidad y de temperatura desde dichos niveles hasta la superficie, en el curso de uno a cinco años. Actualmente, se requerirán un período de tres a cuatro días de un buque oceanográfico más el lapso de travesía para obtener un conjunto de datos similar.

La otra contribución principal de WOCE dirigida a los experimentos futuros será la integración de datos y modelos para proporcionar campos mundiales uniformes relacionados con los flujos aire/mar, el contenido de calor oceánico y el campo de circulación del océano a gran escala. El WOCE y el TOGA deberían dejar tras de sí en funcionamiento un sistema de recopilación de datos y de análisis de los flujos aire/mar (modelos de predicción, "scatterómetros", mejores datos VOS, meteorología de superficie

a partir de instrumentos autónomos remotos), campos de temperatura del océano superior (modelos operativos, XBT, XCTD, instrumentos autónomos) y el nivel del mar (altimetría por satélite y la red convencional).

Los componentes de la circulación termohalina oceánica exhiben una gran variabilidad entre los períodos de varios años a varias décadas. Las mejores indicaciones consisten en que esta variabilidad está relacionada con los cambios en los transportes de agua dulce. El WOCE está centrado en un período cronológico demasiado corto y se carece de una instrumentación adecuada de la salinidad para explorar una gran parte de esta variabilidad. Es evidente que se necesitarán programas climáticos para continuar el examen de la circulación oceánica en los decenios venideros.

ESTUDIO DEL SISTEMA CLIMATICO

ARTICO - ACSyS

Por E. AUGSTEIN*

Objetivos científicos

Datos de la era paleolítica, simulaciones con modelos numéricos y razonamiento físico indican que los cambios mundiales del clima están originados por interacciones naturales complejas entre la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera, además de los cambios inducidos por las variaciones de mecanismos de forzamiento externos. El acoplamiento dinámico y termodinámico entre las tres componentes principales del sistema climático no se comprende satisfactoriamente todavía, en particular porque los procesos que lo regulan actúan en un extenso intervalo de escalas cronológicas que varían en la atmósfera desde algunos días hasta meses, décadas e incluso siglos en las componentes lentas oceánicas y criosféricas del sistema climático. Mientras los

efectos radiativos de la nieve y el hielo polar se han puesto de manifiesto en estudios previos, considerando modelos climáticos de equilibrio energético (Sellers, 1969; Budyko, 1969), el fuerte impacto de las regiones polares en la circulación termohalina oceánica mundial se ha reconocido más recientemente (p.e. Bryan, 1986; Manabe y Stouffer, 1988; y Maier-Reimer y Mikolajewics, 1989), particularmente como resultado de simulaciones de cambios climáticos con modelos acoplados océano-atmósfera. Estas simulaciones sugieren una coincidencia con las deducciones de Broecker y otros (1985) a partir de datos del interior de masas de hielo de que los cambios en el equilibrio del agua dulce de la capa superior del Atlántico Norte pueden alterar drásticamente la circulación profunda del océano mundial.

* Subdirector del Instituto Alfred Wegener para la investigación Marítima y Polar, Bremerhaven, Alemania, y presidente del Comité científico mixto del Programa mundial de investigaciones climáticas