

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 mundial 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 exhibe 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 lentes 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 Broeker 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

Un hecho importante relacionado con estas variaciones de densidad fue la espectacular anomalía de salinidad observada por Dickson y otros (1988) durante el período comprendido entre 1968-1982 en la zona norte de la cuenca atlántica donde tiene lugar una convección oceánica profunda. Este hecho pudo haber sido causado por una gran anomalía local en el intercambio aire-agua del mar o por un cambio en la advección de hielo marino y agua dulce desde el Ártico. Una representación esquemática de los mecanismos pertinentes aparece en la figura 1. Ninguno de estos procesos se puede tratar aisladamente, ya que son elementos de un complejo sistema acoplado atmósfera-océano-criosfera que afecta a la totalidad de la región Ártica. El estudio del Sistema Climático Ártico (ACSyS) se ocupará, en principio, de los mecanismos físicos del océano Ártico y mares adyacentes, procesos del hielo marino, interacciones con la atmósfera, hidrología de la región Ártica y el balance de la masa de la capa de hielo de Groenlandia. Si se presenta la oportunidad pueden emprenderse estudios de los efectos biológicos y químicos en cooperación con los subprogramas pertinentes comprendidos en el Programa Internacional Geosfera-Biosfera.

Solamente la investigación del sistema

físico, incluyendo el trabajo de campo y experimentos con modelos numérico, es ya una enorme tarea, considerando la multiplicidad de procesos no lineales que interaccionan representados en la figura 2. Se espera que el ACSyS amplíe nuestro conocimiento de los siguientes temas:

- la circulación y estructura termohalina del Océano Ártico;
- procesos en estuarios y plataformas que determinen la interacción entre los régimenes de cuencas de aguas profundas o someras;
- el intercambio de agua dulce entre el Océano Ártico y los mares adyacentes.
- convención en las zonas profundas del Océano y modificación de la masa de agua en el mar de Groenlandia;
- flujo de calor, radiación y agua a través de la cubierta de hielo;
- desarrollo, estructura y advección del hielo marino en las diversas regiones del océano Ártico;
- hidrología terrestre y cuencas de captación de los ríos Árticos;

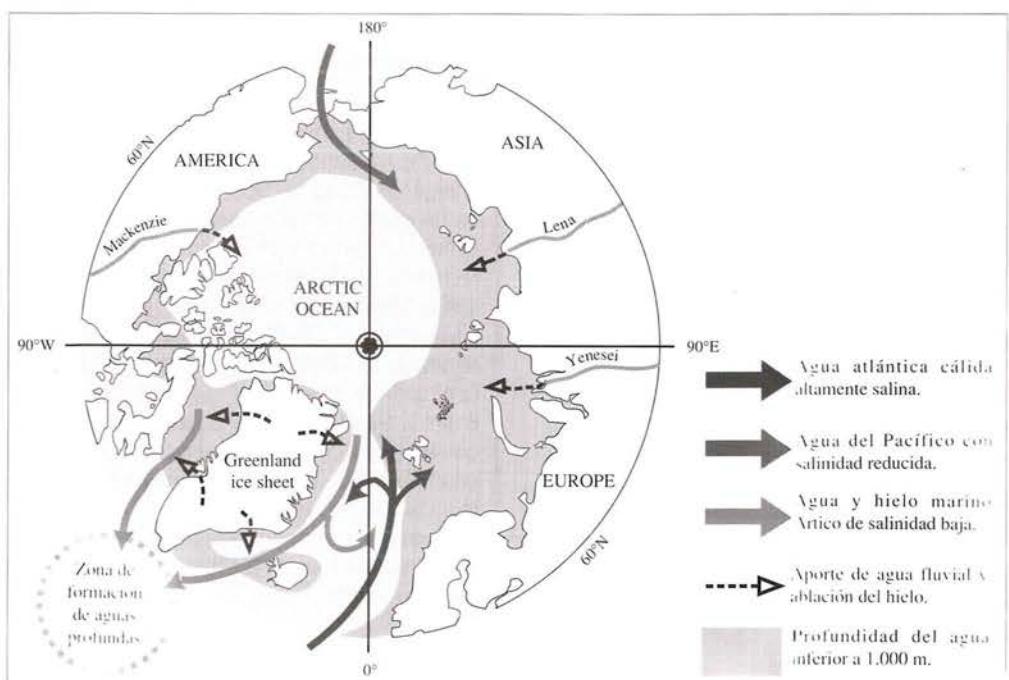


Figura 1. Procesos de transporte en el régimen del norte polar

- equilibrio de la masa de la capa de hielo de Groenlandia;
- nubosidad y radiación en la troposfera Ártica; y
- procesos atmosféricos y oceánicos en la capa límite y sus efectos en el hielo marino.

Algunos de estos temas científicos han sido estudiados en el pasado mientras que otros han recibido solamente alguna pequeña atención. Muchas investigaciones previas son incompletas desde el punto de vista de la investigación climática porque sólo han considerado algunos de los procesos pertinentes que interaccionan en el sistema total. El ACSyS tiene el propósito específico de producir una síntesis completa del trabajo de campo y estudios realizados con modelos, para proporcionar una base firme de una evaluación cualitativa y cuantitativa del impacto de la región Ártica en el clima mundial.

Obviamente, el papel central en el sistema climático del Ártico lo juega el Océano Ártico el cual, en sí mismo, parece ser sensible a muchos mecanismos perturbadores. Los cambios que

ocurren en la región se transmiten muy eficazmente a otras partes del mundo por medio de enlaces oceánicos, criosféricos y atmosféricos. La afluencia de agua dulce de los ríos de Siberia y de América hacia el Océano Ártico, la formación anual y la fusión del hielo marino, el drenaje de agua altamente salina desde las aguas marinas someras hacia las cuencas profundas, el transporte de hielo marino hacia el mar de Groenlandia y el aporte de sal desde este mismo mar, todo ello contribuye a mantener una estructura del Océano Ártico fuertemente estratificada (fig. 2). El régimen estable a profundidades de entre 50 m a 150 m impide la mezcla vertical entre las aguas profundas y someras de la columna de agua (Wallace y otros, 1987). Cualquier cambio que altere la distribución vertical de la temperatura o la salinidad afectará a los flujos de la superficie, la capa de hielo y la circulación en la totalidad de la cuenca del Océano Ártico (Aagaard y Carmack, 1989). A su vez esto hará cambiar:

- el flujo de agua dulce y hielo marino desde el Océano Ártico Central hacia el Atlántico Norte;

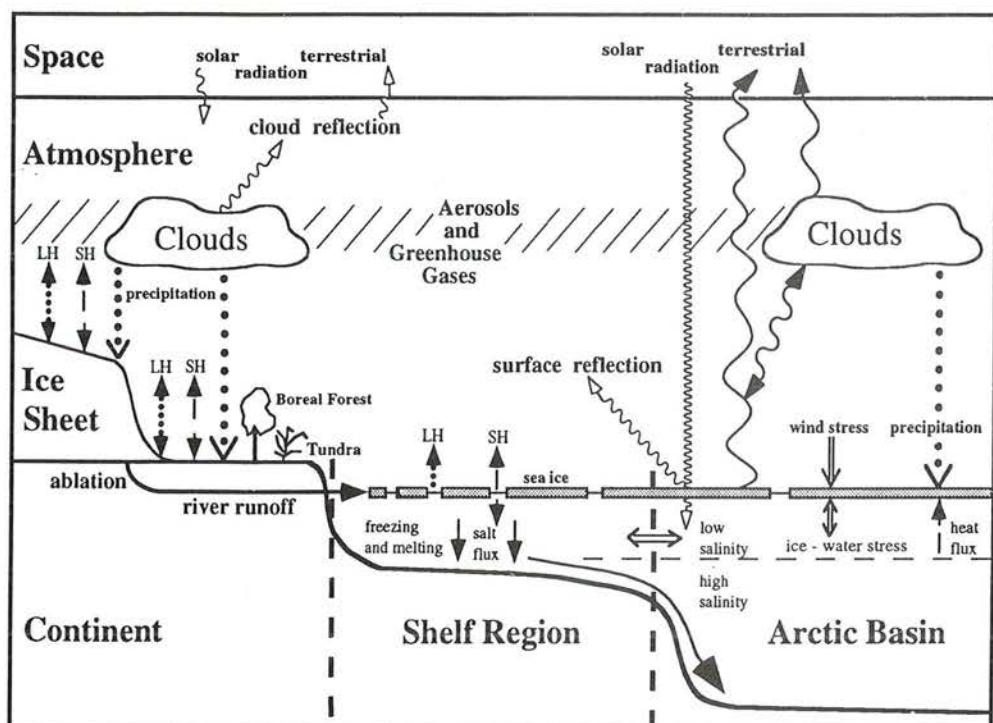


Figura 2 – Esquema de los principales procesos físicos del sistema del clima Ártico. SH = flujo de calor sensible. LH = flujo de calor latente en el límite inferior de la atmósfera

- el equilibrio radiativo del Ártico;
- el intercambio atmósfera-océano de calor, agua y dióxido de carbono.

Los cambios asociados al régimen de circulación atmosférica afectarán a la precipitación sobre el terreno, a la escorrentía y al equilibrio de la masa de la capa de hielo de Groenlandia. Las variaciones en la masa de hielo sobre la tierra resultan en cambios de nivel del mar a escala mundial lo que afectará a las condiciones de vida en las zonas costeras poco elevadas. Finalmente, los cambios en la transferencia radiativa pueden causar efectos atmosféricos climatológicamente importantes por medio de alteraciones en la nubosidad, concentración de gases que intervienen en el efecto invernadero y la distribución de aerosoles o calima ártica (Roeckner y otros, 1987, Washington y Meehl, 1989).

El Grupo director científico del ACSyS está elaborando los programas de observaciones de campo y de modelos numéricos necesarios para predecir el papel que la región Ártica juega en el clima mundial y para detectar cambios a largo plazo del Océano Ártico, la atmósfera y el hielo.

En principio, la región Antártica tiene una importancia similar al Ártico en cuanto al clima mundial. Dentro del marco del Experimento Mundial de la Circulación Oceánica se han investigado ya un conjunto de procesos Antárticos pertinentes con el cambio climático incluyendo formación de agua del fondo Antártico, desarrollo mar-hielo, interacciones aire-mar y la circulación del Océano Meridional. Por esta razón el Comité científico mixto del Programa Mundial de investigaciones climáticas (PMIC) ha dado prioridad a la región polar Ártica para un nuevo programa de investigación climática coordinado internacionalmente dentro del marco del PMIC.

Situación actual de los estudios científicos del Ártico

Estudios de campo

Durante la segunda mitad del siglo pasado varias naciones iniciaron ya observaciones científicas de las tierras Árticas y de su Océano. Las medidas oceánicas las realizaron predominantemente los países limítrofes con intensidad creciente durante los últimos 50 años. La URSS inició un notable progreso con un programa de estaciones meteorológicas a la

deriva (1953-1965) intensificado más tarde por el proyecto de USA Datos de boyas del Ártico, desde 1979 (Untersteiner y Thorndike, 1982). Este último ha sido recientemente ampliado para convertirse en el Programa internacional de boyas árticas, organizado con la colaboración del Servicio canadiense de medio ambiente atmosférico.

Casi al mismo tiempo comenzaron las observaciones sistemáticas por medio de satélites de la extensión y concentración del hielo marino usando radiometría pasiva de microondas. Se ha trabajado mucho para mejorar los sensores de los satélites y el análisis de las señales. Los modernos radares de apertura sintética a bordo de los satélites europeos y japoneses de observación de la Tierra obtienen imágenes de la cubierta de hielo de muy alta resolución que permiten identificar témpanos individuales y calcular su desplazamiento por medio de fotografías consecutivas. Además se obtiene, con más o menos regularidad, información de la nubosidad, así como del hielo marino y de la cubierta de nieve sobre tierra, a partir de las medidas en los canales visible e infrarrojo de los satélites.

Además de información de concentración, tamaño y edad de los témpanos, al objeto de estimar el equilibrio de la masa de hielo marino. El desarrollo e instalación de sonares anclados con sus sensores orientados hacia el fondo, ha constituido un gran avance en la medida directa del espesor del hielo. Hay varios puntos en el mar de Groenlandia y en el Océano Ártico donde están instalados estos instrumentos para obtener series de medidas de las variaciones estacionales del espesor de hielo marino. Se han obtenido medidas esporádicas más detalladas de la morfología del hielo superficial y de la capa límite inferior mediante aeronaves y submarinos, respectivamente (Comiso, y otros 1991).

Para medir los flujos turbulentos del calor, vapor de agua y cantidad de movimiento, así como los flujos radiativos de ondas largas y cortas se han utilizado, con éxito, en la región de hielo marino del Ártico, aeronaves equipadas con sensores radiativos y medidores de rachas. Simultáneamente se obtuvo información suplementaria de la superficie usando medidores de radiación y cámaras de alta resolución de antena giratoria instalados en aeronaves y en boyas automáticas en la superficie (Hartmann y otros, 1992).

También se han mantenido durante largos períodos en la zona cubierta de hielo del Océano Ártico y mares adyacentes plataformas ancladas equipadas con medidores de corriente, temperatura y últimamente también son sensores de salinidad (conductividad).

La disponibilidad de los nuevos buques rompehielos de investigación ha sido de la máxima importancia, ya que son capaces de penetrar en la región interior del Océano Ártico. En 1991 el barco sueco *RV Oden* y el alemán *RV Polarstern* tuvieron éxito en conseguir secciones hidrográficas desde Spitzbergen hasta el Polo Norte. Los rompehielos de Canadá, Rusia y EE.UU. que están disponibles en la actualidad podrían también colaborar en la investigación polar en el futuro próximo.

En el pasado se han realizado varios estudios del balance hídrico de zonas del Ártico continental, pero persisten aún muchas incertidumbres (Ivanov, 1976). ACSyS va a solicitar esfuerzos adicionales para mejorar la red de medidas de la precipitación y parámetros hidrológicos en los continentes Americano y Euroasiático. Además pueden obtenerse observaciones más precisas y completas de las condiciones térmicas y dinámicas junto con datos del balance de masa a fin de determinar las interacciones con las componentes del sistema climático. En la actualidad se están realizando investigaciones por parte de Europa y América del casquete glacial de Groenlandia que contribuirán a los objetivos de ACSyS.

Estudios con modelos

Las simulaciones actuales con modelos oceánico mundiales introducen términos correctores importantes establecidos en un límite septentrional arbitrario fijado en 60° o 65° N (Bryan y Holland, 1989). En la naturaleza las condiciones en este límite resultan de procesos que cambian naturalmente en el Océano Ártico y mares adyacentes. El programa de modelización de ACSyS tiene como objetivo sustituir los flujos de este límite septentrional arbitrario por representaciones explícitas de la circulación y de la estructura termohalina de la región oceánica al norte de 60° N para tener en cuenta correctamente la interacción de los procesos del Ártico Polar con el clima mundial como se indica en la figura 3. Esto implicará, entre otras cosas:

- el desarrollo de modelos de circulación oceánica de alta resolución para el Océano Ártico y mares adyacentes con las más modernas formulaciones paramétricas de los procesos pertinentes a escala de subejilla.
- la modelización detallada de procesos seleccionados en la plataforma, convección en alta mar, mezcla de vórtices en el mar de Groenlandia y los procesos de hielo marino, al objeto de elaborar esquemas de parametrización satisfactorios para la circulación oceánica y los modelos del clima.

Durante los últimos años se ha desarrollado la capacidad de llevar a cabo estos trabajos de modelización oceánica (p.e. Semtner y Chervin, 1991; Oberhuber, 1990; Legutke, 1991; Marshall y otros, 1991; Hibler y Brian, 1987; Houssais, 1988) y hay ordenadores adecuados en varias instituciones científicas. En cuanto a la componente atmosférica se necesita una elaboración adicional para mejorar los modelos que representen la nubosidad, la transferencia de energía y la precipitación y los flujos de calor/agua a través del mar con y sin hielo bajo las condiciones especiales del clima Ártico.

Durante los últimos años ha habido un notable progreso en la simulación numérica de la capa de hielo (Huybrechts y otros, 1991). Además, las observaciones obtenidas durante el Proyecto del núcleo del hielo de Groenlandia (GRIP), el Experimento de las márgenes del hielo de Groenlandia y otros programas permitirán, en un futuro próximo, emprender experimentos con modelos aún más refinados.

La representación de la hidrología terrestre a gran escala en latitudes altas es probablemente la componente menos desarrollada de los modelos climáticos del Ártico. Además de los estudios mundiales iniciados por el Experimento mundial de la energía y el ciclo del agua, el ACSyS fomentará el desarrollo de modelos polares completamente interactivos atmósfera-criosfera-hidrología de la superficie, que puedan incorporarse eficazmente a los modelos del clima mundial.

Ejecución del ACSyS.

Hay varias razones para concentrar los estudios del clima polar en la región del Ártico durante el decenio actual. En primer lugar se

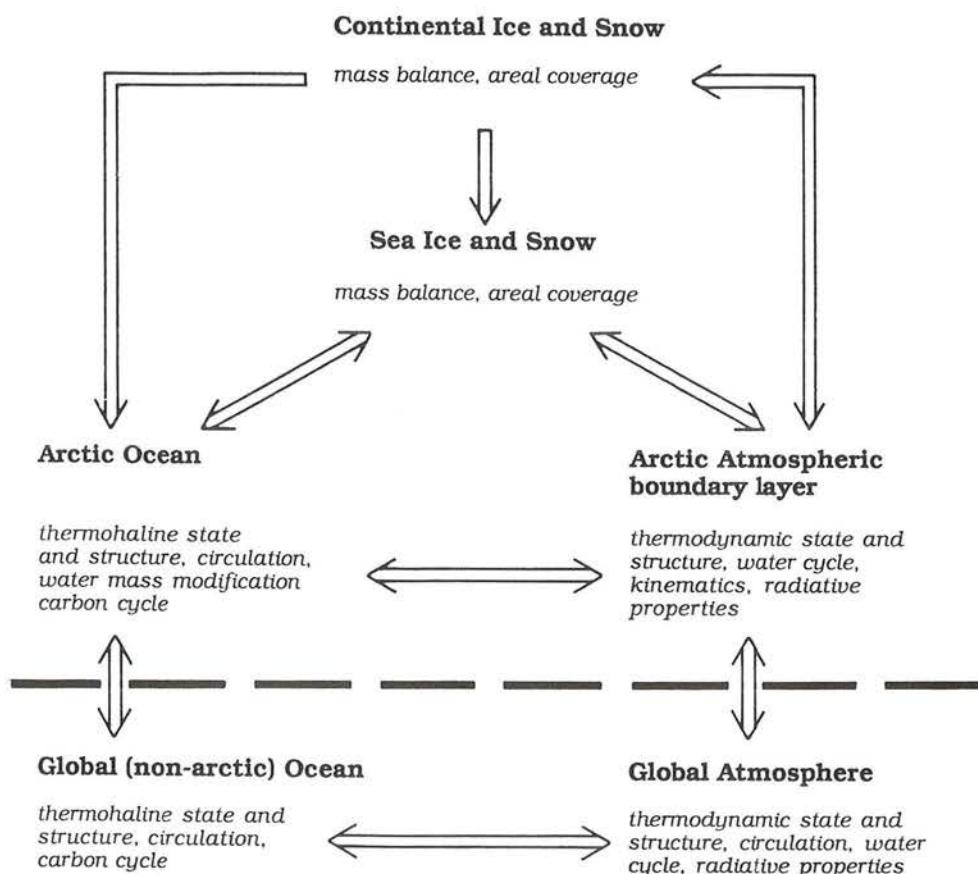


Figura 3 – Esquema de los acoplamientos físicos entre los componentes del sistema climático ártico (por encima de la línea de trazos) y de las interacciones entre el Ártico y el sistema climático mundial (atraviesa la línea de trazos) (según Augstein, 1991)

cree que los procesos atmosféricos, oceánicos y criosféricos de la región del Polo Norte juegan un papel particularmente activo en la dinámica de la circulación termohalina de los océanos, transporte a gran escala de calor y de agua dulce e intercambios de energía océano-atmósfera. En segundo lugar, los programas de investigación actualmente en curso han demostrado la eficacia de los nuevos medios disponibles incluyendo satélites, buques rompehielos de investigación, aeronaves con instrumentos, boyas en superficie automáticas a la deriva, plataformas fijas en largos períodos, etc., para realizar observaciones en mares cubiertos de hielo. En tercer lugar los avances en la modelización de la circulación del océano Ártico y del hielo marino, junto con la disponibilidad de nuevos y potentes ordenadores proporcionan una base fuerte para incorporar los procesos polares Árticos a los

realistas modelos mundiales acoplados atmósfera-océano-criosfera. En cuarto lugar, la disminución de la tensión entre los países del Este y del Oeste han abierto el Océano Ártico y regiones continentales adyacentes a la cooperación en la investigación científica internacional. Por último hay un fuerte y creciente interés por la investigación Ártica en gran parte de la comunidad científica, como lo manifiesta la multiplicación de organismos internacionales tales como el comité europeo sobre ciencias oceánicas y polares (ECOPS), el Panel de ciencias del océano Ártico y el Comité Internacional de ciencia Ártica.

Del mismo modo, son evidencia del interés en los procesos del clima ártico la amplia gama de recientes iniciativas de investigación tanto nacionales como multinacionales tales como el Programa de ciencia del sistema ártico de la Fundación Nacional de Ciencia de los EE.UU., el

Programa de cambio del clima Atlántico de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de EE.UU., el Proyecto del Mar de Groenlandia, el Programa para la investigación internacional de los océanos polares de la Agencia Espacial Europea y NASA, el Proyecto del Núcleo del Hielo de Groenlandia (GRIP) de ECOPS.

El ACSyS, al perseguir su propio objetivo de estudiar la influencia del Ártico en el clima mundial, tendrá la oportunidad de trabajar con una comunidad científica activa, cooperar en una gran variedad de programas ya en curso o planificados y hacer uso de una rica colección de datos de observación recogidos para muchos propósitos científicos o de aplicación.

Referencias

- AAGAARD, K. and E. C. CARMACK, 1989: The role of sea ice and other fresh water in the Arctic circulation. *Jour. Geophy. Res.*, **94**, 14485-14498.
- AUGSTEIN, E., 1991: The role of Arctic regions in global climate changes. In: *Energy and Environment* 1991, Amer. Soc. Heat., Refr. and Air Cond. Eng., Atlanta, USA.
- BROECKER, W.M., D.M. PETEET and D. RIND, 1985: Does the ocean-atmosphere system have more than one stable mode of operation? *Nature* **315**, 21-26.
- BRYAN, K., 1986: High latitude salinity effects in the interhemispheric thermohaline circulation. *Nature*, **323**, 301-304.
- BRYAN, F. O. and W. R. HOLLAND, 1989: A high resolution simulation of the wind- and thermohaline driven circulation in the North Atlantic Ocean. In: *Parameterization of Processes*, Proc. Hawaii Winter Workshop. P. MOLLER and D. HENDERSON (Eds.), Hawaii, 99-115.
- BUDYKO, M. I., 1969: The effect of solar radiation variations on the energy balance of the earth-atmosphere system, *Tellus*, **21**, 611-619.
- COMISO, J.C., P. WADHAMS, W.B. KRABILL, R.N. SWIFT, J.P. CRAWFORD and W.B. TUCKER, 1991: Top/bottom multisensor remote sensing of Arctic sea ice. *Jour. Geophys. Res.*, **96**, 2693-2709.
- DICKSON, R.R., J. MEINCKE, S. MAEMBERG and A. LEE, 1988: The great salinity anomaly in the northern North Atlantic, 1968-1982. *Prog. Ocean.*, **20**, 103-151.
- HARTMANN, J., C. KOTTMEIER and C. WAMSER, 1992: Radiation and eddy flux experiment 1991 (Reflex 1). *Ber. Polarf.*, **105**, Alfred Wegener Institute, Bremerhaven.
- HIBLER, W.D. and K. BRYAN, 1987: A diagnostic ice-ocean model. *Jour. Phys. Ocean.*, **17**, 987-1015.
- HOUSSAIS, M.N. 1988: Testing a coupled ice/mixed layer model under Subarctic conditions. *Jour. Ocean.*, **18**, 196-210.
- HUYBRECHTS, P., A. LETREGUILLY and N. REEH, 1991: The Greenland Ice Sheet and greenhouse warming. *Palaeogeogr., Palaeoclim., Palaeoecol.*, **89**, 399-412.
- IVANOV, V.V., 1976: Water balance and water resources of the Arctic land. *Proc. of the Arctic and Antarctic Res. Inst.*, **323**, 4-24 (in Russian).
- LEGUTKE, S., 1991: A numerical investigation of the circulation in the Greenland and Norwegian Seas. *Jour. Phys. Ocean.*, **21**, 118-148.
- MAIER-REIMER, E. and U. MIKOLAJEWICS 1989: Experiments with an OGCM on the cause of Younger Dryas. In: *Oceanogr.* 1988. A. AYALA-CASTANARES, W. WOOSTER and A. GOMES-ARANCIBIA (Eds.), Mexico, UNAM Press.
- MANABE, S. and R. J. STOUFFER, 1988: Two stable equilibria of a coupled ocean-atmosphere model. *Jour. Climate*, **1**, 841-866.
- MARSHALL, J., H. JONES and S. LEGG, 1991: A model of the formation and dispersal of convective plumes in open-ocean deep convection. IUGG XX, Vienna, IAPSO Abstracts.
- OBERHUBER, J.M., 1990: Simulation of the Atlantic Circulation with a Coupled Sea-ice/Mixed-layer Isopycnal General Circulation Model. Report 59, Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg.
- ROECKNER, E., U. SCHLESE, J. BIERCAMP and P. LOEWE, 1987: Cloud optical depth feedbacks in climate modelling. *Nature*, **329**, 138-140.
- SELLERS, W.O., 1969: A global climate model based on the energy balance of the earth-atmosphere system. *Jour. Appl. Met.*, **8**, 392-400.
- SEMTNER, A.J. and R.M. CHERVIN, 1991: Ocean general circulation from a global eddy-resolving model. (Submission to *Jour. Geophys. Res.*)
- UNTERSTEINER, and A. S. THORNDIKE, 1982: Arctic data buoy program. *Polar Res.*, **21**, 127-135.
- WALLACE, D.W.R., R.M. MOORE and E.P. JONES, 1987: Ventilation of the Arctic Ocean cold halocline, rates of diapycnal and isopycnal transport, oxygen utilization and primary production inferred from chlorofluoromethane distributions. *Deep Sea Res.*, **34**, 1957-1979.
- WASHINGTON, W.M. and G.A. MEEHL, 1989: Climate sensitivity due to increased CO_2 : Experiments with a coupled atmosphere and ocean general circulation model. *Climate Dyn.*, **4**, 1-38.