

# EL SISTEMA CLIMATICO DE LA TIERRA

Por Gordon McBEAN \*

## Introducción

El clima de la Tierra resulta de una compleja interacción de la radiación solar incidente, la radiación terrestre emitida y las características de la superficie del planeta (tierra, océano, vegetación, nieve y hielos) y de la atmósfera. Aunque la mayoría considera el clima en términos de temperatura del aire, vientos y precipitación, el sistema climático se define de forma que incluya la atmósfera, los océanos, la nieve y los hielos (la criosfera) y la superficie terrestre y su vegetación. Cada uno de ellos juega un importante papel en la determinación del clima. Actualmente, también pueden jugar los seres humanos un papel en la determinación del clima.

Durante la mayor parte de los 4 500 millones de años de historia de la Tierra, las actividades humanas no han tenido impacto en el clima. La historia de las temperaturas climáticas y de la composición atmosférica en los pasados 160 000 años se ha establecido mediante el análisis del hielo y de las burbujas de aire atrapadas en el hielo cuando éste se formó (Figura 1). En el momento de máxima glaciación, la temperatura media mundial era entre 5 y 7° C más fría que la actual. El intervalo de variación de la concentración de CO<sub>2</sub> atmosférico estaba entre 180 y 300 ppmv. Entre finales del siglo diez y comienzos del trece de nuestra era, las temperaturas fueron excepcionalmente cálidas por el Atlántico Norte. Una característica climática mundial pronunciada fue la Pequeña Edad del Hielo entre hace 150 y 450 años. Durante el pasado siglo, el clima de la Tierra se calentó entre 0,3 y 0,6° C y el decenio de 1980 fue el más cálido registrado. La concentración de dióxido de carbono atmosférico actualmente ha aumentado por encima de las 350 ppmv siendo la mayor parte del aumento en los últimos 50 años. El aumento en la concentración atmosférica es paralelo con el aumento en las emisiones de origen humano. El calentamiento durante el pasado siglo bien pudiera ser debido

enteramente a la variabilidad natural pero también pudiera deberse al impacto del aumento de las concentraciones de gases invernadero. Es importante saber la causa.

La variabilidad natural es una característica del sistema climático y tiene lugar en un amplio rango de escalas cronológicas. La variabilidad a largo plazo pudiera estar forzada por las variaciones de la intensidad solar y por las variaciones en los parámetros orbitales de la Tierra y aumentada por las variaciones en la composición de la atmósfera. Las variaciones en escalas cronológicas más cortas parecen estar forzadas por las interacciones no lineales dentro y entre los diferentes componentes del sistema climático. La mayor contribución a la variabilidad interanual del sistema climático es *El Niño/Oscilación del Sur* (ENSO) del Océano Pacífico tropical. Hay otras oscilaciones de larga duración en el sistema climático, probablemente relacionadas con los sistemas mundiales de corrientes oceánicas profundas. Actualmente, superpuestas con estas variaciones naturales, se producen cambios inducidos por las actividades humanas. Todavía no conocemos el sistema climático como para separar estos problemas, identificar los mecanismos causales y modelar sus interacciones. Es ésta una tarea en la que la comunidad científica tendrá que continuar aplicándose en los años venideros. Las respuestas no llegarán inmediatamente o en un año puesto que la investigación del clima, como cualquier gran iniciativa de investigación, es una actividad a largo plazo. Mediante el apoyo continuado de la comunidad científica internacional, aumentaremos nuestra comprensión y eventualmente podremos predecir la evolución y cambio del clima para beneficio de la Tierra y de toda la humanidad.

## El Programa Mundial de Investigación del Clima

La Conferencia Mundial del Clima de 1979 estableció el Programa Mundial del Clima con

\* Jefe del Departamento de Oceanografía, Universidad de British Columbia, Vancouver, Canadá, y presidente del Comité Científico Mixto del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas.

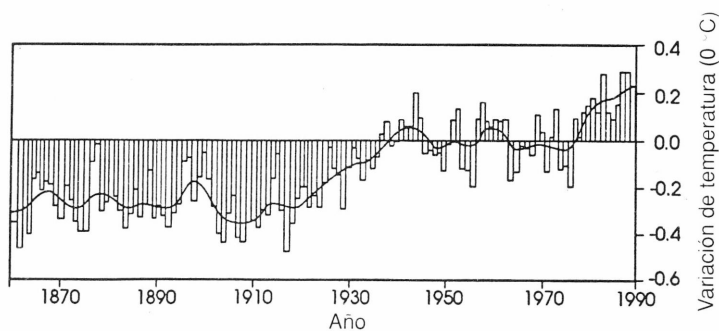
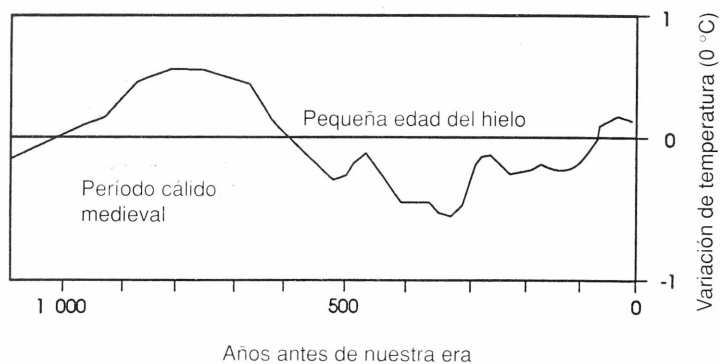
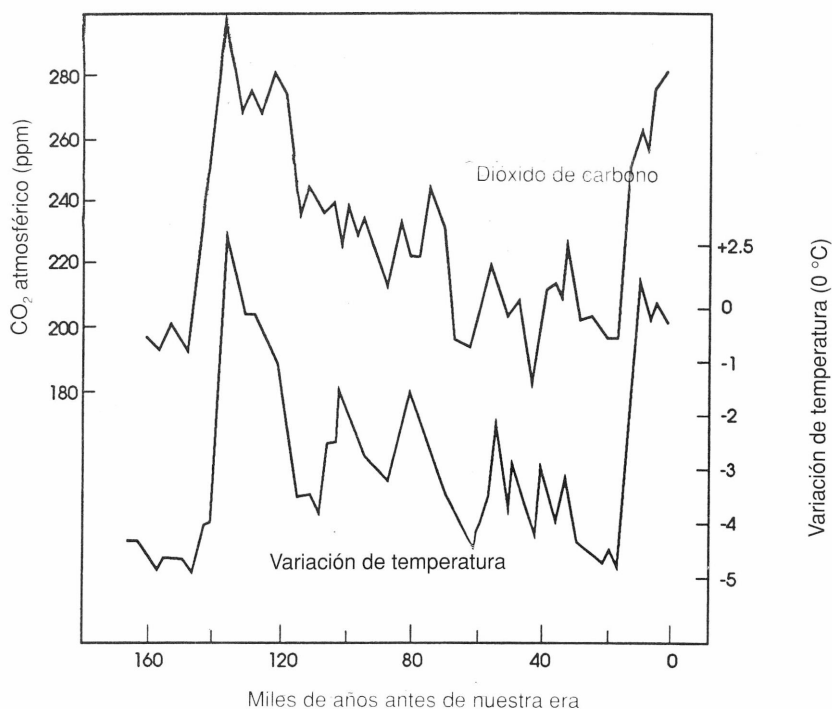


Figura 1 — Historia cronológica de la temperatura media mundial: (*arriba*.) últimos 160 000 años (del núcleo de hielo de Vostok); (*medio*) últimos 1 000 años; y (*abajo*) últimos 100 años.

cuatro componentes: datos, aplicaciones, impactos e investigación. El Programa Mundial de Investigaciones del Clima fue establecido inicialmente por la Organización Meteorológica Mundial y el Consejo Internacional de Uniones Científicas. En 1992, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental de la UNESCO pasó a ser un patrocinador adicional. Al Programa Mundial de Investigaciones Climáticas se le asignaron objetivos específicos para determinar:

- En qué medida se puede predecir el clima;
- La medida de la influencia del hombre en el clima.

La investigación del clima se convirtió entonces en un gran foco de actividad científica internacional. Se reconoció desde el principio que, para lograr estos objetivos, sería necesario:

- Mejorar nuestro conocimiento del clima a nivel mundial y regional, sus variaciones cronológicas, y nuestra comprensión de los mecanismos responsables;
- Evaluar la evidencia de tendencias significativas en el clima a escala mundial y regional;
- Desarrollar y mejorar modelos físico-matemáticos capaces de simular y evaluar la predictibilidad del sistema climático sobre un intervalo de escalas espaciales y cronológicas;
- Investigar la sensibilidad del clima a los posibles estímulos naturales y a los inducidos por el hombre y estimar los cambios probables en el clima como resultado de influencias perturbadoras específicas.

El mandato del PMIC es estudiar los cambios y variaciones del clima, tanto naturales como inducidos por el hombre, en escalas cronológicas que varían desde una estación a un siglo.

### La estrategia científica del PMIC

La estrategia científica de PMIC se ha basado en la construcción de modelos físico-matemáticos del sistema climático mundial acoplado. Es preciso estudiar los procesos para mejorar la comprensión de los elementos clave del sistema climático de forma que puedan representarse adecuadamente en

los modelos climáticos. Se necesitan observaciones mundiales con las cuales se puedan verificar las simulaciones del clima. El PMIC no intenta organizar toda la investigación del clima (y aún menos toda la investigación atmosférica y oceanográfica); en su lugar el énfasis se sitúa en aquellas actividades que requieren cooperación internacional, bien a causa de su escala mundial o regional grande o por los requerimientos de recursos financieros o humanos. Se reconoce que mucha investigación esencial del clima se está realizando actualmente —y es la mejor forma— en pequeños grupos de investigación en universidades o institutos gubernamentales de todo el mundo.

El concepto de escalas cronológicas y espaciales es importante para el análisis científico del sistema climático. Hay un amplio intervalo de escalas en el sistema climático (Figura 2). No podemos esperar representar explícitamente las escalas pequeñas en un modelo climático, pero es necesario incluir sus impactos mediante parametrizaciones. Es útil considerar el sistema climático como dividido en dos componentes: el sistema climático rápido y el lento. El sistema climático rápido es la atmósfera, la parte superior del océano (aquella parte sujeta al ciclo anual de mezcla vertical debida al viento) y los procesos transitorios en la superficie terrestre. El sistema climático rápido es activo, conducido por el motor atmosférico, y alcanza el equilibrio estadístico en algunos años. El sistema climático lento consta principalmente del océano más profundo y de los hielos terrestres perennes, con un periodo de respuesta que puede ser de décadas a siglos. Las principales interacciones entre los sistemas climáticos rápido y lento tienen lugar en un número limitado de zonas donde el calor se transfiere por movimientos verticales hacia abajo o hacia arriba del agua oceánica y en altas latitudes donde el agua fría y densa se hunde a grandes profundidades. En una primera aproximación, la magnitud de la respuesta climática a un cambio en el forzamiento, tal como el aumento en las concentraciones de los gases invernadero o cambios en la radiación solar, estará determinada por el sistema climático rápido; la variación en décadas del cambio vendrá determinada por el sistema climático lento.

Los patrocinadores establecieron el comité científico mixto (CCM) para el PMIC con el mandato de proporcionar una dirección

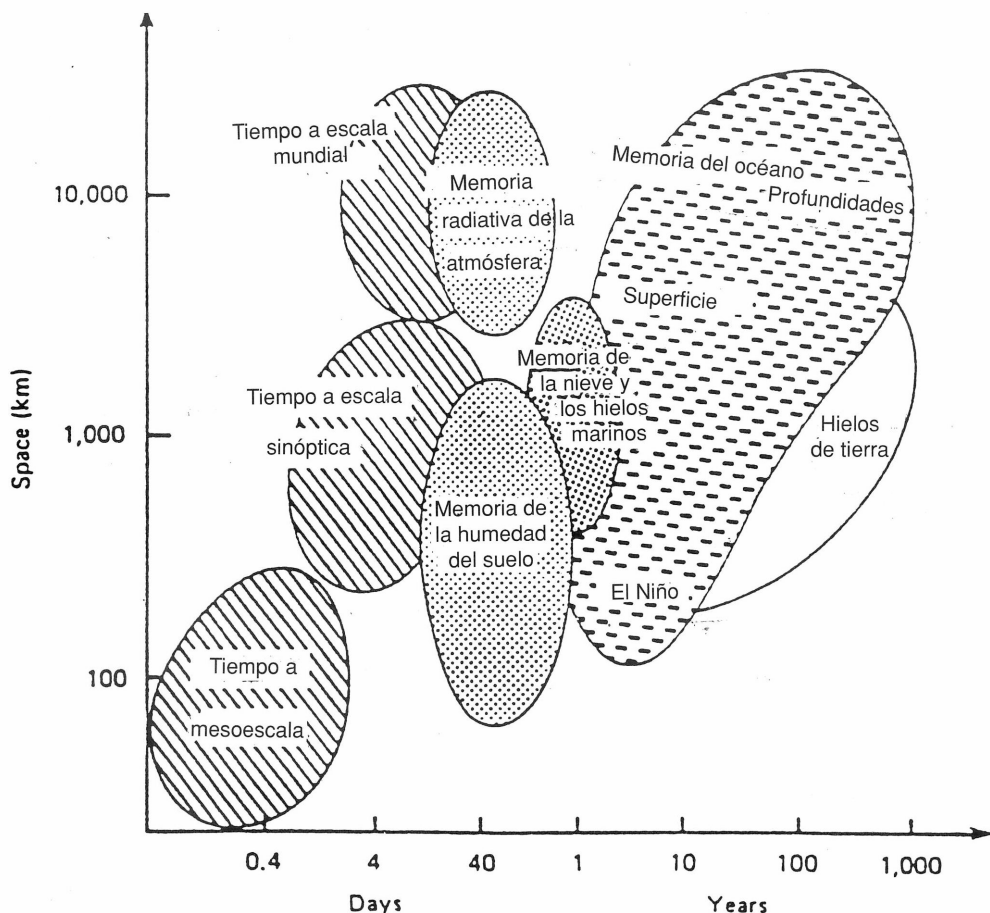


Figura 2 — Escalas cronológica y espacial de los componentes del sistema climático.

científica que determine los principales objetivos de investigación, revise y evalúe el desarrollo del Programa, y proporcione una coordinación general de esfuerzos a un nivel internacional. Los miembros del CCM se seleccionan por mutuo acuerdo de los patrocinadores, basándose en sus conocimientos científicos, capacidades y amplitud de miras. El Director y el Cuerpo de Planificación Mixto del PMIC son responsables del desarrollo de planes detallados para el PMIC, en el marco de las directrices establecidas por el CCM, y de su posterior puesta operativa. Previamente a que la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO fuese un patrocinador

formal del PMIC, el Comité de Cambios Climáticos y Océanos (CCCCO), patrocinado conjuntamente por la COI y el Comité Científico de Investigación Oceánica (CCIO) del Consejo Internacional de Uniones Científicas (CIUC) jugó un papel fundamental con el CCM en la definición de los elementos oceanográficamente importantes del PMIC. Con la entrada del COI como patrocinador del PMIC, el CCM se ha ampliado para englobar la experiencia oceanográfica adicional. Se mantienen buenas relaciones con la OMM, el Consejo Internacional de Uniones Científicas, la Comisión Oceanográfica Intergubernamental y otras organizaciones nacionales e internacionales.



## Observaciones mundiales

La Vigilancia Meteorológica Mundial, el Sistema Global Integrado de Servicios Oceánicos y los programas nacionales proporcionan una base para el sistema mundial de observación climática, si bien son inadecuados para la investigación climática mundial. Aunque el clima es en cierto sentido la integración del tiempo, los parámetros relevantes y la precisión y resolución de las observaciones son diferentes a los del tiempo. Puesto que los requerimientos de la cronología y del espacio para las climatologías mundiales son menos estrictos que para la predicción del tiempo, es posible cambiar resolución espacial y cronológica por una precisión absoluta y una cobertura mundial concordantes. En sus primeras reuniones, el Comité Científico Mixto identificó las nubes (y su interacción con la radiación) y los océanos como dos campos prioritarios del PMIC. Comenzó el Proyecto Internacional de climatología de Nubes por Satélite (PICNS) y se han recopilado desde 1983 datos mundiales de nubosidad y de los parámetros radiativos afines. El PICNS se creó mediante una cooperación multinacional para adquirir, procesar y transmitir radiancias, utilizando procedimientos acordados internacionalmente, procedentes de los satélites geoestacionarios alrededor del mundo. Con el comienzo del Experimento del Balance de Radiación Terrestre (EBRT) por la NASA en el decenio de los 80, el PMIC cooperó para obtener medidas mundiales del balance radiativo de la Tierra en la cima de la atmósfera y estimaciones de los diferentes componentes del balance radiativo superficial de la Tierra. Los datos PICNS y EBRT proporcionan actualmente un patrón con el que se puede comparar las simulaciones de los modelos climáticos mundiales de nubosidad y de flujos radiativos. El cálculo de los componentes del balance radiativo superficial con la precisión requerida por el PMIC resultó difícil, por lo que el PMIC ha iniciado una Red Básica de Radiación Superficial (RBRS). La finalidad de la RBRS no es la medida del balance de radiación global sino la de proporcionar las medidas esenciales para el desarrollo y la comprobación de los esquemas de cálculo para el balance radiativo a partir de los datos de satélite, de superficie, de altura y de otros tipos de datos.

Aunque se realizan muchas medidas de precipitación en todo el mundo, su calidad es variable, virtualmente ninguna de ellas se

realizan sobre los océanos y muy pocas sobre algunas zonas de tierra. Además, muchas observaciones no se intercambian internacionalmente. En 1988, el PMIC comenzó el Proyecto Mundial de Climatología de la Precipitación (PMCP). El PGCP reúne las medidas de la precipitación hechas en tierra con estimaciones de satélite basadas en los sistemas geoestacionarios y de órbita polar.

Los anteriores son solamente unos pocos ejemplos de los programas mundiales de observación instituidos por el PMIC; en la sección de programas se describen muchos más. Debido a la importancia de los sistemas mundiales de observación para la investigación climática y para la predicción eventual del clima, el presidente del CCM convocó dos reuniones que condujeron a la formación del Sistema Mundial de Observación Climática (SMOC), que está actualmente patrocinado por OMM, el COI y CIAC y el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Se espera que a medida que se establezca mejor el SMOC, proporcionará alguno de los requisitos de observación para las iniciativas de investigación del PMIC.

## Predicción del cambio y variación del clima

Aunque el ser capaz de comprender el sistema climático es de considerable interés, los beneficios de esta comprensión sólo se manifestarán si podemos convertir dicha comprensión en una capacidad para predecir con confianza los climas futuros. Más allá del límite impuesto por la predictibilidad del tiempo, existe la posibilidad de predecir las características que dependen de las escalas cronológicas mayores de la superficie terrestre y, particularmente, de los océanos. Por ejemplo, se ha demostrado la habilidad para predecir la ocurrencia de anomalías de precipitación, en un sentido estadístico, basándose en las anomalías de la temperatura superficial de los océanos. A medida que mejora nuestra comprensión de estas predicciones, serán posibles mejores predicciones estacionales y de mayor alcance. El Programa el Océano Tropical y la Atmósfera Mundial (TOGA) del PMIC está llevando a un aumento en la confianza de que las oscilaciones lentas del acoplamiento *El Niño/Oscilación del Sur*, pueden predecirse. Se están realizando predicciones experimentales y han comenzado discusiones para un centro de

predicción multinacional enfocado a la predicción de los grandes cambios asociados con el ENSO.

Hay limitaciones inherentes a las predicciones basadas en el estado inicial, debido a la poca precisión y a la falta de detalle espacial de las observaciones, así como por la habilidad predictiva de los modelos. La siguiente posibilidad de predicción pasa a ser la predicción basada en las condiciones externas que se prescriben esencialmente fuera del sistema climático. En gran medida son éstas predicciones "hipotéticas". Por ejemplo, ¿cómo sería el clima si la cantidad de gases invernadero en la atmósfera se aumentase hasta el doble de su valor actual?; o ¿cómo sería el clima si la intensidad del Sol decreciese? Se trata de escenarios climáticos basados en las condiciones externas y constituyen la base del actual interés sobre el calentamiento climático mundial.

Si desarrollamos nuestros modelos climáticos sobre los mismos principios que los modelos de predicción del tiempo y modelos similares para los océanos y las superficies terrestres (y podemos demostrar su pericia), deberíamos tener cierta confianza en que nuestros modelos son útiles para predicciones sobre periodos más largos. Además, los modelos climáticos pueden comprobarse por su capacidad para modelar los climas pasados y presente con sus variaciones espaciales y cronológicas. Esta es la filosofía del Programa de Modelización Climática del PMIC.

### **El PMIC y el problema del calentamiento por el efecto invernadero**

Durante el decenio pasado el interés por la posibilidad del calentamiento mundial ha alcanzado los más altos niveles políticos y se ha convertido en un tema habitual de discusión pública. Las teorías y modelos desarrollados por los científicos muestran que el aumento de las concentraciones atmosféricas de los gases invernadero causarán un calentamiento en el clima de la Tierra y los programas de medidas, también fomentados por los científicos, están mostrando dramáticos aumentos de las concentraciones atmosféricas. Puesto que todavía no se puede ver ni el calentamiento ni sus efectos, la preocupación por el calentamiento mundial se basa en discusiones científicas sobre su posible ocurrencia y el gran impacto que puede tener. Las simulaciones de los modelos climáticos mundiales son

fundamentales en el problema del calentamiento por efecto invernadero y presentan incertidumbres que es necesario reducir.

Para ilustrar el papel del PMIC y de otros programas científicos en la reducción de las incertidumbres, es adecuado considerar un modelo conceptual simplificado (Figura 3). Aunque se presente de una forma lineal con fines ilustrativos, debe reconocerse que el problema del calentamiento climático debido al aumento de las concentraciones de gases invernadero es realmente no lineal con muchos componentes interactuando. También necesitamos considerar las variaciones regionales de la temperatura, la precipitación y otras variables climáticas que realmente influyen en los ecosistemas y en las actividades humanas. En resumen, el tema del calendario mundial puede introducirse mediante las preguntas siguientes:

- (a) ¿Qué cantidad de gases invernadero se emitirán como resultado de las actividades humanas?;
- (b) ¿Cuáles serán las concentraciones atmosféricas resultantes?;
- (c) ¿Cuánto cambiará la temperatura (y la precipitación,... etc)?;
- (d) ¿Cómo será de rápido el ritmo del cambio?;
- (e) ¿Cuáles serán las variaciones regionales en (c) y en (d)?;
- (f) ¿Cómo se superpondrán estos cambios inducidos por el hombre en las variaciones naturales?;
- (g) ¿Cuál serán los impactos sobre el nivel del mar?;
- (h) ¿Cuál serán los impactos sobre los ecosistemas naturales y gestionados y sobre las actividades humanas?

La contestación a la pregunta (a) depende de la respuesta de la humanidad en todo el mundo. El papel de los científicos es el ayudarles a tomar la elección correcta. Los componentes del Programa Internacional Geosfera-Biosfera (PIGB) con los importantes datos procedentes del PMIC obtendrán respuestas más exactas a la pregunta (b). El Programa Mundial de investigaciones Climáticas (PMIC) se centra en proporcionar contestaciones más precisas a las preguntas

(c), (d), (e), (f) y (g), con el Experimento Mundial sobre la Energía y el Ciclo del Agua (GEWEX) llevando la primacía para (c) y el Experimento Mundial de Circulación Oceánica (WOCE) para (d) y (g). El Programa sobre el Océano Tropical y la Atmósfera Mundial (TOGA) proporcionará los fundamentos para (f), mientras que el Estudio del Sistema Climático Ártico contribuirá regionalmente a todas las preguntas. El recientemente creado Programa de Procesos Estratosféricos y su papel en el Clima reunirán todas las piezas en forma de modelos climáticos detallados que consideren el tema en su totalidad y proporcionen la base para la predicción.

### **Los componentes del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas**

El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas está actualmente organizado en seis componentes principales. Desde el principio, el PMIC tuvo una gran actividad en modelización, centrada en torno al Grupo de trabajo de experimentación numérica. A medida que se desarrollaba el PMIC, se organizaron actividades de modelización dentro de los otros componentes. En 1990 el Comité Científico Mixto reunió todas estas actividades en un Programa de Modelización del Clima, coordinado por el Grupo Científico Director. Las actividades de modelización del PMIC incluyen a la atmósfera, los océanos (tanto tropical como mundial), los hielos marinos y la hidrología de la superficie terrestre.

El Programa sobre el Océano Tropical y la Atmósfera Mundial (TOGA) comenzó en 1985 como un estudio de diez años de las principales interacciones océano-atmósfera en las regiones tropicales y sus conexiones mundiales. El principal avance ha sido en la observación, la comprensión y la modelización del fenómeno de *El Niño* del Pacífico Ecuatorial y sus conexiones mundiales. El Experimento Mundial de Circulación Oceánica (WOCE) comenzó en 1990 y continuará hasta 1997. Sus objetivos son la comprensión de las principales circulaciones oceánicas mundiales y la obtención de las observaciones necesarias para desarrollar y comprobar los modelos oceánicos mundiales. El Panel para el Desarrollo de un Sistema de Observación Oceánica está ayudando en el desarrollo de los sistemas de observación oceánicos.

El Comité Científico Mixto ya está considerando el periodo de finales de los 90 y

el siglo XXI, cuando hayan finalizado los principales componentes observacionales del TOGA y del WOCE. Se está desarrollando el concepto de un programa de investigación PMIC sobre la variabilidad del sistema acoplado océano-atmósfera y la predicción climática (CLIVAR). El CLIVAR comenzaría a continuación del TOGA y el WOCE y continuaría hasta aproximadamente el 2010. El énfasis estaría en la variabilidad natural del sistema climático en las escalas cronológicas variando entre la estación y el siglo (determinadas en primer lugar por los océanos) que nos conduciría a su predicción (como posible) y como una primera aproximación para los cambios climáticos inducidos por factores externos.

El programa central en el estudio de los procesos atmosféricos y de la superficie terrestre es el Experimento sobre la Energía Mundial y el Ciclo del Agua (GEWEX). Aprobado formalmente en 1988, el GEWEX reúne las actividades sobre la radiación atmosférica y las nubes, la precipitación y la hidrología de gran escala. El GEWEX también proporciona una guía científica para el ISCCP, GPCP, BSRN, y el Programa de Radiación PMIC.

El Comité Científico Mixto aprobó en su reunión de 1992 el establecimiento del Programa de Procesos Estratosféricos y su papel en el Clima, en reconocimiento a la importancia de la estratosfera en el clima. El Programa incluirá estudios sobre las interacciones troposfera-estratosfera y la dinámica y la química de la estratosfera, incluido el papel radiativo del ozono. La total definición del programa tendrá lugar mediante reuniones de trabajo planificadas para 1992 y 1993.

Las regiones polares son regiones sumidero de energía del sistema climático y poseen también temas científicos especiales tales como la interacción entre los océanos, los hielos marinos y la atmósfera y el papel de las nubes polares. También han mostrado los estudios de modelización que las regiones polares del norte serán las que experimenten un mayor impacto del calentamiento mundial. Por estas razones se decidió comenzar el Estudio del Sistema Climático Ártico como un experimento regional focalizado que reuniese el estudio del océano, el hielo, la atmósfera y las superficies terrestres colindantes, como un verdadero estudio multidisciplinario de una región compleja. Se espera que tenga lugar en el futuro un estudio focalizado de la Antártida.

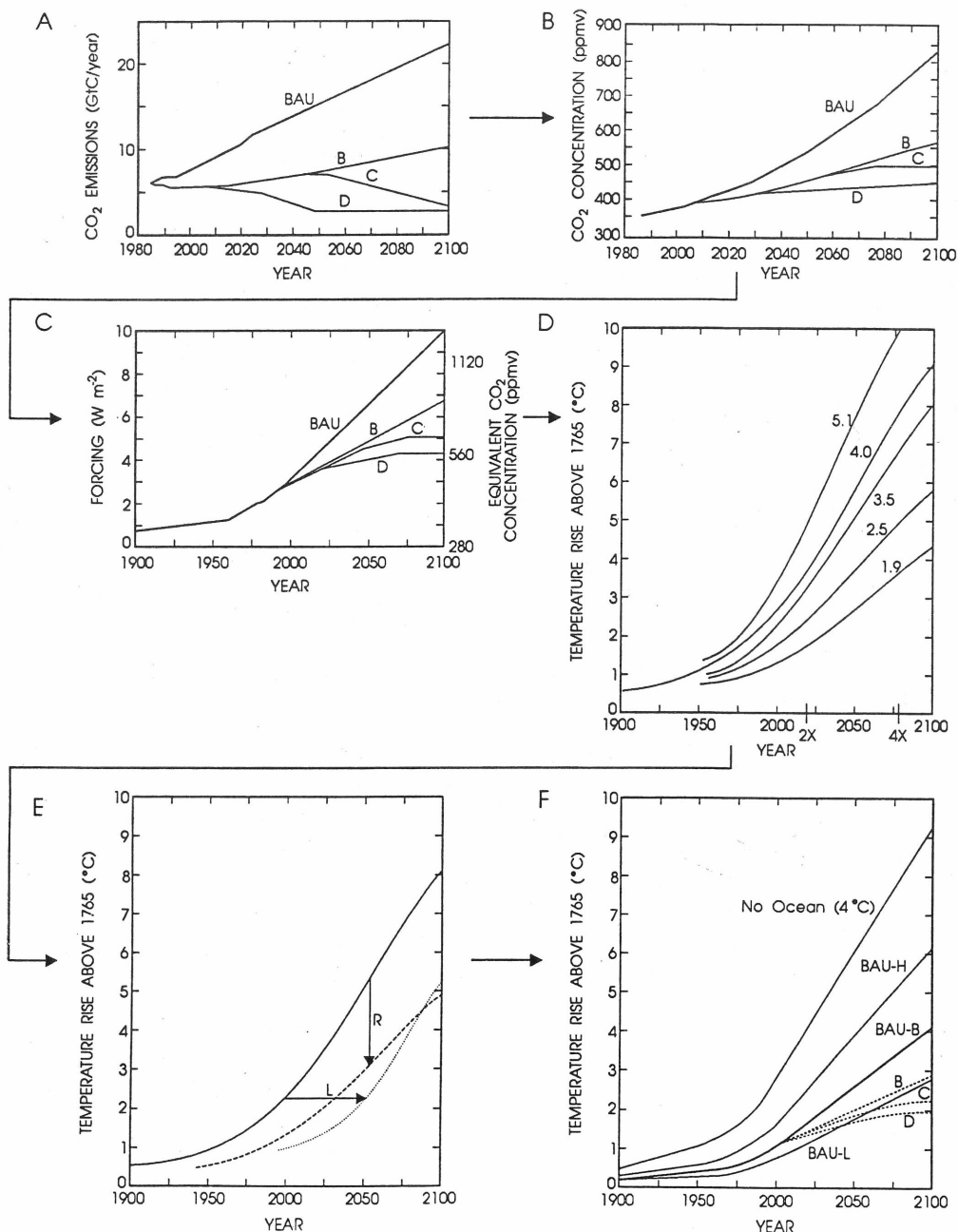


Figura 3 — Esquema simplificado de la respuesta del sistema climático al aumento de la concentración atmosférica de gases invernadero: A—emisiones; B—concentraciones atmosféricas; C—forzamiento radiativo directo; D—intervalo de la respuesta rápida del sistema climático al escenario BAU; E—respuesta oceánica, reducción y/o desfase; F—respuesta total del sistema climático (adaptado de la Evaluación Científica del IPCC, 1990)

De esta forma los componentes del PMIC se focalizan en los elementos principales del sistema climático (Figura 4). Al igual que los

componentes interaccionan en sus fronteras, los Programas también interactúan para asegurar una comunidad de intereses. El

Programa de Modelización Climática proporciona el punto de vista general para el establecimiento de prioridades y la identificación de lagunas. El papel del Comité Científico Mixto es el de proporcionar una coordinación y una directriz general, así como realizar las revisiones y ajustes cuando sean necesarias. El éxito del PMIC dependerá de que cada componente cumpla sus objetivos y de la pericia de los modelizadores para reunirlos todos en los modelos predictivos en beneficio de la sociedad.

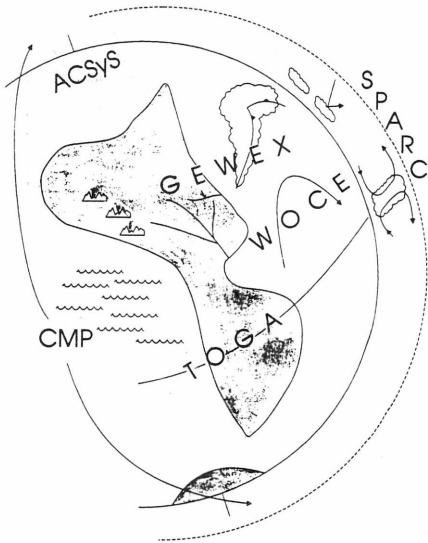


Figura 4 — Diagrama esquemático de los componentes del Programa Mundial de Investigación del Clima

**Relaciones con otras organizaciones internacionales**

El PIGB y el PMIC son programas complementarios y los principales componentes de los estudios del CIUC sobre el cambio mundial, poniendo énfasis el PMIC en el estudio del sistema climático físico y el PIGB en el estudio de los ciclos biogeoquímicos. Entre ellos hay una fuerte interacción tanto en el desarrollo de los elementos del programa como en los proyectos individuales. El presidente del Comité Científico Mixto es un miembro nato del Comité Científico del PIGB y el representante o presidente del PIGB asiste a las reuniones del Comité Científico Mixto. Hay una pertenencia simultánea a varios de los grupos directores científicos de los proyectos o programas. El

PMIC también interacciona con otros miembros de la familia del CIUC. Las Asociaciones Internacionales de Meteorología y Ciencias Atmosféricas, Ciencias Físicas del Océano y Ciencias Hidrológicas de la Unión Internacional de Geodesia y Geofísica todas ellas tienen vínculos con el PMIC.

El PMIC también mantiene buenas conexiones con los otros componentes del Programa Mundial sobre el Clima; dichas conexiones se formalizan mediante el Comité de Coordinación del Programa Mundial sobre el Clima. Se han establecido enlaces con el sistema Mundial de Observación del Clima, la Vigilancia Meteorológica Mundial y otros programas observacionales de la OMM, la COI y otros organismos internacionales para asegurar redes mundiales de observación completas y firmes, con un mínimo de redundancia y burocracia.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (PICC) tiene la tarea de evaluar la información científica disponible y los impactos socioeconómicos y medioambientales del cambio climático y la formulación de estrategias de respuesta. Las Evaluaciones Científicas del PICC se han realizado con la información y conocimiento desarrollado por el PMIC (y por otras actividades de investigación del clima). Muchos autores de la Evaluación Científica del PICC son también participantes activos en el PMIC, mediante su participación en los comités o grupos de trabajo, mediante su relación con los proyectos o mediante ambos. Esto es lógico, puesto que tanto el PMIC como PICC requieren de la mayor experiencia en la ciencia del clima.

El nuevo Convenio Marco sobre el Cambio Climático ha establecido las base para continuar las discusiones sobre el cambio climático en los próximos decenios. El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas continuará proporcionando la base científica para dichas discusiones. Mediante los programas de investigación del PMIC, se reducirán las incertidumbres sobre el calentamiento mundial, permitiendo que las estrategias de respuesta se desarrollen con una mayor confianza.

**Otros comentarios**

Debe ponerse énfasis en que el PMIC es solamente un mecanismo de coordinación y planificación internacional; no posee recursos para realizar ninguna investigación. Todos los

programas y proyectos del PMIC se realizan por científicos y otros miembros de plantilla, buques, aviones, ordenadores y otras instalaciones que están todos ellos pagados por las naciones del mundo. Sin su apoyo no existiría el PMIC o cualquier otro programa internacional de investigación. Las discusiones directas con otras instituciones nacionales de investigación constituyen una parte del proceso de desarrollo del PMIC. También el PMIC se apoya firmemente en sus organizaciones progenitoras para proporcionar contactos con las organizaciones nacionales y con la comunidad científica.

La investigación del clima también depende de los individuos. Fueron los científicos individualmente, motivados en primer lugar por su curiosidad científica, los que hicieron las medidas originales del dióxido de carbono, los que desarrollaron modelos para ver que sucedería, y los que proporcionaron la base general de nuestra comprensión del sistema climático. Generalmente los científicos prefieren trabajar solos o en pequeños grupos, que es

donde surgen frecuentemente los mayores avances científicos (y los premios y recompensas). El atraer a los científicos a los programas del PMIC requiere el establecimiento de un marco para el trabajo científico que les haga desear su inclusión. La mayor parte de los miembros de la comunidad científica disfruta de su trabajo y al menos en el caso de la investigación climática también sienten que es muy importante para la humanidad mundial. Aunque hasta la fecha el PMIC ha podido constituirse sobre el interés y el compromiso, es importante reconocer que los crecientes niveles de burocracia internacional pueden convertir el entusiasmo en desaliento, dando como resultado una menor participación en los programas.

En resumen, el Programa Mundial de Investigación del Clima está vivo y sano, aunque encarando algunos problemas relativos a los recursos fiscales y humanos. Los elementos del programa que se describen en los siguientes artículos proporcionarán más detalles de esta importante actividad.

# PROGRAMA DEL OCEANO TROPICAL Y LA ATMOSFERA MUNDIAL (TOGA)

Por David L. T. ANDERSON\* y Michael K. DAVEY\*\*

*El sistema climático tiene variabilidad a muchas escalas temporales, algunas de las cuales se deben a la inestabilidad interna del sistema atmósfera-oceano. El ejemplo más destacado es el ENOS (El Niño/Oscilación del Sur). El TOGA ha llevado a comprender mejor muchos aspectos del ENOS. Se describe la forma de esta variabilidad, centrada en el Pacífico, así como las teorías de sus orígenes. Los modelos del ENOS han alcanzado ya la etapa en la que pueden hacerse predicciones climáticas básicas para los trópicos. La capacidad de hacer predicciones depende de poder determinar las condiciones iniciales del océano*

*y de la atmósfera lo que, a su vez, requiere una extensa red de observación en los océanos tropicales. Se revisa el estado de la predicción del ENOS y de la red de observación TOGA. El Pacífico occidental tropical es la región donde es particularmente fuerte la interacción océano-atmósfera por medio de procesos húmedos y está a punto de alcanzar su culminación un importante experimento (COARE) para observar y modelar esta interacción. Se describirán los objetivos y los trabajos de campo del programa COARE.*

\* Departamento de Física, Subdepartamento de física atmosférica, oceánica y planetaria, Laboratorio Clarendon, Parks Road, Oxford OX1 3PU, Reino Unido.

\*\* Meteorological Office Unit, Hooke Institute, Clarendon Laboratory, Parks Road, Oxford OX1 3PU, Reino Unido.