

Investigaciones Climáticas: logros, actividades y desafíos

por Antonio J. Busalacchi¹ y Ghassem R. Asrar²

En los albores de la Segunda Guerra Mundial, como consecuencia de los avances experimentados en nuestras observaciones y en nuestra comprensión de la dinámica de la circulación atmosférica, junto con el nacimiento del cálculo digital y de las tecnologías de telecomunicación, se anunció la aparición del nuevo campo de la predicción numérica del tiempo. El beneficio social de estos descubrimientos científicos e innovaciones tecnológicas se pone de manifiesto en la rutina diaria actual y en las predicciones meteorológicas semanales.

Hoy en día, como consecuencia de los avances experimentados en la ciencia climática durante los últimos treinta años, estamos siendo testigos de grandes progresos en nuestra capacidad de pronosticar la variabilidad comprendida entre márgenes estacionales e interanuales en el clima de la Tierra y de predecir el cambio climático con arreglo a escalas temporales centenarias en las principales regiones del mundo. De cara al futuro, nos encontramos en el principio de una nueva era de predicción del comportamiento asociado al sistema terrestre con un gran potencial para poder hacer frente a la necesidad de la sociedad mundial, ávida de información climática y medioambiental relacionada con períodos que pueden abarcar entre días y semanas, años y décadas o incluso más prolongados. La coordinación y la colaboración entre las naciones de todo el mundo han sido y seguirán siendo el sello de ese progreso.

1 Director del Centro interdisciplinar de ciencias del sistema terrestre, Universidad de Maryland, College Park (EEUU)

2 Director del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas, OMM

El Programa Mundial de Investigaciones Climáticas (PMIC) se creó en 1980 bajo el patrocinio conjunto de la OMM y del Consejo Internacional para la Ciencia (CIUC) y, desde 1993, también de la Comisión Oceanográfica Intergubernamental (COI) de la UNESCO. Los objetivos principales del PMIC desde sus inicios han sido determinar la posibilidad de predicción del clima y establecer el efecto de las actividades humanas sobre el mismo. Estos objetivos fundamentales han sentado las bases para la adaptación de la sociedad actual y las estrategias de reacción para la mitigación ante los cambios del clima. Gracias a los esfuerzos del PMIC, ahora los científicos climáticos tienen la posibilidad de vigilar, simular y predecir el clima a nivel mundial, de tal forma que la información climática puede emplearse para tareas de gobierno, en procesos de toma de decisiones y como elemento de apoyo de un amplio abanico de aplicaciones prácticas.

Durante estos treinta años han aparecido nuevas disciplinas asociadas a la ciencia climática que han ido más allá de los campos tradicionales de la atmósfera, el océano y las ciencias de la Tierra, y han desembocado en predicciones climáticas rutinarias que abarcan el ámbito estacional y el interanual, así como en pronósticos relacionados con el clima a más largo plazo. En paralelo a estos estudios de fluctuaciones naturales del sistema climático acoplado, el desarrollo de modelos climáticos acoplados del PMIC, impulsado por los cambios en el forzamiento radiativo de las emisiones de gases de efecto invernadero, ha permitido la posibilidad de contar con pronósticos sobre el cambio climático que han servido para apuntalar las evaluaciones del Grupo Intergubernamental

de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) y del programa de las Naciones Unidas sobre evaluación del agotamiento y la recuperación del ozono atmosférico.

Logros del pasado

La ciencia climática moderna empezó con la creación de modelos numéricos de circulaciones oceánicas y atmosféricas en las décadas de 1950 y 1960, que estaban basados en elementos físicos. En los años 60 y 70, las observaciones procedentes de los nuevos satélites terrestres en órbita, aparentemente como elemento de apoyo para la predicción meteorológica, comenzaron a ofrecer una perspectiva sin precedentes de la Tierra como un sistema interconectado compuesto por atmósfera, océanos, continentes y vida, así como por cambios temporales en este sistema mucho más prolongados que los de los fenómenos meteorológicos cotidianos.

La primera perspectiva a nivel global de la circulación atmosférica de la Tierra y del sistema climático permitió la elaboración de estudios climáticos a escala mundial y la identificación de los importantes procesos físicos del sistema climático. La idea de un programa internacional de investigación acerca del cambio climático tomó forma en el VIII Congreso Meteorológico Mundial celebrado en mayo de 1979, en el cual se creó formalmente el PMIC, incluyendo un componente de investigación climática (que debía ser gestionado de forma conjunta por la OMM y el CIUC), así como actividades de recopilación, gestión y aplicación de datos climáticos, además de la evaluación de los posibles impactos del cambio climático (aspecto que debería ser gestionado por el Programa de las Naciones Unidas para el

Medio Ambiente (PNUMA)). Desde el principio, el PMIC ha tenido dos focos de atención principales: la predictibilidad del clima y la influencia del ser humano.

El PMIC identificó la complejidad científica y la amplitud del sistema climático: el Plan científico para el programa, elaborado en 1984, reconocía claramente el papel de la radiación, la nubosidad, el océano, el ciclo hidrológico y la biosfera. Los océanos, las superficies terrestres, la criosfera y la biosfera tenían la necesidad de ser representados de forma realista en los modelos climáticos a escala global. Los grandes progresos alcanzados en los modelos y en la experimentación numérica requerían el análisis de la sensibilidad del clima ante los cambios en las concentraciones de dióxido de carbono atmosférico (así como de otros gases y aerosoles). Los primeros trabajos sobre la evaluación relativos a la investigación de los efectos del dióxido de carbono en el clima ya previeron las necesidades del IPCC. A la vista del papel fundamental de los océanos en el sistema climático, se estableció una estrecha colaboración con la comunidad oceanográfica, con el COI como copatrocinador del PMIC en 1993.

La primera iniciativa de modelo acoplado atmósfera-océano del PMIC, el Programa sobre los océanos tropicales y la atmósfera mundial (TOGA), se inició en 1984. El proyecto TOGA se encargaba de investigar la influencia de las inercias térmicas de variación lenta de los océanos tropicales sobre la circulación atmosférica a gran escala. La admisión de una escala temporal más prolongada o de la memoria inherente a los océanos permitió la predicción climática a corto plazo más allá del tiempo que se podía determinar a través de un pronóstico meteorológico diario. La necesidad de que las observaciones oceánicas iniciaran predicciones acopladas sentó las bases del prototipo del sistema de observación del océano que se encuentra vigente en la actualidad.

Durante el decenio asociado al proyecto TOGA, las observaciones rutinarias de la interacción aire-mar y de la estructura térmica de la capa superior del océano se ofrecían en tiempo real a través de la red TAO (Observación océano-atmósfera en los mares tropicales). Desde entonces, estas observaciones efectuadas mediante boyas se han mantenido en el Pacífico y se han ampliado a los océanos Atlántico e Índico, creando así una base sólida para el sistema de observación del océano con el que contamos en la actualidad.

La asimilación de datos oceánicos se reveló como un elemento fundamental de cara al inicio de predicciones climáticas desde estacionales a interanuales. En muchos de los principales centros de predicción meteorológica del mundo (Figura 1) se desarrollaron modelos de predicción acoplados océano-atmósfera, lo que condujo a grandes avances de carácter fundamental en predicciones climáticas estacionales basadas en observaciones, en la comprensión y en la modelización de las anomalías a nivel mundial en la circulación atmosférica y en los patrones de temperatura y precipitación vinculados a El Niño a través de teleconexiones. Este fue el principio del concepto de productos y servicios climáticos.

Además, el enfoque general de la ciencia climática evolucionó durante el desarrollo del proyecto TOGA. Antes de este, entre principios y mediados de los años 80, los oceanógrafos y meteorólogos solían encontrarse en comunidades distintas e independientes. Estas comunidades se unieron, como parte del programa TOGA, para dar forma a una nueva disciplina de ciencia climática a través de la que se pudo establecer que existen modos de variabilidad que tienen lugar en el sistema acoplado océano-atmósfera que no se dan en el océano o en la atmósfera como elementos por separado.

Del mismo modo que el proyecto TOGA dejó tras de sí un legado sobre el cual pudo establecerse el progra-

ma posterior de variabilidad y predictibilidad del clima (CLIVAR), el Experimento mundial sobre la circulación oceánica (WOCE) del PMIC también creó una buena base para poder estudiar el papel desempeñado por el océano en el clima. El WOCE fue el programa de investigación oceánica a nivel mundial de mayores dimensiones y que cosechó más éxitos que jamás se haya llevado a cabo. Entre 1990 y 1997, el WOCE logró recopilar datos oceanográficos de una calidad y cobertura sin precedentes. Estos datos, aportados por más de treinta naciones, resultaron vitales en el desarrollo de modelos oceánicos a escala de cuenca, y han servido para dar forma a nuestra comprensión actual de los procesos de mezcla relacionados con la energía y los nutrientes en los océanos. El WOCE dejó una huella importante en nuestro conocimiento de los océanos de todo el mundo, de los cambios en la tecnología empleada por los oceanógrafos, y de los cambios generales en los métodos científicos destinados a la investigación oceánica. Durante el desarrollo del programa WOCE se obtuvo una perspectiva global de la naturaleza variable con el paso del tiempo de los océanos del mundo, desde la superficie hasta el fondo.

La idea de una circulación oceánica general constante o de un enfoque "instantáneo" de cara a observar el océano fue rebatida a través de las secciones de repetición del estudio hidrográfico mundial del WOCE, que estableció una referencia para evaluar los cambios en el tiempo y valo-

El Niño 1997/1998 Predicciones estacionales

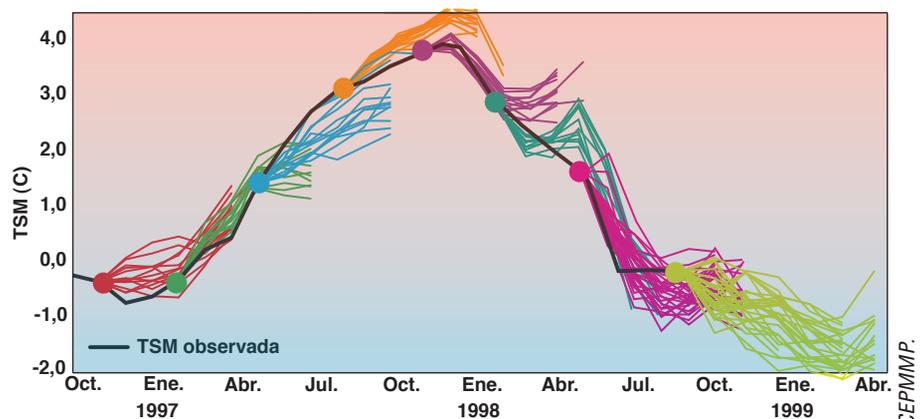


Figura 1 — La constatación de predicciones ENOA satisfactorias, como la que se muestra en este caso para el episodio de 1997/1998, ha sido posible gracias a intensos esfuerzos de investigación llevados a cabo en el campo de la predicción estacional. La base física para comprender y pronosticar las señales de temperatura de El Niño y los cambios asociados en la circulación atmosférica mundial con una anticipación de una estación a un año se estableció durante el proyecto del PMIC en el Programa sobre los océanos tropicales y la atmósfera mundial (TOGA, 1985-1994).

rar los efectos de naturaleza antropogénica sobre la circulación oceánica a nivel mundial. En asociación con el Estudio conjunto de los flujos oceánicos mundiales de Estados Unidos, fue posible realizar un estudio químico relacionado con el dióxido de carbono y la traza. Los estudios de procesos a nivel regional y las campañas de observación debidamente enfocadas mejoraron nuestro conocimiento del Océano Austral, de la estructura de las aguas profundas en los mares del Labrador y del área de Groenlandia, Islandia y Noruega y, además, ayudaron a ahondar en nuestro conocimiento de la circulación termohalina y del transporte meridional de calor desde el ecuador hacia el polo.

Los avances en la tecnología oceánica desempeñaron un papel fundamental a la hora de posibilitar una perspectiva oceánica a nivel mundial. Gracias a los sistemas altimétricos radar de teledetección a bordo de los satélites europeos y TOPEX/POSEIDON resultó posible llevar a cabo observaciones continuas de la altura de la superficie del mar de todo el planeta. Los sensores activos y pasivos de microondas a bordo de los satélites suministraron todos los datos acerca de la velocidad del viento sobre la superficie del océano, para todas las condiciones meteorológicas imperantes, mientras que la mejora en la instrumentación y en su calibrado permitió adquirir una mayor precisión en la capacidad de medición del flujo aire-mar desde plataformas situadas tanto en buques como en boyas. Dentro del océano, a partir del programa de boyas del WOCE se llegó al programa ARGO y al concepto de despliegue mundial de boyas perfiladoras. Algunos dispositivos experimentales, como los planeadores, pusieron de manifiesto el potencial existente para desarrollar secciones de repetición en áreas oceánicas históricamente complicadas de observar, como es el caso de aquellas donde se producen las corrientes en el límite occidental.

En la actualidad existen modelos oceánicos globales, iniciados por el Esfuerzo de modelización colectiva del WOCE e impulsados por los avances experimentados en la tecnología informática, que pueden determinar la existencia de corrientes energéticas límite y sus procesos de inestabilidad asociados, así como establecer una descripción coherente desde una perspectiva dinámica sobre muchos aspectos observados de la circulación oceánica que contribuyen a comprender el papel desem-

peñado por los océanos en el seno del sistema climático de la Tierra. El WOCE también cambió la forma de estudiar el papel del océano en el clima por parte de la comunidad científica. La idea de una síntesis oceánica donde las observaciones in situ y/o por teledetección se reúnen a través de metodologías de asimilación de datos revolucionó el enfoque de la oceanografía a nivel mundial. Las observaciones oceánicas globales en tiempo real han apuntado hacia la posibilidad de desarrollar una oceanografía operativa a escala mundial, tema importante que se tratará en la próxima Conferencia sobre observación de los océanos de 2009 (Venecia, Italia, septiembre de 2009). En este momento nos encontramos en el punto de que el equivalente oceanográfico de una Vigilancia Meteorológica Mundial no solo no es un disparate limitado por la logística, sino que, de hecho, está a punto de convertirse en realidad.

Actividades actuales

Otras iniciativas importantes del PMIC fueron el Proyecto internacional para elaborar una climatología de las nubes mediante datos satelitales desarrollado en 1982, la recopilación de un conjunto de datos asociados al balance de radiación de superficie desde 1985 y el Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones en 1985. Estas iniciativas estaban basadas en apasionantes técnicas de nueva creación, desarrolladas para combinar de forma óptima las observaciones efectuadas in situ y por teledetección, ofreciendo por primera vez nuevas perspectivas

acerca del papel desempeñado por las nubes en el sistema climático y de la interacción de las nubes tanto con la radiación como con el ciclo hidrológico. Estas actividades sirvieron como punto de partida para el exhaustivo Experimento mundial sobre la energía y el ciclo hídrico (GEWEX), creado en 1988 y que, aún hoy en día, sigue constituyendo uno de los principales experimentos a nivel mundial relacionados con la energía y el ciclo del agua. Como tal, el GEWEX lidera los estudios del PMIC relacionados con la dinámica y termodinámica de la atmósfera, las interacciones de la atmósfera con la superficie de la Tierra (especialmente sobre la superficie sólida) y el ciclo mundial del agua. El objetivo del GEWEX es reproducir y pronosticar, mediante las observaciones y los modelos adecuados, las variaciones del régimen hidrológico mundial, su impacto sobre la dinámica atmosférica y de la superficie, y las variaciones en los procesos hidrológicos regionales y en los recursos hídricos, así como su respuesta ante los cambios en el entorno, como por ejemplo el aumento en la concentración de gases de efecto invernadero.

El GEWEX se esfuerza por ofrecer una mejora en orden de magnitud con respecto a la capacidad de dar forma a modelos mundiales de precipitación y evaporación, además de tratar de evaluar de forma precisa la realimentación existente entre la radiación atmosférica, las nubes, el uso de la tierra y el cambio climático. Hasta la fecha, el GEWEX ha confeccionado modelos climáticos hidrológicos regionales relativos a la superficie terrestre, en alta resolución

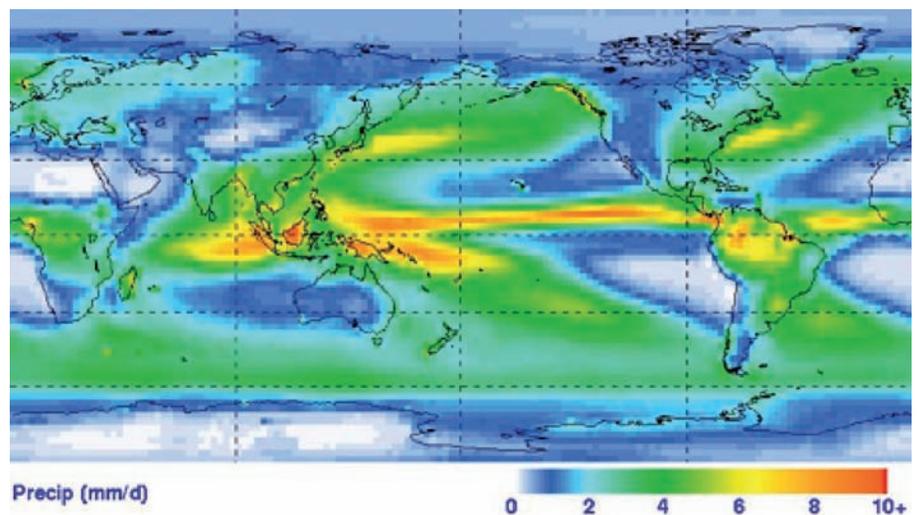


Figura 2 — Producto combinado de precipitaciones medidas por satélite, desarrollado por el Proyecto mundial de climatología de las precipitaciones (GPCP) del GEWEX, promediado para el período de 30 años comprendido entre 1979 y 2008, en mm por día. Datos por cortesía de GEWEX/GPCP; imagen de David Bolvin (SSAI), 5 de junio de 2009, NASA/Centro de vuelos espaciales Goddard, Greenbelt, MD.

y de última generación, mejorando las parametrizaciones y aplicándolas de cara a obtener predicciones experimentales. El proyecto GEWEX ha desarrollado conjuntos de datos mundiales sobre nubes, radiación, precipitación y otros parámetros, cuyo valor es incalculable a efectos de la comprensión y predicción de los procesos relacionados con los ciclos hidrológicos y energéticos mundiales, así como de cara a su representación adecuada en los modelos del sistema climático (Figura 2). Los estudios de modelización y los experimentos coordinados sobre el terreno han identificado procesos y condiciones fundamentales sobre la superficie terrestre que contribuyen de forma más significativa a aumentar la posibilidad de predecir las precipitaciones. El programa GEWEX está desarrollando sistemas de asimilación de datos de la superficie terrestre que permitirán resolver las características de la superficie con resoluciones tan pequeñas que pueden llegar a 1 km, lo que será de enorme valor en estudios y evaluaciones de la variabilidad del clima y el cambio climático a nivel regional.

El programa de Variabilidad y predictibilidad del clima (CLIVAR), creado en 1995, es la principal herramienta del PMIC para llevar a cabo estudios relacionados con la variabilidad climática. Monzones, El Niño/Oscilación Austral y otros fenómenos de acoplamiento entre la atmósfera y el océano a nivel mundial son investigados por el CLIVAR con arreglo a escalas temporales estacionales, interanuales, decenales y seculares. El CLIVAR se establece y progresa a partir de los resultados de los proyectos TOGA y WOCE del PMIC, completados de forma satisfactoria, además de examinar la detección y atribución del cambio climático antropogénico basándose en registros climáticos de alta calidad.

Su misión es observar, simular y predecir el comportamiento del sistema climático de la Tierra, centrándose en las interacciones entre los océanos y la atmósfera, de forma que se facilite la mejora del conocimiento sobre la variabilidad, la predictibilidad y el cambio asociados al clima, lo que redundará en beneficio de la sociedad y del entorno en que vivimos. CLIVAR trata de fomentar el análisis de las observaciones asociadas a las variaciones del clima y al cambio climático con arreglo a escalas temporales de estacionales a seculares, e incluso mayores. Colabora estrechamente con el GEWEX en el estudio y predicción en última instancia de los sistemas monzónicos por todo el mundo, además

de promover y ayudar a coordinar los estudios de observación de los procesos climáticos, especialmente para el océano, aunque también en áreas terrestres bajo la influencia del monzón, posibilitando así que la información de retorno contribuya a mejorar los modelos.

CLIVAR alienta el desarrollo de un sistema continuo de observación de los océanos a nivel tanto regional como mundial. En colaboración con otros proyectos del PMIC, está centrándose en particular en comprender y predecir el comportamiento acoplado de la atmósfera, que cambia rápidamente, y la variación más lenta de la superficie terrestre, los océanos y las masas de hielo cuando responden a procesos naturales, a influencias del ser humano o a cambios en la química y la biota de la Tierra; además, CLIVAR también está tratando de perfeccionar los cálculos relacionados con el cambio climático antropogénico y con nuestro conocimiento de la variabilidad climática.

CLIVAR ofrece aportaciones científicas a los temas interdisciplinarios del PMIC acerca de la predicción estacional y decenal, así como (con GEWEX) sobre los monzones y los extremos climáticos. También colabora con los temas relacionados con el cambio climático de naturaleza antropogénica, la química atmosférica (con los Procesos estratosféricos y su función en el clima (SPARC)), la variabilidad y el cambio del nivel del mar (con el proyecto Clima y la criosfera (Clic)) y temas climáticos interdisciplinarios de naturaleza científica. Los logros del programa CLIVAR incluyen el desarrollo de un mayor conocimiento y una mejor predicción de la variabilidad del clima y el cambio climático.

CLIVAR ha permitido coordinar los experimentos sobre escenarios de modelos climáticos para el IPCC, además de ofrecer datos fundamentales acerca de cambios en los extremos climáticos para su inclusión en el cuarto Informe de evaluación del IPCC. Las actividades de comparación entre modelos, destinadas a mejorar las predicciones estacionales y el rendimiento de los modelos oceánicos, han estado encabezadas por CLIVAR. El estudio del papel de los océanos en el clima ha supuesto uno de los pilares fundamentales en la coordinación de los estudios de campo destinados a mejorar los esquemas de parametrización de los modelos climáticos asociados a la atmósfera y al océano, así como la síntesis de datos oceánicos y el apoyo a las observaciones oceánicas en tiempo real y

a las observaciones de alta calidad en modo diferido para las operaciones e investigaciones oceánicas.

CLIVAR ha organizado importantes seminarios de formación en materia de predicción estacional en África, impactos climáticos sobre los ecosistemas oceánicos, datos y extremos climáticos, y El Niño/Oscilación Austral. Un ejemplo concreto puede ser el desarrollo de un atlas climático electrónico de África como herramienta para el estudio del clima africano.

Desde 1993, el papel que desempeña la estratosfera en el sistema climático de la Tierra ha sido centro de atención del proyecto del PMIC sobre SPARC. El programa SPARC se dedica a estudiar los procesos dinámicos, radiativos y químicos de la atmósfera, y entre las actividades que organiza se incluyen el establecimiento de una climatología estratosférica de referencia y la mejora del conocimiento de las tendencias relacionadas con la temperatura, el ozono y el vapor de agua en la estratosfera. Otros temas de los que se está ocupando en la actualidad son los procesos de ondas de gravedad, su papel en la dinámica estratosférica y la forma en que pueden caracterizarse en los modelos.

El estudio de las interacciones entre la estratosfera y la troposfera ha llevado a un nuevo conocimiento de los cambios de las temperaturas troposféricas iniciados desde la estratosfera. El programa SPARC ha organizado simulaciones y análisis de modelos, que constituían el elemento fundamental de las Evaluaciones científicas de la OMM y el PNUMA del agotamiento y ahora recuperación del ozono (Figura 3). Los científicos asociados al programa SPARC han sido miembros del Comité directivo de evaluación de la OMM y el PNUMA en calidad de autores principales o colaboradores, y revisores. Además, entre los exhaustivos informes del SPARC revisados por iguales se incluyen: "Tendencias en la distribución vertical del ozono", "Vapor de agua en la troposfera superior y en la estratosfera", "Intercomparación de las condiciones climatológicas en la capa media de la atmósfera" y "Propiedades de los aerosoles estratosféricos". Los investigadores del PMIC también han aportado gran parte de la base científica relacionada con los protocolos sobre el ozono y los escenarios de emisión de dióxido de carbono y aerosoles empleados por la Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC).

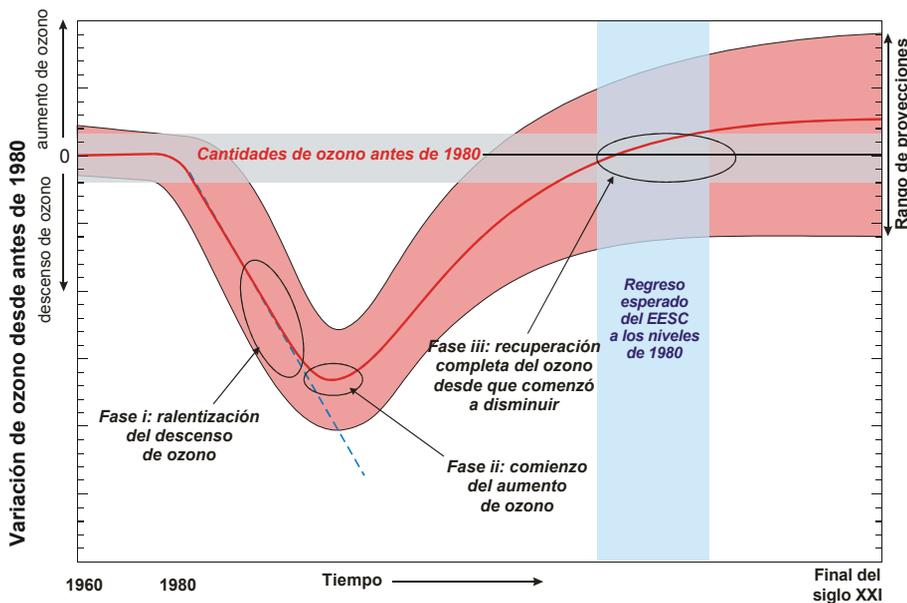


Figura 3 — A través de su proyecto sobre Procesos estratosféricos y su función en el clima (SPARC), los científicos del PMIC han pertenecido al Grupo científico de evaluación del agotamiento del ozono de la OMM y el PNUMA en calidad de autores principales o colaboradores, y revisores. El diagrama esquemático muestra la evolución temporal de las cantidades mundiales de ozono observadas y esperadas. Fuente de la imagen: Grupo científico de evaluación del agotamiento del ozono en 2006 de la OMM y el PNUMA.

En 1993, el Estudio del sistema climático del Ártico (ACSYS) abrió una perspectiva polar con el análisis de los procesos fundamentales en la región ártica que desempeñan un importante papel en el clima mundial.

El alcance de este estudio se amplió a la totalidad de la criosfera mundial con la creación del proyecto Clima y la criosfera (CliC) en el año 2000. Este proyecto surgió con el fin de fomentar, apoyar y coordinar la investiga-

ción relativa a los procesos a través de los cuales la criosfera interactúa con el resto del sistema climático. La criosfera comprende las regiones heladas del planeta e incluye capas de hielo, glaciares, casquetes glaciares, icebergs, hielo marino, cubierta de nieve y precipitación de nieve, permafrost y terrenos helados de forma estacional, así como el hielo formado en lagos y ríos. Como componente sensible del sistema climático, la criosfera ofrece indicadores clave del cambio climático (por ejemplo, elevación del nivel del mar, Figura 4), mientras que el proyecto CliC se centra en identificar los patrones y los ritmos de cambio de los parámetros criosféricos. Este proyecto abarca cuatro temas, que cubren las siguientes áreas relacionadas con el clima y la ciencia de la criosfera: la criosfera terrestre y la hidrometeorología de las regiones frías; las masas de hielo y el nivel del mar; la criosfera marina y el clima; y la predicción mundial de la criosfera.

El programa CliC ha realizado sólidas aportaciones desde la comunidad de investigación climática al programa científico del Año polar internacional 2007-2008, entre las que se incluyó el concepto de imagen instantánea de un satélite polar, cuyo fin no era otro que obtener una cobertura sin precedentes de las dos regiones polares. El CliC fue uno de los programas científicos clave a la hora de atraer hacia la criosfera la atención de la comunidad científica internacional. Por primera vez se redactó un capítulo dedicado a la nieve, el hielo y el suelo congelado en el cuarto Informe de evaluación del IPCC y, tal y como se detallaba en el mismo, en la actualidad se conoce, con una precisión considerablemente mayor, la aportación de agua procedente del deshielo al reciente cambio en el nivel del mar.

El desarrollo y evaluación de los modelos climáticos mundiales supone un importante componente unificador del PMIC, ya que contribuye a obtener avances científicos y técnicos en las actividades más orientadas hacia la disciplina en cuestión. Estos modelos constituyen la herramienta fundamental para comprender y predecir las variaciones naturales del clima, así como para ofrecer predicciones fiables relativas al cambio climático natural y antropogénico. Los modelos también proporcionan un medio fundamental de explorar y sintetizar, de forma sinérgica, todos los datos atmosféricos, oceanográficos, criosféricos y relativos a la superficie terrestre, recopilados mediante el PMIC y otros programas, que pudie-

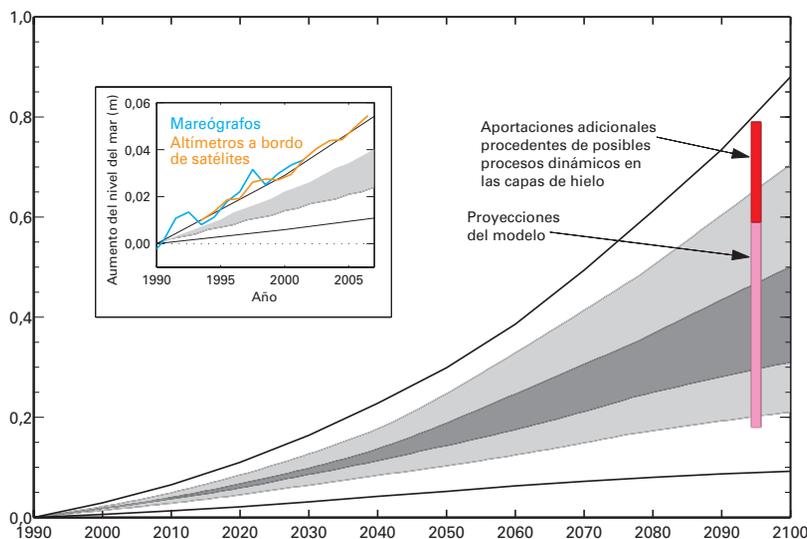


Figura 4 — El conocimiento y la comprensión del clima que obtenemos a partir de la investigación tienen que ponerse a disposición de los responsables de adoptar decisiones de una forma abierta y coordinada, a fin de resultar beneficiosos para la sociedad humana y para el medio ambiente. Por ejemplo, las evaluaciones de vulnerabilidad de los asentamientos costeros y de las regiones de poca altitud, como es el caso de las islas del Pacífico y otros estados insulares propensos a sufrir un aumento del nivel del mar, están basadas en el incremento proyectado y reconstruido del nivel del mar para el siglo XXI (en metros). En la actualidad, una nueva actividad del PMIC encuadrada en el seno del proyecto Clima y la criosfera (CliC) se centra en evaluar la aportación mundial de los casquetes de hielo y de los glaciares sobre el nivel del mar. Fuente de la imagen: modificada y actualizada por J. Church, basada en Church et al., 2001, en el cuarto Informe de evaluación del IPCC.

ran resultar relevantes. El Grupo de trabajo sobre experimentación numérica (GTEN), patrocinado de forma conjunta por el PMIC y por la Comisión de Ciencias Atmosféricas (CCA) de la OMM, encabeza el desarrollo de modelos atmosféricos tanto para estudios climáticos como de cara a la predicción numérica del tiempo.

El programa de modelización del PMIC ha llevado a cabo una aportación sustancial a las cuatro evaluaciones publicadas por el IPCC y, una vez más, sigue contribuyendo ante la próxima serie de evaluaciones del IPCC. El Grupo de trabajo del PMIC sobre modelización acoplada (WGCM) lidera el desarrollo de los modelos acoplados de océano, atmósfera y superficie terrestre que se emplean en estudios climáticos correspondientes a escalas temporales más largas. El WGCM también sirve de enlace del PMIC con el proyecto de Análisis, integración y modelización del sistema terrestre, perteneciente al Programa internacional geosfera-biosfera (PIGB), y con el IPCC. Las actividades en este campo se centran en la identificación de errores en las simulaciones de los modelos climáticos y en la búsqueda de los medios para reducirlos a través de la organización de experimentos coordinados de modelos de acuerdo con unas condiciones normalizadas. Bajo los auspicios del PMIC, el Proyecto de intercomparación de modelos atmosféricos ha facilitado simulaciones controladas mediante treinta modelos atmosféricos diferentes y en unas condiciones determinadas. La comparación de los resultados con las observaciones ha puesto de manifiesto la capacidad con la que cuentan algunos modelos para representar de forma adecuada estados estacionales medios y la variabilidad interanual a gran escala.

Además, el WGCM ha iniciado una serie de Proyectos de intercomparación de los modelos acoplados (CMIP). En 2005, el PMIC facilitó la recopilación, archivo y acceso a todas las simulaciones de modelos climáticos mundiales llevadas a cabo para el cuarto Informe de evaluación del IPCC. Esta tercera fase del CMIP (CMIP3) conllevó una serie sin precedentes de experimentos coordinados sobre el cambio climático: se desarrollaron durante los siglos XX y XXI y procedían de 16 grupos situados en 11 países, abarcando un total de 23 modelos climáticos mundiales acoplados. Se recopilaron alrededor de 31 terabytes de datos de modelos en el Programa sobre diagnóstico y comparación de modelos climáticos. Los datos de los modelos son de li-

bre acceso y ya han sido consultados por más de 1 200 científicos, que han publicado más de 200 documentos revisados por pares hasta la fecha.

En junio de 2007 se celebró, en Barcelona (España), el primer Cursillo sobre predicción estacional del PMIC, reuniendo a investigadores climáticos, predictores y expertos en aplicaciones para abordar la situación actual de la predicción estacional y su aplicación para los responsables de adoptar decisiones. Los participantes en el Cursillo formularon recomendaciones e identificaron las mejores prácticas de la ciencia de la predicción estacional. Durante el Cursillo se lanzó el Proyecto de predicciones históricas del PMIC relativas al sistema climático, que supone un marco experimental multimodelo y multiinstitucional encaminado a evaluar los sistemas más avanzados de predicción estacional y a valorar el potencial de la predictibilidad no explotada debido a las interacciones de los componentes del sistema climático que, en la actualidad, no se explican del todo en las predicciones estacionales.

La Cumbre mundial sobre modelización para la predicción del clima, patrocinada conjuntamente por el PMIC, el PIGB y el Programa Mundial de Investigación Meteorológica de la OMM (del 6 al 8 de mayo de 2008, Reading, Reino Unido) se organizó para desarrollar una estrategia que revolucionara la predicción del clima durante el siglo XXI, a fin de contribuir a abordar la amenaza del cambio climático. Una de las principales conclusiones de la Cumbre fue la identificación indiscutible de que nuestra capacidad como comunidad investigadora dedicada a llevar a cabo la transición de los estudios de variabilidad climática y cambio climático mundiales a su aplicación regional presenta una gran cantidad de ramificaciones para los modelos climáticos actuales y futuros, así como para las observaciones e infraestructuras necesarias, como por ejemplo el cálculo electrónico de alto rendimiento.

A lo largo de su historia, el PMIC ha interactuado a muy alto nivel con muchos grupos relacionados con el clima y con la investigación climática, y ha colaborado ampliamente con otras organizaciones científicas internacionales en aspectos relacionados con la investigación climática que implican a la biogeoquímica y a la física. En los proyectos GEWEX, SPARC y CLIVAR pueden encontrarse múltiples ejemplos de colaboración activa entre el PMIC y el PIGB. Además, el PMIC apoyó firmemente

la creación del Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC) por parte de la OMM en 1992, en colaboración con el CIUC, el PNUMA y la COI. Asimismo, el PMIC es uno de los copatrocinadores del Sistema internacional de análisis, investigación y capacitación (START) sobre el cambio global, que fomenta las posibilidades en materia de investigación medioambiental en los países en vías de desarrollo. En 2001, las proyecciones de un posible cambio climático en el futuro y de las variaciones en aumento en el clima espolearon la creación de la Asociación científica del sistema terrestre entre el PMIC, el PIGB, el Programa internacional sobre las dimensiones humanas y el Programa internacional de la ciencia de la diversidad biológica (DIVERSITAS). Esta asociación promueve un enfoque coordinado sobre cuestiones de importancia mundial que suelen ser objeto de preocupación común, como por ejemplo el balance del carbono, los sistemas alimentarios, los sistemas hídricos y la salud humana, así como otros temas similares que resultan importantes para las actividades humanas y que podrían verse afectados por un posible cambio climático en el futuro y por un aumento de la variabilidad del clima.

Desafíos y oportunidades del futuro

De cara al futuro, el marco estratégico del PMIC para el período comprendido entre 2005 y 2015 pretende facilitar el análisis y la predicción de la variabilidad y el cambio del sistema terrestre, de cara a su utilización en un abanico mayor de aplicaciones prácticas de relevancia, beneficio y valor directo para la sociedad. Un aspecto fundamental de este marco estratégico va en la dirección de lograr una predicción impecable del tiempo, el clima y, en última instancia, la totalidad del sistema terrestre. Existen muchas razones teóricas y prácticas para que la comunidad meteorológica y climática se esfuerce en perseguir este enfoque a fin de establecer una perspectiva sin fisuras o unificada con respecto a la predicción medioambiental.

La extensión de la predicción climática a una predicción medioambiental con mayor capacidad de abarcadura requiere, ante todo, admitir que el sistema climático está vinculado de forma inextricable a la biogeoquímica de la Tierra y a las actividades del ser humano. Para que el PMIC pueda lograr sus objetivos de comprensión

y predicción de la variabilidad y el cambio climáticos y de sus efectos sobre la sociedad en general, el Programa deberá participar en estudios del sistema terrestre plenamente integrado, y así lo hará.

El desarrollo de un enfoque unificado hacia la predicción meteorológica, climática, hidrológica y medioambiental requiere una ampliación de la perspectiva sobre el sistema terrestre que vaya más allá de las disciplinas tradicionales de las ciencias atmosféricas. El desarrollo de la predicción climática y, en última instancia, de la predicción medioambiental no es una ampliación rutinaria de la predicción numérica del tiempo. Por ejemplo, las disciplinas científicas necesarias para apoyar la predicción meteorológica, climática y medioambiental a través de estas escalas temporales abarcan la meteorología, la química atmosférica, la hidrología, la oceanografía y los ecosistemas marinos y terrestres.

Mientras que la predicción atmosférica inmediata y la predicción meteorológica de muy corto plazo son, fundamentalmente, problemas de valores iniciales, la ampliación a una predicción meteorológica de corto, medio y más largo plazo comienza a introducir el acoplamiento de procesos en superficie y el papel asociado a la realimentación de la humedad del suelo y otros procesos que ocurren entre la superficie terrestre y la atmósfera. La predicción de largo plazo a través de la predicción climática estacional implica un acoplamiento entre la atmósfera y el océano con las condiciones iniciales de la memoria inherente a la capa superior del océano, dando lugar a una capacidad de predicción asociada a un tiempo de antelación más prolongado.

La predicción climática decenal viene determinada tanto por los valores iniciales como por el forzamiento en el valor límite. En estas escalas temporales, la información correspondiente a las capas oceánicas más profundas y los cambios en el forzamiento radiativo a consecuencia de los gases de efecto invernadero y los aerosoles desempeñan un papel fundamental. A la hora de tener en cuenta proyecciones climáticas de interdecenales a seculares no solo han de tomarse en consideración las futuras concentraciones de gases de efecto invernadero, sino también los cambios en la cubierta terrestre y en la vegetación dinámica así como el secuestro del carbono, gobernado por los ecosistemas marino y terrestre. Además, será necesario contar

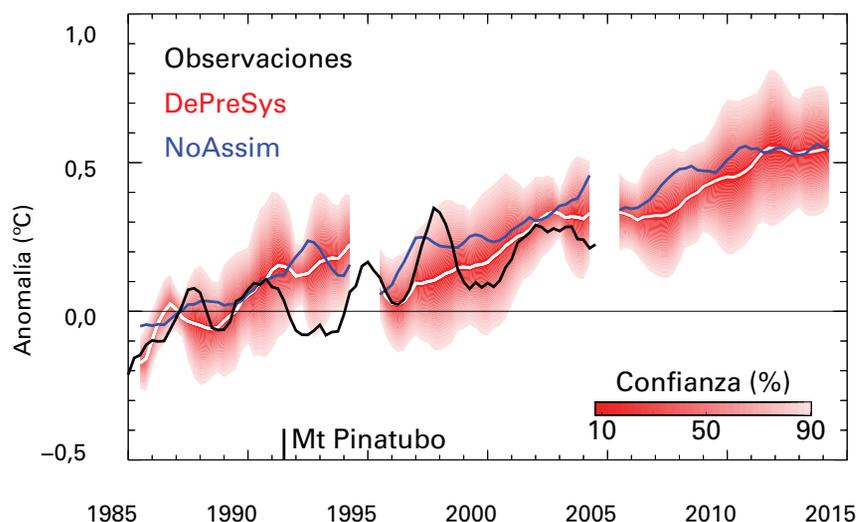


Figura 5 — Promedio mundial de la predicción de la anomalía de la temperatura media anual de la superficie de la Tierra (1979-2001) efectuada por el sistema de predicción decenal del Servicio Meteorológico del Reino Unido (DePreSys) con inicio en junio de 2005. El intervalo de confianza (sombreado rojo) se ha diagnosticado a partir de la desviación típica de la media del conjunto DePreSys (curva blanca). La curva azul es una predicción equivalente sin inicio en términos de observaciones. La curva negra corresponde al retroanálisis que comienza en junio de 1985 junto con las observaciones. Fuente: Smith et al. (2008, Science 317).

con información predictiva concreta a escala regional a lo largo de estas escalas temporales para determinar parámetros medioambientales como la calidad del aire y del agua.

Uno de los principales desafíos del PMIC es establecer los límites de la predictibilidad en la escala temporal decenal. Dentro del concepto de un conjunto unificado de predicciones, el pronóstico decenal sirve para reducir la brecha existente entre la predicción de la variabilidad y el cambio climáticos en períodos de estacionales a interanuales y las proyecciones de cambio climático influidas por agentes externos a lo largo de períodos muy prolongados, por ejemplo durante un siglo. La comunidad dedicada al estudio del cambio climático suele centrarse en el problema de determinar el cambio climático inducido de forma antropogénica con arreglo a escalas temporales seculares. Para esta comunidad, el disponer de unas condiciones iniciales precisas no supone una gran preocupación, ya que el nivel de predictibilidad del primer tipo se considera pequeño en escalas del orden de siglos.

En contraste, aunque la comunidad dedicada a la predicción numérica del tiempo y a la predicción estacional cuenta con esquemas de asimilación de datos bien desarrollados para determinar las condiciones iniciales, los modelos no incorporan muchos de los procesos criosféricos

y biogeoquímicos que se consideran importantes en escalas temporales de siglos. Un enfoque sobre la predicción decenal por parte de los dos grupos podría ayudar a agilizar el desarrollo de esquemas de asimilación de datos en modelos del sistema terrestre y el uso de este tipo de modelos para la predicción a un plazo más corto, como el estacional. Por ejemplo, las predicciones estacionales pueden utilizarse para calibrar las proyecciones probabilísticas relativas al cambio climático en un sistema de predicción sin fisuras. Así pues, existe una base común sobre la que establecer una colaboración entre las dos comunidades con el fin de desarrollar predicciones perfectas.

Durante los últimos veinte años, el vínculo existente entre los intentos de modelización y observación del PMIC han sido los reanálisis atmosféricos, que han mejorado sobremedida nuestra capacidad de analizar la variabilidad climática del pasado. La tercera Conferencia internacional sobre reanálisis del PMIC se celebró en Tokio, del 28 de enero al 1 de febrero de 2008, y su objetivo no era otro que presentar los resultados del progreso en productos de reanálisis y en el campo de la investigación, así como debatir los objetivos y mejoras de cara al futuro. El registro climático se elabora a partir de análisis de observaciones efectuadas con muchos otros fines, como por ejemplo la predicción meteorológica en la at-

mósfera o de cara a la investigación oceanográfica fundamental. En la actualidad se admite que sólo puede comprenderse el clima mundial si se llevan a cabo observaciones en la atmósfera, el océano y la superficie terrestre, incluida la criosfera, relativas a la calidad del clima.

Una consecuencia de las prácticas llevadas a cabo en el pasado es que el registro climático, con frecuencia, muestra ciertos sesgos que ocultan las variaciones a largo plazo. Muchos conjuntos de datos climáticos son heterogéneos: o bien la longitud de la serie es demasiado breve para ofrecer información a escala decenal o bien la serie es incoherente como consecuencia de los cambios operativos y de la ausencia de metadatos adecuados. Así pues, ha sido necesario realizar grandes esfuerzos para homogeneizar los datos observados de forma que puedan ser útiles para fines climáticos. El reanálisis de las observaciones atmosféricas a través de un modelo vanguardista de asimilación constante ha contribuido enormemente a que el registro histórico sea más homogéneo y útil para muchos estudios. De hecho, en los veinte años transcurridos desde que el reanálisis se propuso por primera vez se han experimentado grandes avances en nuestra capacidad de generar estimaciones de alta calidad temporalmente homogéneas acerca del clima del pasado. El PMIC y el SMOC han ofrecido liderazgo en la promoción de la investigación y de las necesidades de observación subyacentes de cara a efectuar el reanálisis. Con la evolución continua del análisis y reanálisis en el océano y en los dominios terrestres y de hielo marino, existen grandes posibilidades de lograr un mayor progreso y de aumentar el conocimiento con respecto al registro climático del pasado.

De la Conferencia pudo sacarse en claro que gran parte del trabajo de cara al futuro aún tiene que llevarse a cabo, con el fin de poder abordar aspectos pendientes de los reanálisis, especialmente los relacionados con la base cambiante de los datos observacionales. Estos temas afectan negativamente a la variabilidad para períodos decenales y más largos y limitan las aplicaciones de los reanálisis en la actualidad. Además, aunque los orígenes de los reanálisis han estado en el clima y el tiempo atmosféricos, se han realizado importantes estudios sobre el reanálisis (o la síntesis) de los datos oceánicos. Debido a las dimensiones limitadas de los conjuntos de datos históricos sobre los océanos, ha sido necesario desarrollar técnicas novedosas para

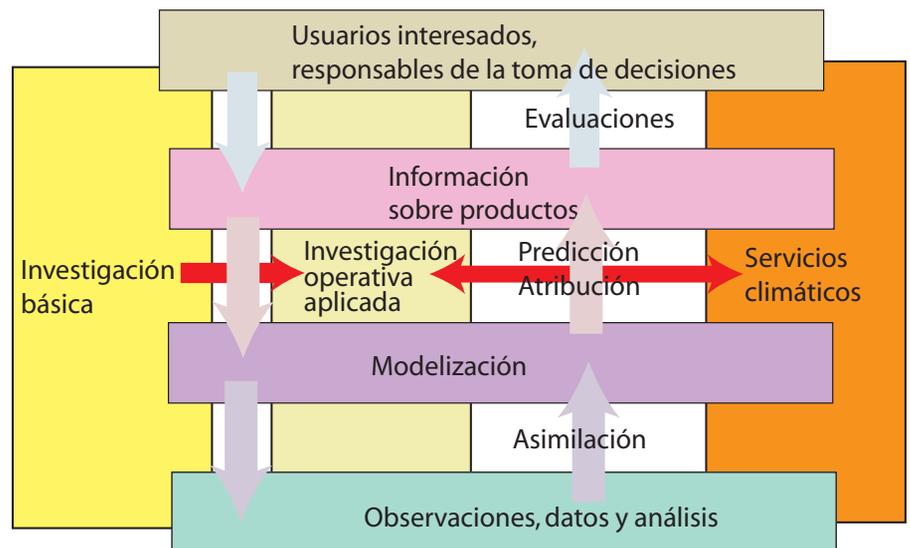


Figura 6 — Marco conceptual para un sistema de información climática que comienza con observaciones, investigación y análisis y desemboca en información necesaria para los responsables de la toma de decisiones. Las decisiones acerca de las prioridades y la coordinación entre los componentes del sistema vienen informadas por la necesidad de conocimiento científico junto con el tipo de información climática requerida por los responsables de adoptar decisiones. Fuente: Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1), enero de 2008, ligeramente modificado por G. Asrar.

lograr una mayor homogeneidad del reanálisis de los océanos. Otros avances ciertamente alentadores se están produciendo por lo que respecta al reanálisis del hielo marino, la región ártica y la superficie terrestre. También se ha registrado una evolución inicial de la asimilación de datos de modelos acoplados atmósfera-océano, que está sentando las bases para futuros estudios acoplados sobre reanálisis que podrían desembocar en representaciones más coherentes de los ciclos de la energía y del agua. El reto es mejorar las estimaciones de las incertidumbres asociadas a los productos del reanálisis.

El reanálisis atmosférico mundial da como resultado unos cálculos de alta calidad y coherentes de las variaciones de la atmósfera a corto plazo o con arreglo a una escala sinóptica, pero la variabilidad en escalas temporales más prolongadas (especialmente las decenales) no se registra con tanta precisión a través de los reanálisis actuales. Las causas principales de esta deficiencia son la calidad y la homogeneidad de los conjuntos de datos fundamentales que conforman el registro climático, además de la calidad de los sistemas de asimilación de datos empleados para llevar a cabo los reanálisis. Sin embargo, la investigación sobre las correcciones de los sesgos y las técnicas avanzadas de reanálisis prometen mucho, y es necesario acometer esfuerzos adicionales en relación con estos reaná-

lisis. En el futuro se verá la importancia de que los reanálisis mundiales de última generación estén coordinados y, si fuera posible, escalonados, para garantizar que el registro básico de datos observacionales se perfeccione antes de cada reanálisis, de modo que haya tiempo suficiente para analizar y, por tanto, aprender a partir del rendimiento obtenido en el pasado. Es probable que las mejoras adicionales de los reanálisis, entre las que se incluyen su ampliación a fin de abarcar los componentes traza más importantes y los dominios del océano, la tierra y el hielo marino, resulten satisfactorias al efecto de ampliar su uso en estudios, investigaciones y aplicaciones relacionados con el cambio climático.

Otro desafío al que debe enfrentarse la comunidad dedicada a la investigación climática es el suministro de información sobre el clima a nivel regional que inversores, responsables de negocios, administradores de recursos naturales y gestores políticos necesitan para ayudar a la preparación frente a los impactos negativos del posible cambio climático sobre las industrias, comunidades, ecosistemas y naciones enteras (Figura 6). Aunque las mediciones medias a nivel mundial de la temperatura, la precipitación y el aumento del nivel del mar resultan convenientes para efectuar un seguimiento del cambio climático a escala global, muchos sectores de la sociedad necesitan

una información práctica basada en escalas espaciales considerablemente más precisas. El incremento de la confianza relacionada con la atribución del cambio climático a escala global correspondiente a las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por el hombre y la expectativa de que estos cambios aumentarán en el futuro han derivado en una mayor demanda de predicciones relativas al cambio climático regional a fin de orientar la adaptación. Aunque existe cierta confianza en los patrones de cambios a gran escala de algunos parámetros, la capacidad de predicción a nivel regional está mucho más limitada y, de hecho, es complicada de evaluar, ya que no disponemos de datos para efectuar una selección de diferentes condiciones climáticas con arreglo a las cuales poder realizar las comprobaciones de los modelos.

Se está avanzando mucho en la investigación destinada a mejorar las predicciones a través de los modelos, pero es probable que el progreso sea lento. Entre tanto, el PMIC admite que los gobiernos y las actividades empresariales tienen que enfrentarse a la toma de decisiones, y necesitan el mejor asesoramiento climático disponible en la actualidad. A pesar de sus limitaciones, los modelos climáticos ofrecen los medios más prometedores para suministrar información sobre el cambio climático, y el PMIC ha fomentado que los datos obtenidos a partir de predicciones climáticas estén disponibles para poder tomar decisiones fundadas, siempre que se aclaren las limitaciones de tales predicciones. Esta disponibilidad incluirá la evaluación de la capacidad de los modelos empleados para pronosticar el clima actual, así como el alcance de las predicciones a partir del mayor número posible de modelos diferentes.

En este sentido, el PMIC ha comenzado a desarrollar un marco destinado a evaluar las técnicas climáticas de reducción de escala a nivel regional para su utilización en proyecciones climáticas globales referidas a la reducción de escala (Giorgi et al., 2009). Un marco de estas características sería similar en términos conceptuales a las intercomparaciones satisfactorias del modelo acoplado llevadas a cabo por el WGCM, y tendría el objetivo de cuantificar el rendimiento de las técnicas de modelización climática a escala regional y de evaluar sus ventajas relativas. Se ha previsto un esfuerzo coordinado a nivel internacional encaminado a desarrollar técnicas mejoradas de reducción de escala y a ofrecer respuestas al co-

lectivo dedicado a la modelización del clima a escala mundial. Uno de los objetivos específicos será el de generar información climática multi-modelo mejorada, de alta resolución y basada en las técnicas de reducción de escala para las diversas regiones del mundo, a fin de contribuir a los trabajos sobre evaluación de impactos y adaptación y al quinto Informe de evaluación del IPCC. Esto fomentaría la aparición de unas mayores interacciones entre quienes efectúan la modelización climática, quienes generan información derivada de un proceso de reducción de escala y los usuarios finales, para apoyar mejor las actividades de evaluación de impactos y adaptación y para comunicar mejor la incertidumbre científica inherente a las proyecciones climáticas y a la información sobre el clima. Un aspecto importante de esta actividad será la mayor implicación de los científicos procedentes de países en vías de desarrollo.

Durante los próximos años, el PMIC seguirá ofreciendo su liderazgo científico para las principales actividades internacionales de evaluación climá-

tica. Actualmente, bajo la dirección del WGCM del PMIC, la quinta fase del CMIP (CMIP5) está en proceso de desarrollo como elemento de apoyo al quinto Informe de evaluación del IPCC. El gran desafío del nuevo conjunto de modelos climáticos analizados en el CMIP5 es dar respuesta a los cambios climáticos a nivel regional, especialmente en las próximas décadas, a los cuales tendrán que adaptarse las sociedades humanas; asimismo, este conjunto de modelos climáticos tendrá que cuantificar la magnitud de los procesos de realimentación registrados en el sistema climático, como por ejemplo en el ciclo del carbono.

La comunidad científica ha formulado los experimentos coordinados propuestos por el CMIP5, con el fin de abordar cuestiones científicas fundamentales. Puesto que estos experimentos constituirán la actividad principal de la comunidad de modelización del cambio climático a nivel internacional durante los próximos años, los resultados serán aptos para ser evaluados por el quinto Informe de evaluación del IPCC. La nueva

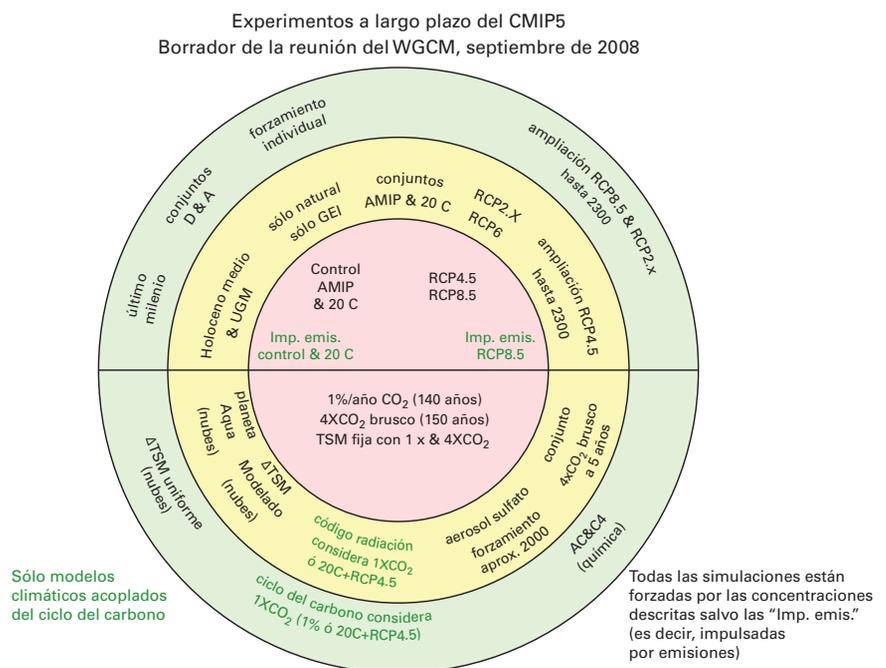


Figura 7 — El PMIC y el Programa internacional geosfera-biosfera han aunado conocimientos para avanzar en el desarrollo de modelos climáticos y, de esta forma, en la capacidad de predicción. Las futuras actividades de modelización climática incluyen una serie de experimentos que "comparan" los modelos climáticos existentes y valoran sus puntos fuertes y sus puntos débiles, además de mejorar las simulaciones climáticas empleando un conjunto definido de escenarios de emisión. Mediante la incorporación del ciclo del carbono a escala global están comprobándose modelos más complejos del sistema terrestre, con el fin de determinar su reacción ante diferentes forzamientos. Dentro del PMIC, el Grupo de trabajo sobre modelización acoplada lidera el desarrollo de modelos acoplados océano-atmósfera-superficie empleados para estudios climáticos con arreglo a escalas temporales más prolongadas. Fuente de la imagen: Taylor et al. (2008).

serie de experimentos de modelos acoplados se basa en la utilización de dos tipos de modelo, destinados a abordar dos marcos temporales y dos conjuntos de cuestiones científicas. Para proyecciones a escalas temporales más largas (hasta 2100 y más adelante, Figura 7) y como ampliación a las modelizaciones previas del WGCM como elemento de apoyo al IPCC, los modelos climáticos acoplados de resolución intermedia (unos 200 km) incluirán el ciclo del carbono, aspectos químicos específicos o simples y aerosoles, forzados por nuevos escenarios de mitigación (a los que se hará referencia como "vías de concentración representativa (RCP)"). Las cuestiones científicas que deben abordarse están relacionadas con la magnitud de las reacciones registradas en el sistema climático acoplado. Será preciso emplear escenarios de mitigación y adaptación con niveles tolerables de emisión que permitan al sistema lograr objetivos de concentración estabilizados (en lugar del Informe especial previo del IPCC sobre escenarios de emisión). Los nuevos escenarios contarán con acciones políticas implícitas para afrontar futuros niveles de cambio climático. Ya que sólo podemos reducir parte del problema y tendremos que adaptarnos al cambio climático que quede por llegar, el desafío consiste en emplear modelos climáticos para cuantificar los cambios climáticos a escala regional que evolucionan con el tiempo y a los que tendrán que adaptarse las sociedades humanas.

Un nuevo aspecto central del CMIP5 es un conjunto de proyecciones a corto plazo, que comprenden estudios de predicción a 10 y 30 años, y experimentos de alta resolución con arreglo a determinados intervalos de tiempo, tal y como se resume en Taylor et al., 2008. La investigación del PMIC ha puesto de manifiesto que existen unas perspectivas razonables de cara a generar predicciones decenales con un grado de acierto suficiente como para que puedan ser empleadas por los planificadores y por los responsables de adoptar decisiones, además de resultar de un interés científico importante. El diseño experimental del CMIP5 ofrece una oportunidad para la coordinación internacional de la investigación y experimentación en este campo.

Existen dos aspectos relacionados con el problema decenal: la señal forzada por elementos externos (gases de efecto invernadero y ae-

rosoles, volcanes, radiación solar, etc.) y la parte predecible de la señal generada a nivel interno a partir de los mecanismos oceánicos intrínsecos, procesos acoplados océano-atmósfera, modulación de modos climáticos de variabilidad (por ejemplo El Niño/Oscilación Austral) y, posiblemente, procesos terrestres y criosféricos. Hasta la fecha, por regla general, las proyecciones climáticas han tratado la variabilidad interna como un componente estadístico de incertidumbre. Aunque no existe un máximo decenal marcado en el espectro del sistema climático, las escalas temporales prolongadas existen, y son potencialmente predecibles. El desafío al que se enfrentan los estudios de predicción y predictibilidad es el de identificar los mecanismos asociados con las regiones y modos de predictibilidad, a fin de comprender mejor la conexión existente entre los modos oceánicos y la variabilidad climática terrestre, y para investigar la técnica predictiva mediante el pronóstico (incluyendo multimodelo) de predicciones decenales.

Los resultados de los estudios de predictibilidad y las demostraciones de las técnicas de predicción ofrecen la base para que el PMIC inicie un estudio coordinado sobre la predicción y predictibilidad a escala decenal. Existen numerosas oportunidades científicas para mejorar y ampliar los modelos y para llevar a cabo el análisis de variabilidad y de sus modos. Entre los retos del futuro se incluyen la necesidad de desarrollar unos métodos de análisis mejorados, especialmente en el ámbito oceánico, y también de cara al inicio, verificación y desarrollo de modelos, así como en la generación de conjuntos y en el uso de conjuntos multimodelo para la predicción con arreglo a escalas decenales.

Además de su apoyo al proceso de evaluación del IPCC, el PMIC seguirá respaldando la evaluación cuatrienal de ozono efectuada por la OMM y el PNUMA. La Actividad de validación del modelo climático químico (ValMCQ) del programa SPARC constituye el análisis principal basado en un modelo de la conexión entre la química atmosférica y el clima. ValMCQ ofrece apoyo en forma de modelización estratégica al proceso de evaluación del ozono, que viene determinado por el Protocolo de Montreal. El ozono es un componente principal en los procesos radiativos y

también se ve afectado por la dinámica y el transporte. Tan solo los MCQ pueden simular los procesos de realimentación química con respecto a la dinámica y al transporte de gases traza.

Las simulaciones del MCQ se llevarán a cabo bajo la dirección del programa SPARC del PMIC como una aportación principal a la Evaluación científica del agotamiento del ozono de 2010 de la OMM y el PNUMA. El enfoque principal se situará en la validación del modelo frente a las observaciones, así como en las evaluaciones de la futura evolución del ozono estratosférico. En la actualidad, cabe esperar que la recuperación del ozono tenga lugar hacia mediados de siglo (OMM, 2007; Eyring et al., 2007), cuando se prevé que la columna de ozono alcance los valores de 1980 de las latitudes polares australes. Esta evolución viene determinada, por un lado, por una disminución de las sustancias que agotan el ozono y, por otro, por un descenso de las temperaturas estratosféricas como consecuencia del aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera, lo que afecta a la formación de nubes polares estratosféricas y a la destrucción heterogénea del ozono.

Una cuestión importante radica en saber de qué forma los cambios en las abundancias troposféricas de las sustancias que agotan el ozono se traducen en cambios en las sustancias químicas activas que agotan el ozono en la estratosfera. Los procesos dinámicos que controlan el transporte y los aspectos dinámicos relacionados con la formación y mantenimiento de vórtices tienen que tomarse especialmente en consideración a la hora de pronosticar la evolución a largo plazo del ozono polar. Entre las influencias de los cambios en el ozono estratosférico y en la composición de la estratosfera sobre el clima de la Tierra que deben evaluarse se incluyen las que pueden influir en la composición de la troposfera. De cara a estudios sobre la evolución futura del ozono estratosférico, resulta de vital importancia considerar las interacciones de la radiación, la dinámica y la composición química de la atmósfera.

Resumiendo, el PMIC ha dado grandes pasos de cara a comprender el sistema climático acoplado con arreglo a escalas temporales de estacionales a seculares. Los

esfuerzos investigadores del PMIC han conseguido hacer realidad tanto la predicción climática operativa como los productos y servicios relacionados con el clima. El PMIC ha desempeñado un papel fundamental a la hora de transmitir la información y el conocimiento científico resultantes acerca del sistema climático terrestre de cara a la adopción de decisiones políticas a través del IPCC, la Conferencia de las Partes de la CMNUCC y su Órgano subsidiario de asesoramiento científico y tecnológico. Más de la mitad de las aportaciones científicas y técnicas utilizadas en las evaluaciones del IPCC ha sido suministrada por los científicos asociados al programa PMIC. El PMIC ha llevado a cabo un esfuerzo coordinado para ofrecer acceso a nivel mundial a las predicciones y proyecciones de su modelo, así como a los resultados de sus investigaciones para su utilización por parte de los científicos de los países en vías de desarrollo y de los países menos adelantados, con el fin de evaluar las consecuencias de la posible variabilidad del clima y del cambio climático sobre los principales sectores económicos (es decir, alimentación, agua, energía y salud) de su país o región geográfica.

Los éxitos y el progreso del PMIC han sido posibles gracias a las aportaciones generosas y continuas de sus patrocinadores: la OMM, el CIUC y la COI, y gracias también a su red de más de 190 Estados Miembros. Toda la comunidad del PMIC está agradecida por este patrocinio y apoyo, y se muestra entusiasmada ante las múltiples oportunidades que han posibilitado las principales aportaciones encaminadas a ayudar a comprender las causas y las consecuencias del cambio y la variabilidad del clima, evaluando su impacto sobre los principales sectores de la economía mundial y permitiendo el uso del conocimiento resultante para gestionar los riesgos asociados con estos cambios que se ciernen sobre nuestra generación, nuestros hijos y los que vendrán detrás de ellos en este siglo y en los años siguientes.

El trabajo del PMIC, de forma inequívoca, ha llevado a la conclusión de que el sistema terrestre experimentará un cambio climático real durante los próximos cincuenta años, superando el alcance de la variabilidad climática natural. Un tema de suma importancia al que tendrán que enfrentarse las diver-

sas naciones es cómo adaptarse ante esta certidumbre de variabilidad y cambio climáticos durante el próximo medio siglo. Así pues, las necesidades de afrontar la variabilidad climática y de adaptarse al cambio climático representan un desafío para la sociedad. Como respuesta, la próxima Tercera Conferencia Mundial sobre el Clima tomará en consideración cuál sería la mejor manera de que los servicios climáticos integrales informaran de cara a la adopción de decisiones concernientes a la adaptación.

El suministro de observaciones y la prestación de servicios relacionados con el clima implican una transición por los campos de la investigación básica y aplicada, la operatividad, las aplicaciones y el compromiso con la comunidad de usuarios. Aun así, la mayor parte de los esfuerzos realizados hasta ahora se han centrado en el sistema climático físico y no se han visto orientados a los productos. Sin embargo, los impactos y servicios climáticos involucran a sectores como el comercial, financiero, agrícola, ingeniero, salud pública, política pública, seguridad nacional, etc. Con el fin de satisfacer las necesidades de la sociedad en lo que a servicios climáticos se refiere, los responsables de adoptar decisiones exigen la creación de un sistema de información climática que respalde las decisiones políticas, económicas y financieras. Un sistema con estas características desarrollaría predicciones climáticas fiables a escalas temporales de estacionales a decenales, y permitiría la obtención de predicciones a la medida de regiones y localidades, la integración de los datos atmosféricos, oceánicos, terrestres y sociales en un modelo exhaustivo de predicción del "sistema terrestre" y el desarrollo de elementos de conexión que apoyaran la toma de decisiones y que pudieran ajustarse para proporcionar escenarios del tipo "en caso de... entonces" especificados por el usuario.

La realización de un sistema de información climática requerirá el acoplamiento de modelos existentes a través del sistema climático físico, los ciclos biogeoquímicos y los sistemas socioeconómicos, la síntesis de conjuntos de datos dispares procedentes de observaciones in situ y de observaciones desde el espacio, nuevos sistemas de sensores terrestres y orbitales, infraestructuras y software informáticos especializados de alto

rendimiento y una sinergia sin precedentes entre la comunidad de investigación climática, el brazo ejecutor operativo de los servicios climáticos y los usuarios finales. De forma muy similar a la situación experimentada hace sesenta años con la llegada de la predicción numérica del tiempo, en este momento nos encontramos en los albores de una nueva era de información y servicios climáticos, respaldados por una investigación climática que se esfuerza por mejorar, ampliar y hacer más precisa nuestra comprensión y capacidad para predecir lo que pueda depararnos el sistema climático acoplado.

Referencias

- CHURCH, J.A., J.M. GREGORY, P. HUYBRECHTS, M. KUHN, K. LAMBECK, M.T. NHUAN, D. QIN and P.L. WOODWORTH, 2001: Changes in sea level. En: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- EYRING, V., D.W. WAUGH, G.E. BODEKER, E. CORDERO, H. AKIYOSHI, J. AUSTIN, S.R. BEAGLEY, B. BOVILLE, P. BRAESICKE, C. BRÜHL, N. BUTCHART, M.P. CHIPPERFIELD, M. DAMERIS, R. DECKERT, M. DEUSHI, S.M. FRITH, R.R. GARCÍA, A. GETTELMAN, M. GIORGETTA, D.E. KINNISON, E. MANCINI, E. MANZINI, D.R. MARSH, S. MATTHES, T. NAGASHIMA, P.A. NEWMAN, J.E. NIELSEN, S. PAWSON, G. PITARI, D.A. PLUMMER, E. ROZANOV, M. SCHRANER, J.F. SCINOCCA, K. SEMENIUK, T.G. SHEPHERD, K. SHIBATA, B. STEIL, R. STOLARSKI, W. TIAN and M. YOSHIKI, 2007: Multimodel projections of stratospheric ozone in the 21st century, *J. Geophys. Res.*, 112, D16303, doi:10.1029/2006JD008332.
- GIORGI, F., C. JONES y G. ASRAR, 2009: Cómo abordar las necesidades de información climática a nivel regional: el marco del CORDEX. *Boletín de la OMM* 58 (3).
- TAYLOR, K.E., R.J. STOFFER and G.A. MEEHL, 2008: A summary of the CMIP5 experiment design. http://www.clivar.org/organization/wgcm/references/Taylor_CMIP5.pdf.
- TRENBERTH, K.E., T. KOIKE and K. ONOGI, 2008. Progress and prospects for reanalysis for weather and climate, *Eos*, 89, 234-235.
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO) [OMM], 2007: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006, Global Ozone Monitoring Project Report No. 50, Geneva, Switzerland, 572 pp.