

Contribuciones de los satélites medioambientales a los Programas de la OMM: pasado y presente

Por Ghassem R. ASRAR¹

El poder de la observación mundial desde el espacio

Las observaciones de satélites medioambientales y los productos de análisis derivados de ellas han contribuido durante mucho tiempo a los programas de la OMM. Estas observaciones mundiales desde el espacio, junto con las redes de superficie bien establecidas coordinadas por la Vigilancia Meteorológica Mundial (VMM), han sido de gran valor para controlar el tiempo y el clima, ofreciendo avisos tempranos de riesgos naturales y los campos de inicialización y de validación necesarios para los sofisticados modelos de predicción numérica del tiempo y del clima que se ejecutan en distintos centros importantes de investigación medioambiental y de la OMM. Los productos operativos de estos centros se han distribuido a todo el mundo para beneficio de todos los programas de la OMM. En los últimos años, los productos satelitales experimentales y de investigación "de próxima generación" han sido testigos también de una amplia distribución bajo los auspicios de la OMM y de otras agencias y organizaciones de las Naciones Unidas.

La teledetección desde el espacio del sistema atmósfera, océano y tierra ha evolucionado de forma importante desde principios de la década de 1960, cuando se introdujeron los primeros sistemas de satélites meteorológicos. A lo largo de la última década los satélites han demostrado sus capacidades de observación para hacer un seguimiento preciso de casi todos los aspectos del sistema terrestre total de forma mundial: una capacidad difícil de encajar con los sistemas de superficie que están confinados generalmente a zonas terrestres que abarcan alrededor del 30 por ciento de la superficie del planeta. Actualmente, los sistemas de satélite controlan la evolución y las consecuencias de El Niño, las concentraciones de ozono estratosférico, las fluctuaciones solares, los cambios en la cubierta mundial de nieve, la extensión del hielo marino y la dinámica de la capa de hielo, las temperaturas y la actividad biológica de la superficie del océano, las zonas

costeras y las floraciones de algas, la dinámica forestal, el desarrollo urbano, la actividad volcánica, los movimientos de la placa tectónica, y otros. Estas observaciones diferentes se han utilizado comúnmente en la toma de decisiones en tiempo real y en la planificación y gestión estratégicas de los recursos industriales, económicos y naturales. Los ejemplos incluyen predicción meteorológica y climática, prácticas agrícolas, transporte, energía y gestión de recursos hídricos, planificación urbana, silvicultura, pesquerías, y sistemas de aviso temprano para desastres naturales y efectos sobre la salud humana.

Los satélites, evidentemente, no pueden medir todos los parámetros del sistema climático de la Tierra. Los sistemas de observación de superficie e in situ son esenciales para calibrar y validar los parámetros geofísicos, químicos y biosféricos derivados de los satélites y para una multitud de parámetros que no pueden controlarse con tecnología de teledetección. De esta forma, se prevé que la evolución futura de una estrategia integrada de observación mundial sea hacia una que exija un enfoque integrado, que implique tanto sistemas desde el espacio como redes de observación en superficie.

Tradicionalmente, los objetivos de misión y las aplicaciones de los sistemas de observación satelitales operativos y de los de investigación han estado separados, en parte por la diferencia de las comunidades de usuarios a las que servían. Estas comunidades se han unificado rápidamente, con intereses compartidos en el cambio medioambiental mundial. Actualmente somos testigos de una gran convergencia entre necesidades operativas y de investigación. A medida que la ventana temporal de la "predicción" se amplía más allá de escalas de tiempo meteorológicas (de unos pocos días a una semana) para incluir (de forma casi operativa) escalas temporales de estacionales a interanuales (p. ej., El Niño) y decenales (p. ej., el cambio y los efectos del clima), hay que observar y modelizar un número cada vez mayor de componentes y procesos del sistema terrestre. Y hay que observarlos de forma mundial. Tal necesidad puede ser interpretada como una necesidad motriz para la mejora de los sistemas de observación operativos y también para la transición de las plataformas de investigación a las operativas.

¹ Administrador Asociado de Ciencias Terrestres de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA) de los EE.UU.

Las observaciones a escala mundial deberían depender en gran medida, por la definición de la distribución entre la tierra y el océano, de sistemas desde el espacio. Para mejorar las predicciones meteorológicas (en especial de huracanes y tifones) serían importantes vientos troposféricos (y sobre la superficie del océano) precisos y de alta resolución a escala mundial. La temperatura y la humedad atmosférica, los parámetros hidrológicos superficiales, los compuestos químicos atmosféricos, la circulación oceánica y otros, serían esenciales para tratar cuestiones de variabilidad y cambio climáticos y temas de gestión de recursos medioambientales. El seguimiento de los recursos hídricos (el ciclo hidrológico), de los ecosistemas (y del ciclo y balance del carbono), de la nieve y del hielo, y de otros, son categorías importantes necesarias para representar de forma adecuada sus contribuciones al sistema climático de la Tierra y su variabilidad, para mejorar modelos de predicción y para apoyar valoraciones internacionales de las consecuencias sobre las sociedades, y de su resistencia o vulnerabilidad, al cambio medioambiental mundial y regional. Estas cuestiones y temas van mucho más allá del estricto dominio de la investigación. Ahora son identificadas por los políticos y por el público general. Por consiguiente, se están convirtiendo, de hecho, en la fuerza motriz que lleva a la necesidad de observaciones sistemáticas y a largo plazo que puedan controlarse en escalas espaciales y temporales con futuros sistemas operativos desde el espacio y con redes de superficie.

En el ámbito internacional, la OMM está a la cabeza de esta convergencia de sistemas operativos y de investigación. Con unos antecedentes históricos operativos, la Vigilancia Meteorológica Mundial de la OMM se describe correctamente como "la base de la cooperación internacional en meteorología operativa, y un sistema mundial para la recopilación, el análisis y la difusión de datos y productos meteorológicos..."². El Sistema Mundial de Observación de la VMM integra los satélites meteorológicos operativos polares y geoestacionarios de las naciones que comparten el espacio para ofrecer datos mundiales para todos los Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales. Se describen en la sección siguiente. A lo largo de las dos últimas décadas el seguimiento por parte de la OMM de la variabilidad del clima y de los sistemas percibidos ha originado un interés por el cambio climático y por la proyección de estados futuros del clima. Esto ha añadido al SMO una componente de investigación para formar el Sistema Mundial de Observación del Clima (SMOC), que incluye observaciones terrestres y oceánicas, junto con

el interés atmosférico original, para apoyar distintos programas de investigación sobre el cambio climático. La necesidad de registros de datos a largo plazo provenientes de sistemas operativos, acoplados con el conocimiento del proceso climático que ofrecen las observaciones de investigación, ha llevado a su convergencia en el concepto SMOC descrito más abajo y, por último, a la Estrategia Integrada de Observación Mundial como un paradigma de colaboración mundial futura, definida brevemente al final de este artículo.

Una pequeña historia de los sistemas operativos de observación por satélite Satélites Medioambientales Operativos Polares (POES)

Las primeras observaciones de la Tierra desde satélites meteorológicos comenzaron con el lanzamiento, por parte de la NASA, del primer Satélite de Observación de Televisión e Infrarrojo (IR) (TIROS-I), el 1 de abril de 1960, para demostrar la viabilidad de observar la cubierta nubosa de la Tierra y el tiempo atmosférico por medio de cámaras de televisión de exploración lenta en un satélite de órbita terrestre de rotación estabilizada. El TIROS-II se lanzó el 23 de noviembre de 1960 para demostrar, además de las cámaras de televisión de ángulo ancho y de ángulo estrecho, un radiómetro experimental de IR con cinco canales de registro y un dispositivo de IR sin registro en dos canales. Medían la energía térmica de la superficie y de la atmósfera de la Tierra para ofrecer datos sobre el equilibrio de calor del planeta y añadir una nueva dimensión al conocimiento del tiempo atmosférico.

129

SENSORES NPOESS

Los sensores a bordo del NPOESS que recogerán y difundirán datos de los océanos de la Tierra, de la atmósfera, el suelo, el clima y el medio ambiente espacial incluyen los sensores de teledetección terrestre de próxima generación bajo desarrollo:

ATMS: Sonda Microondas de Tecnología Avanzada

CMIS: Sonda / Recopilador de Imágenes de Microondas Cónico

CrIS: Sonda Infrarroja de Rastreo Transversal

GPSOS: Sensor de Ocultación del Sistema Mundial de Posicionamiento

OMPS: Conjunto de Cartografiado y Perfilador de Ozono

SESS: Serie de Sensores Medioambientales del Espacio

TSIS: Sensor de Irradiancia Solar Total

VIIRS: Conjunto Radiómetro/Recopilador de Imágenes Visible/Infrarrojo

² "El tiempo y el clima: variabilidad y cambio", p. 4, OMM, 2001

A lo largo de la década de 1960 se lanzaron una serie de satélites TIROS, desarrollados por la NASA y dirigidos por la NOAA. Las primeras medidas operativas del balance de radiación terrestre (BRT) se hicieron a través de un radiómetro con dos canales de registro lanzado en junio de 1974 a bordo de un satélite de la NOAA que fue utilizado hasta febrero de 1978. Empezando con TIROS-N, en 1978, el POES de la NOAA llevaba a bordo un sensor AVHRR (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución). El POES de NOAA/TIROS orbita continuamente alrededor de la Tierra desde el Polo Norte al Polo Sur en una altitud de aproximadamente 830-870 km.

La serie NOAA/POES lleva en la actualidad radiómetros de detección como dispositivos y sondas de imágenes y radiométricos para obtener información de los perfiles verticales de parámetros atmosféricos y de la superficie terrestre seleccionados. Los paquetes de instrumentos clave incluyen: AVHRR para observar nubes, límites entre tierra y agua, nieve y hielo, vapor de agua, temperatura de nubes, temperaturas en la superficie de la tierra y en la del mar, aerosoles, y vegetación (índice); la Sonda Operativa Vertical de TIROS (TOVS) para perfiles de temperatura atmosférica, contenido de agua y columna total de ozono; y un sistema de Dispersión Solar Ultravioleta (SBUV, que comenzó con el NOAA-9) para mediciones de ozono.

El programa del Sistema Nacional de Satélites Medioambientales Operativos de Órbita Polar de los EE.UU. (NPOESS), previsto para empezar alrededor de 2008, y hasta 2018, ofrece continuidad a la serie NOAA-POES. Basado en nuevas tecnologías, el programa está diseñado para crear un nuevo sistema que respalde datos a largo plazo para el seguimiento medioambiental y valoraciones de cambio mundial. La serie de satélites NPOESS llevará un mayor conjunto de instrumentos que incorporan nuevas tecnologías a través de un programa de largo alcance de "transición" de desarrollo de sensores y satélites para ofrecer una cobertura completa de las condiciones meteorológicas para aplicaciones operativas y para fines científicos, a la vez que se reducen los costes operativos enormemente. Para llevar a cabo su misión, los satélites del NPOESS en dos planos orbitales sustituirán a los dos satélites del Programa de Satélites Meteorológicos de la Defensa (DMSP) y a las constelaciones POES, respectivamente, y habrá también un satélite de EUMETSAT que ofrece datos en el plano orbital del medio día (METOP). NPOESS y EUMETSAT compartirán datos. Antes del lanzamiento del NPOESS, a finales de esta década, se lanzará un satélite del NPP (Proyecto de Preparación del NPOESS) en 2006 como una misión puente para ofrecer continuidad a las observaciones clave seleccionadas entre los Satélites de Observa-

ción Terrestre (EOS) de la NASA (TERRA y AQUA) y el NPOESS. Los sensores VIIRS, CrIS y ATMS se están desarrollando en la actualidad para la misión del NPP, como demostración de la tecnología avanzada para sondeos de temperatura y humedad atmosféricas, temperaturas de la superficie del mar (TSM), productividad biológica de la tierra y el océano, y propiedades de las nubes y de los aerosoles, entre otros. Ofrecerán observaciones continuadas sobre el cambio mundial después de TERRA y AQUA, a la vez que reducirán los riesgos asociados con los nuevos sistemas de sensores avanzados antes de su vuelo rutinario en el NPOESS, para apoyar de forma mundial las necesidades de las organizaciones que suministran servicios operativos meteorológicos y climáticos.

Satélites Medioambientales Operativos Geoestacionarios (GOES)

Los satélites geoestacionarios observan la Tierra desde el ecuador y mantienen su posición relativa con la Tierra a una altitud de 35 790 km (22 240 millas). El satélite viaja alrededor de la Tierra en la misma dirección que la rotación de la Tierra con un período orbital igual al de la rotación de la Tierra (23 horas, 56 minutos, 04,09 segundos). Los satélites GOES de los EE.UU., desarrollados por la NASA y la NOAA, están situados alrededor de 75° W y 135° W. Una red mundial de satélites meteorológicos operativos geoestacionarios ofrece imágenes mundiales visibles e IR de la superficie de la Tierra y de la atmósfera. Los sistemas de satélite incluyen GOES (de EE.UU.), METEOSAT (lanzado por la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos (EUMETSAT)), el Satélite Meteorológico Geoestacionario Japonés (GMS) y los satélites geoestacionarios de China, India y la Federación Rusa.

Ha habido importantes contribuciones de productos de datos de los satélites geoestacionarios operativos. Entre ellas están la cubierta de nieve, insolación de la superficie, nubes y precipitación y, por supuesto, perfiles verticales de humedad y de temperatura. Los estudios de nubes y de precipitación utilizan ampliamente los satélites geoestacionarios operativos del mundo. Los primeros a través del Proyecto Internacional de Climatología de Nubes por Satélite y el último a través del Proyecto Mundial de Climatología de la Precipitación (GPCP). El conjunto de datos del GPCP está compuesto de datos integrados de la red POES, la geoestacionaria, y la de pluviómetros de superficie para ofrecer un mapa mundial de precipitación media mensual. La porción de datos de satélite del conjunto de datos del GPCP consta de forma específica de datos IR geoestacionarios de GOES, GMS, METEOSAT, datos IR de órbita polar de la NOAA y datos de microondas del DMSP.

El NOAA-GOES lleva dos sistemas de sensores principales: un instrumento de imágenes multiespectral, de cinco canales, capaz de peinar de forma simultánea un canal visible y cuatro IR en una hilera de norte a sur a través de un camino de este a oeste, ofreciendo imágenes de todo el disco cada 30 minutos; una sonda con más bandas espectrales que el instrumento de imágenes, para realizar perfiles de alta calidad de temperatura y de humedad, temperaturas de superficie y de nubes y distribución de ozono, capaz de introducir un canal visible y ocho IR en una hilera de norte a sur a través de un camino de este a oeste. Actualmente hay dos satélites GOES operativos y dos satélites novísimos esperando en órbita (el GOES-11 y el 12) que sirven de repuesto de los que están en funcionamiento. El GOES-12 es el primero que lleva un instrumento de imágenes de rayos X solares (SXI).

A partir de 2008, la NASA y la NOAA empezarán a desplegar una nueva serie de satélites GOES con un instrumento de imágenes y una sonda de nueva generación. La Sonda de Línea de Base Avanzada (ABS) ofrecerá perfiles de temperatura y humedad de alta resolución vertical y espacial. El desarrollo de la ABS se lleva a cabo a través del Programa Nuevo Milenio de la NASA, para demostrar un Espectrómetro Geoestacionario de Imágenes por Transformadas de Fourier (GIFTS), que está previsto lanzar en 2004.

Un sistema de observación por satélite para apoyar el programa de actividades de la investigación climática

Durante las dos últimas décadas, el punto de vista de primera mano de la OMM sobre la variabilidad climática y sobre las tendencias del clima provocó una avalancha de programas de investigación que necesitaban, para integrar e influenciar las actividades de sus agencias meteorológicas y climatológicas nacionales socias, las mismas técnicas que ella reúne para su papel histórico de predicción meteorológica. Estos programas de investigación necesitaban una amplia variedad de datos de satélite, y también in situ, y bajo el paraguas del Programa Mundial de Investigación del Clima (PMIC), se procedió por lo general de acuerdo con ellos. Además de los satélites operativos, la contribución de la NASA a la investigación del cambio mundial nacional e internacional incluye dos docenas de satélites de investigación para examinar desde el espacio prácticamente todos los aspectos de la Tierra en esta década. Estos satélites utilizarán, por primera vez, nuevas tecnologías como radares y láser para investigar la estructura tridimensional de la atmósfera, de los océanos y de la superficie terrestre. Estas son las fuentes clave de las observaciones para los programas de investigación de la OMM.

El proyecto de Variabilidad y Predicción del Clima (CLIVAR) y el Experimento Mundial de Circulación del Océano se centran en el papel de los océanos en los sistemas estacionales, interanuales y de tiempo más largo del cambio climático, y en la interacción de los océanos con los procesos atmosféricos y terrestres en el sistema climático. Basándose en el anterior proyecto Océano Tropical y Atmósfera Mundial y en una extensa red de sensores de boyas oceánicas, el CLIVAR cuenta con el altímetro de radar conjunto TOPEX/Poseidon de EE.UU. y de Francia, y con su misión de sucesión Jason-1 para hacer un seguimiento de la altura de la superficie del mar y de la circulación oceánica mundial.

TOPEX/POSEIDON y JASON-1

Desarrollado conjuntamente por la NASA y la Agencia Espacial Francesa (CNES), TOPEX/POSEIDON, lanzado en agosto de 1992, lleva dos altímetros de radar para medir de forma precisa la altura de la superficie del mar. El altímetro de frecuencia dual corrige los efectos ionosféricos. Un retroreflector láser, utilizado con láser de superficie, mide la posición del satélite y verifica las medidas de altura del altímetro del satélite. Un radiómetro de microondas mide el contenido atmosférico de vapor de agua y se utiliza para corregir las medidas del altímetro por el retraso de pulso que origina el vapor de agua. La altura de la superficie del mar se mide con un intervalo de error de 4,3 cm. El sistema de rastreo dual determina la localización del satélite con un intervalo de error de 2,8 cm. La distancia entre la superficie del océano y el satélite se mide con una precisión de 3,2 cm. Las observaciones desde TOPEX/POSEIDON se utilizan para recopilar registros mundiales de alta precisión de la altura del océano y de la variabilidad cada 10 días. La continuación de TOPEX/POSEIDON, una misión de cooperación también entre EE.UU. y Francia, es JASON-1, lanzada con éxito en diciembre de 2001.

Nueve años después, los datos de TOPEX/Poseidon han revolucionado la forma de estudiar el océano mundial. Durante la primera época, se determinaron a escala mundial y con gran precisión el ciclo estacional y otras variabilidades temporales del océano, ofreciendo fundamentalmente información importante para probar los modelos de circulación del océano. Utilizando datos de TOPEX/Poseidon se realizaron importantes observaciones sobre:

- Circulación del océano, incluido el movimiento de las ondas de Rossby y de Kelvin.
- Mareas oceánicas y costeras.
- El Niño, La Niña, y la Oscilación Decenal del Pacífico.

- La circulación similar a El Niño en el Océano Atlántico.
- Estaciones oceánicas en el Mediterráneo.
- Topografía de los fondos oceánicos a partir de datos superficiales utilizados para refinar el modelo de geoide.

Reconociendo la importancia de seguir con las medidas de la topografía de la superficie del océano, la NASA y la CNES aprobaron JASON-1 como la continuación conjunta de TOPEX/POSEIDON. Los nueve años de descubrimientos científicos de TOPEX/POSEIDON habían ampliado su lista original de objetivos científicos. Ahora se espera que Jason-1 y sus misiones sucesivas:

- Midan el cambio mundial de altura del mar y ofrezcan un punto de vista continuado de la topografía en cambio de la superficie del océano mundial.
- Calculen el transporte de calor, masa de agua, nutrientes y sal por parte de los océanos.
- Aumenten el conocimiento de la circulación del océano y de los cambios estacionales y el modo de cambio de la circulación oceánica general a lo largo del tiempo.
- Ofrezcan estimaciones de altura de olas importantes y de velocidades de viento sobre el océano.
- Prueben la forma de informatizar la circulación oceánica originada por la acción de los vientos.
- Mejoren el conocimiento de las mareas oceánicas y desarrollen modelos de mareas en océano abierto.
- Mejoren la predicción de episodios climáticos como El Niño y del clima mundial en general.
- Describan la naturaleza de la dinámica del océano y desarrollen un punto de vista mundial de los océanos de la Tierra.
- Hagan un seguimiento de la variación del nivel del mar mundial medio y de su relación con el cambio climático mundial.

JASON-1 tiene un requerimiento de precisión en la medida del nivel del mar < 4,2 cm (1,7 pulgadas), y un objetivo < 2,5 cm (1,0 pulgadas)

SeaWinds en QuickSCAT y en ADEOS II

SeaWinds utiliza una antena parabólica giratoria con dos haces que se mueven en un sistema circular. La antena emite pulsos de microondas a una frecuencia de 13,4 GHz a través de amplias regiones de la superficie de la Tierra. El instrumento recogerá datos del océano, de la tierra y del hielo en una banda continua de 1 800 km de ancho, realizando aproximadamente 400 000 mediciones y abarcando el 90 por ciento de la superficie terrestre en un día. Realiza mediciones de la velocidad del viento de 3 a 20 m/s, con una precisión

de 2 m/s; mediciones de dirección con una precisión de 20° y resolución del vector viento de 25 km. Aunque sea principalmente un instrumento de investigación, SeaWinds tiene también objetivos operativos, y es un candidato importante para la transición a sistemas meteorológicos operativos en el futuro.

Objetivos científicos

- Obtener medidas de alta resolución, en todo tipo de tiempo atmosférico, de vientos cercanos a la superficie sobre los océanos mundiales.
- Determinar el forzamiento atmosférico, la respuesta del océano, y los mecanismos de interacción entre el aire y el mar en distintas escalas espaciales y temporales.
- Combinar datos de viento con medidas obtenidas con instrumentos científicos de otras disciplinas para que nos ayuden a comprender mejor los mecanismos del cambio climático mundial y de los sistemas meteorológicos.
- Estudiar tanto los cambios de vegetación de las pluviselvas anuales como los semianuales.
- Estudiar el movimiento del borde del hielo marino diario y estacional y los cambios del bloque de hielo ártico y antártico.

Objetivos operativos

- Mejorar las predicciones meteorológicas cerca de las líneas de costa mediante la utilización de datos de viento en modelos numéricos de predicción meteorológica y de olas.
- Mejorar los avisos y el seguimiento de tormentas.

AVHRR/MODIS/VIIRS

Una sucesión de instrumentos cada vez más precisos miden las TSM mundialmente. El AVHRR ha ido a bordo de los satélites POES desde 1978. El programa de Sistema de Observación de la Tierra de la NASA desarrolló el Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), que ahora va en TERRA y AQUA. El VIIRS será la próxima generación de instrumento tipo MODIS y viajará en el NPOESS y en el NPP.

La Iniciativa del Clima y la Crioesfera, que se basa en el anterior Estudio del Sistema del Clima Ártico, investiga toda la criosfera (incluido el hielo marino, además de los propios casquetes polares) para conocer su papel en el clima mundial y también como indicador del cambio mundial. Cuenta con los mismos recursos de satélite descritos antes. LANDSAT ha suministrado imágenes de alta resolución de los cambios en las plataformas de hielo antárticas, mientras que QuickSCAT hace un seguimiento de la extensión del hielo marino y de su variación en respuesta a los vientos oceánicos superficiales. La NASA empleó el RADARSAT 1 de Canadá para realizar dos exámenes de cartografiado con

radar del Antártico, lo que originó el conocimiento de los índices de movimiento en importantes témpanos de hielo. TERRA ofrece, para los continentes más habitables, observaciones de la extensión de la cubierta de nieve, que da lugar a estimaciones del equivalente en agua de la nieve. En 2002, el satélite ICESAT de la NASA ofrecerá las primeras medidas detalladas desde el espacio de la topografía de la capa de hielo.

ICESAT

El Sistema de Altimetro Láser de Geociencias (GLAS) incluye un sistema láser para medir distancia, un receptor de señales del Sistema Mundial de Posicionamiento (GPS) de satélites, y un sistema de determinación de altitud de rastreador de estrellas. El láser transmitirá pulsos cortos (4 ns) de luz infrarroja (longitud de onda de 1,064 nm) y luz visible verde (532 nm). Los fotones reflejados a la nave espacial por la superficie de la Tierra y por la atmósfera, incluido el interior de las nubes, se recogerán en un telescopio de 80 cm de diámetro. Los pulsos láser de 40 veces por segundo iluminarán puntos (huellas) de 70 m de diámetro, situados a intervalos de 170 m a lo largo de la superficie de la Tierra. La distancia desde la nave espacial a las nubes y a la superficie de la Tierra se determinará a partir de medidas del tiempo que tardan los pulsos láser en viajar hasta el objeto reflector y volver. La altura de la nave espacial sobre el centro de la Tierra se determinará a partir de la información recogida por el receptor GPS en el GLAS y en una red GPS que funciona en todo el mundo con otros fines. El lugar al que apunta el haz láser, con relación al centro de la Tierra, se determinará con el sistema del rastreador de estrellas. El conocimiento del lugar al que apunta el láser y la posición de la nave espacial se combinará para calcular la situación precisa de la huella sobre la superficie con una precisión de unos pocos metros. La altura de las capas de hielo se puede determinar con una precisión del orden del centímetro, lo que permite valorar si se están fundiendo o si están aumentado con un gran detalle espacial y temporal.

El Experimento Mundial de la Energía y del Ciclo del Agua estudia el ciclo hidrológico mundial para determinar cómo influye en el cambio mundial y cómo responde a él, y los efectos consiguientes sobre los sistemas regionales de precipitación y la disponibilidad de agua potable. La investigación reciente sugiere que el aumento de las temperaturas medias mundiales debería tener un efecto acelerador sobre el ciclo del agua, mientras que el aumento de las concentraciones de aerosoles en la atmósfera tendría el efecto contrario. De esta forma, las interacciones del ciclo del agua con los cambios climáticos son un tema complejo que necesita observaciones mundiales de distintas medidas, incluidas precipitación, humedad del suelo, equi-

valente en agua de la nieve, cubierta terrestre y cambio del uso del suelo, y topografía de la superficie terrestre. Muchas de ellas requieren sistemas activos de teledetección.

Misión de Medida de la Precipitación Tropical (TRMM) y Misión Mundial de Precipitación (GPM)

En noviembre de 1997 se lanzó la TRMM como una empresa de colaboración entre la NASA y la Agencia Nacional de Desarrollo Espacial de Japón, con cinco instrumentos: el primer radar de precipitación (RP) desde el espacio, el Receptor de Imágenes de Microondas de la TRMM (TMI), un Escáner Visible e Infrarrojo (VIRS), un Sistema de Energía Radiante de Nubes y Tierra (CERES), y un Sensor de Imágenes de Rayos. El radar de precipitación y el radiómetro de microondas miden la distribución vertical de la precipitación sobre los trópicos entre 35° y -35° de latitud, desde la superficie a unos 20 km; resolución horizontal: 4 km; ancho de hilera: 220 km. Se pueden detectar índices de lluvia de hasta 0,7 mm/h. La TRMM reducirá la incertidumbre de las estimaciones de precipitación mundial tropical aproximadamente a un 10 por ciento, un 80 por ciento de mejora sobre la incertidumbre actual de aproximadamente el 50 por ciento. El TMI tiene un conjunto completo de canales que van desde 10,7 GHz hasta 85 GHz y es el primer sensor de satélite capaz de medir de forma precisa la TSM a través de las nubes. El VIRS mide la radiación de cinco regiones espectrales que van del visible al infrarrojo (de 0,63 a 12 μm). Se utiliza como indicador de precipitación y como norma de transferencia entre las medidas de la TRMM y las que se realizan de forma rutinaria en los satélites operativos POES y GOES. La NASA, Japón y otros han iniciado las conversaciones sobre la colaboración en una GPM que aumentaría la cobertura espacial desde lo tropical a lo mundial, utilizando una constelación de pequeños satélites a través de la cooperación internacional, y que aumentaría la cobertura temporal desde lo diario a entre 3 y 6 horas. Esto dotará a la GPM de utilidad para los usuarios operativos y de investigación.

TERRA y AQUA

TERRA ofrecerá, por primera vez, medidas simultáneas de nubes, aerosoles, gases traza atmosféricos, propiedades de superficie terrestre y oceánica, y parámetros de BRT. AQUA llevará una serie de instrumentos nuevos para perfiles de temperatura y humedad atmosféricas, nubes, precipitación y equilibrio radiativo; nieve terrestre y hielo marino; TSM y productividad oceánica; humedad del suelo; y la mejora de la predicción numérica del tiempo.

Tanto TERRA como AQUA llevan MODIS, que ve la Tierra cada uno o dos días, realizando observaciones

en 36 bandas espectrales corregistradas de resolución moderada (de 250 m a 1 km). Se pretende ofrecer continuidad y mejora de las medidas emprendidas por el AVHRR y por distintos escáneres oceánicos de color. MODIS es un radiómetro de imágenes de detección por movimientos bruscos de barrido que consta de un espejo de registro de rastreo transversal, que recoge la óptica, y un conjunto de series lineales con filtros de interferencia espectral localizados en cuatro planes focales. Con un ancho de hilera de visión de 2 330 km (el campo de visión abarca $+55^\circ$ de rastreo transversal), MODIS ofrecerá imágenes de alta resolución radiométrica de radiación solar reflejada por la luz del día y de emisiones térmicas de día y de noche en todas las regiones del mundo. La resolución espacial varía entre 250 m y 1 km en el punto más bajo: 250 m (dos bandas), 500 m (cinco bandas), 1 000 m (29 bandas) en el punto más bajo.

El MODIS de TERRA se utilizará, a través de medidas geolocalizadas simultáneas, para ayudar a la calibración del Radiómetro Espacial Avanzado de Emisión Térmica (ASTER). Las medidas de flujo radiativo de baja resolución del CERES y el instrumento de la Medida de Contaminación en la Troposfera (MOPITT) utilizarán las observaciones de nubes de alta resolución y múltiples canales del MODIS y del ASTER para determinar la situación de las nubes y también su distribución y sus propiedades. Las medidas de ángulo múltiple del Espectrómetro de Imágenes de Ángulo Múltiple (MISR) determinarán las propiedades de reflectancia angular de las características de la superficie terrestre, los aerosoles y las nubes, y todas se utilizarán en el análisis de datos del MODIS, el ASTER y el CERES. Las propiedades de la vegetación se obtendrán de los datos tanto del MODIS como del MISR. Las propiedades de los aerosoles se medirán con MODIS, utilizando su amplio recorrido espectral y una cobertura de uno a dos días de visión sencilla, y también, de forma independiente, por medio del MISR, utilizando sus datos de ángulo múltiple, su recorrido espectral estrecho y una cobertura de dos a nueve días. El vapor de agua se obtendrá de forma independiente a partir de medidas MODIS de luz solar cercana al infrarrojo reflejada y de radiación infrarroja terrestre emitida.

En AQUA, MODIS ofrecerá datos sobre propiedades de nubes para completar la serie de instrumentos que miden la temperatura y la humedad atmosféricas. La Unidad de Sonda de Microondas Atmosférica (AMSU) es un radiómetro de microondas de registro pasivo que consta de dos unidades de sensores, el A1 y el A2, con un total de 15 canales discretos que funcionan a lo largo de un recorrido de frecuencias de 50 a 89 GHz. La AMSU funciona junto con la Sonda Infrarroja Avanzada (AIRS) y con los instrumentos de la Sonda

de Humedad de Brasil (HSB) para ofrecer datos de temperatura y de vapor de agua atmosféricos en zonas tanto nubladas como libres de nubes. El Radiómetro Avanzado de Registro de Microondas (AMSR-E) es un radiómetro de microondas de registro pasivo de prospección con seis frecuencias discreta en el recorrido 6,9 - 89 GHz. Los datos del AMSR-E se utilizarán para ofrecer el índice de precipitación, el contenido de vapor de agua, y el contenido de humedad superficial. La HSB es un radiómetro de microondas de registro pasivo con un total de cinco canales discretos que funciona en el recorrido de 150 a 183 GHz. Los datos de la HSB se utilizan junto con los de la AIRS para ofrecer correcciones del perfil de humedad en presencia de nubes.

Tanto TERRA como AQUA, además de la TRMM, llevan instrumentos CERES. Los productos CERES incluyen tanto radiación reflejada por el sol como emitida por la Tierra desde lo alto de la atmósfera a la superficie terrestre. Las propiedades de las nubes se determinan utilizando medidas simultáneas de otros instrumentos de los EOS, tales como MODIS. Los análisis de los datos CERES, que se construyen a partir de la base creada por las anteriores misiones tales como el Experimento de Presupuesto Energético de la Tierra, originará un mejor conocimiento del papel de las nubes y del ciclo de energía en el cambio climático mundial.

LANDSAT

LANDSAT es una serie de satélites diseñados para recoger datos sobre los recursos de la Tierra para aplicaciones tales como la investigación del cambio mundial, el cambio en la cubierta terrestre y en el uso del suelo, la exploración geológica y mineralógica, la valoración de la salud forestal de los cultivos y la cartografía. La NASA desarrolló y lanzó el LANDSAT-1 en 1972 después del temprano éxito del TIROS y de la serie NIMBUS de la NASA, para incrementar las posibilidades de teledetección de la Tierra desde el espacio de las superficies terrestres con resoluciones de entre 80 y 10 m (es decir, entre 1 y 3 órdenes de magnitud mejores que las de los sensores atmosféricos). Esto fue una respuesta no solo a los geólogos y a los biólogos, sino también a una amplia comunidad de científicos, gestores de recursos naturales e ingenieros. El Escáner de Espectro Múltiple (MSS) demostró ser tan valioso que se ha lanzado una versión suya en cada una de las cinco primeras misiones del LANDSAT. Con el lanzamiento en 1982 del LANDSAT-4, se introdujo el Cartografiado Temático (TM). El TM fue una importante mejora en el MSS, que ofrecía mayor resolución espacial en las regiones visibles y cercanas al infrarrojo (30 m en lugar de 80), y tres bandas espectrales adicionales. El LANDSAT-6, un satélite financiado por el sector priva-

do, no logró alcanzar su órbita en 1993. El LANDSAT-5, lanzado en 1984, sigue ofreciendo cobertura mucho después de su tiempo de vida diseñado, y funciona bajo la dirección de la Vigilancia Geológica de los EE.UU. (USGS). La NASA construyó y lanzó el 15 de abril de 1999 el LANDSAT-7, y funciona bajo la dirección de la USGS en una órbita síncrona con el sol (700 km) para ofrecer continuidad y una mayor cobertura para caracterizar, controlar, gestionar, explorar y observar la superficie continental de la Tierra. La carga útil del LANDSAT-7 consta del Cartografiado Temático Intensificado Plus (ETM+).

Las nuevas características del LANDSAT-7 incluyen una banda pancromática con resolución espacial de 15 m, un canal térmico IR con resolución de 60 m, ambos con ganancias superiores e inferiores, calibración radiométrica a bordo, y un registrador de estado sólido para recoger imágenes fuera del recorrido de los datos de superficie que reciben las estaciones. El registrador tiene una capacidad de 380 gigabytes (100 escenas). El ETM+ ofrece continuidad al TM que iba a bordo del LANDSAT-4 y del LANDSAT-5 y asegura una cobertura mundial, como se definió en el plan de adquisición de largo plazo. Todos los datos del LANDSAT capturados por EE.UU. desde 1972 son archivados, gestionados y distribuidos por el Centro de Datos de Sistemas de Observación de los Recursos de la Tierra de la USGS. La NASA y la USGS emitieron hace poco una petición de propuestas para una misión de continuidad de datos de LANDSAT (LDMC) para suceder al LANDSAT-7; se pretende implantar la LDMC como una adquisición comercial de datos. Juntos, los satélites LANDSAT ofrecen los únicos registros climáticos de alta resolución de las superficies terrestres durante aproximadamente tres décadas.

El estudio Procesos Estratosféricos y su Papel en el Clima demuestra el papel de los procesos dinámicos, radiativos y químicos en la estratosfera y en el sistema climático. Esto incluye las tendencias del ozono (en particular, como respuesta a las acciones emprendidas para prohibir los compuestos que agotan el ozono) y del vapor de agua. La última investigación ha revelado el papel de las nubes polares estratosféricas en la formación de ozono sobre las regiones del Polo Norte y sugiere que el cambio climático puede ralentizar el ritmo de recuperación del ozono.

Espectrómetro de Cartografiado Total del Ozono (TOMS)

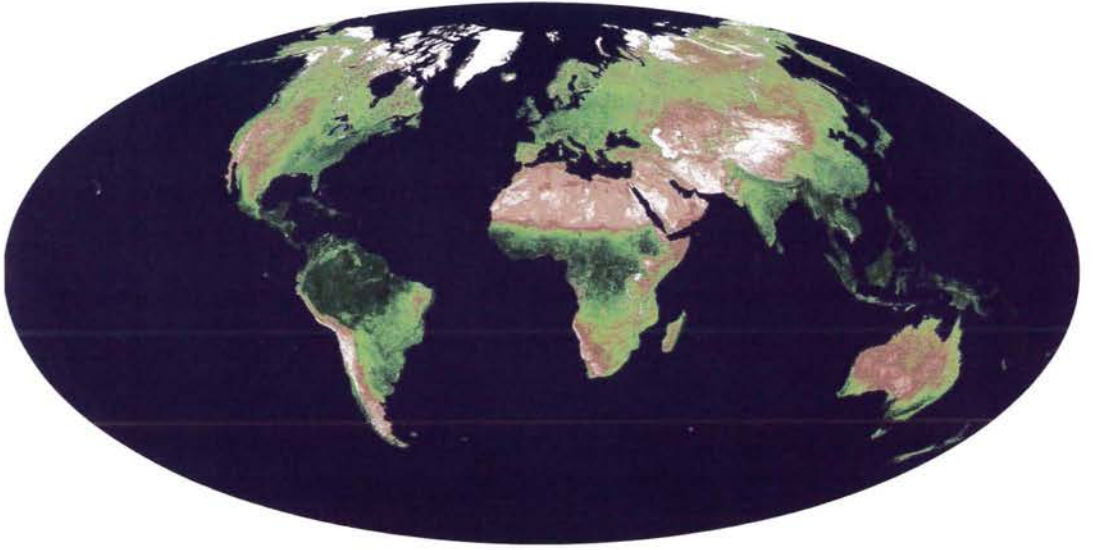
El TOMS ha estado a bordo de distintas naves espaciales desde 1978 y ha constituido el pilar de los esfuerzos internacionales de la OMM, del PNUMA y de otras agencias para hacer un seguimiento del Antártico, del Ártico y del agotamiento mundial del ozono como

apoyo al Protocolo de Montreal sobre agotamiento del ozono. El primer instrumento TOMS fue lanzado por la NASA a bordo del satélite NIMBUS-7 en 1978. Funcionó durante casi 15 años (hasta mayo de 1993). Un segundo TOMS fue a bordo del satélite ruso METEOR-3, que funcionó desde agosto de 1991 hasta diciembre de 1994. Un tercer TOMS voló a bordo del satélite japonés ADEOS-I, que funcionó desde agosto de 1996 hasta junio de 1997. En julio de 1996 se lanzó el cuarto TOMS a bordo de una misión de investigación de la Tierra, y sigue operativo. El tiempo sin cobertura por TOMS (de diciembre de 1994 a julio de 1996) se ha cubierto con datos del SBUV/2 (a bordo del NOAA-11) y con datos del Experimento Europeo de Control del Ozono Mundial. El cuarto TOMS sigue operativo. Al TOMS le seguirá el Instrumento de Control de Ozono de Holanda a bordo del AURA, y después la Serie de Cartografiado y Perfil del Ozono a bordo del NPOESS, que medirá tanto la concentración atmosférica total como la concentración en distintas altitudes.

Experimento de Aerosoles y Gas Estratosféricos (SAGE)

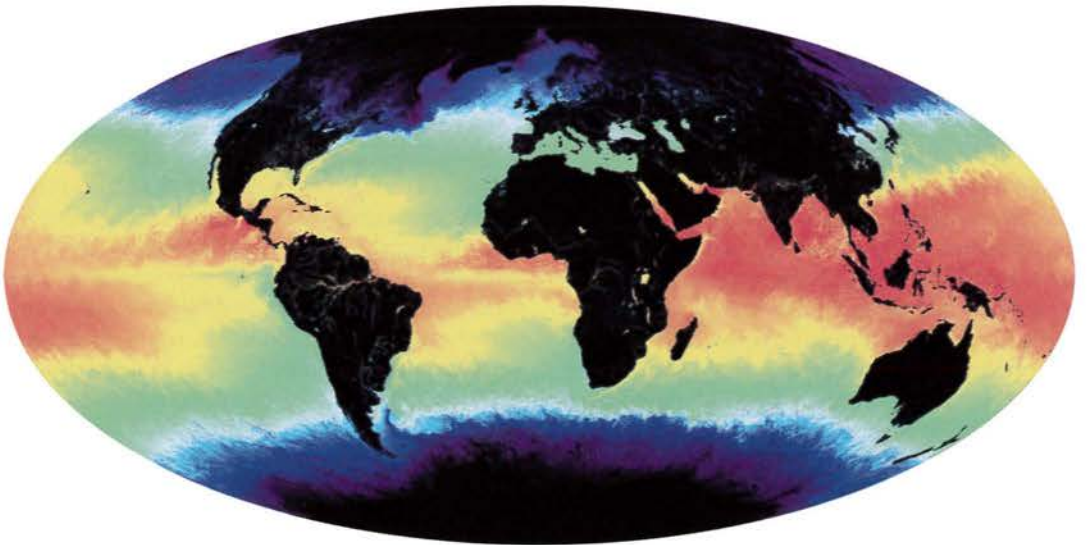
Los datos de ozono estratosférico y de perfil de aerosoles se han obtenido, sobre todo, del instrumento SAGE a bordo del Satélite de Presupuesto de Radiación de la Tierra, lanzado en 1978. Los instrumentos de tipo SAGE (SAM-II, SAGE-I, SAGE-II) han estado en órbita desde 1978. El SAGE-III, que se aprovecha tanto de la ocultación solar como lunar, fue lanzado a bordo del METEOR 3M-1 ruso en diciembre de 2001. A este instrumento le seguirá un SAGE-III a bordo de la Estación Espacial Internacional.

Los aerosoles juegan un papel esencial en los procesos radiativos y químicos que gobiernan el clima de la Tierra. Como la carga de aerosoles estratosféricos ha variado en un factor de 30 desde 1979, es crucial el seguimiento a largo plazo de los aerosoles troposféricos y estratosféricos. El instrumento SAGE-III incorpora dos elementos de nuevo diseño: una serie lineal de dispositivos de carga acoplada (CCD) de detectores; y un conversor analógico-digital de 16 bits. Juntos, permiten la calibración de longitudes de onda, la determinación autoconsistente de la geometría de inspección, medidas de ocultación lunar y cobertura ampliada de longitud de onda. El espectrómetro ofrece cobertura de longitud de onda entre 280 nm y 1 550 nm. La serie lineal de CCD ofrece cobertura continua entre 280 nm y 1 030 nm con una resolución aproximada de 1 nm. Se utiliza un fotodiodo discreto para realizar mediciones de aerosoles en 1 550 nm. Esta configuración permite que SAGE-III realice mediciones múltiples de las características de absorción de cada especie gaseosa objetivo y mediciones de longitud de onda múltiple de extinción en banda ancha por aerosoles.



136

Imágenes del Espectrómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS): (arriba) índice de vegetación mundial (<http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?10374>); (abajo) temperatura mundial de la superficie del mar (en °C) (<http://visibleearth.nasa.gov/cgi-bin/viewrecord?10395>)



Satélite de Investigación de la Atmósfera Superior (UARS) y AURA

Lanzado por la NASA en septiembre de 1991, el UARS fue el primer satélite dedicado a ampliar nuestro conocimiento de la química y la dinámica de la estratosfera y de la mesosfera de la Tierra. Confirmó el papel de los CFC en el agotamiento del ozono y clarificó los procesos químicos que originan la pérdida de ozono ártico y antártico. El UARS hizo las primeras mediciones de gases estratosféricos clave: nitrato de cloro (ClONO_2), fluoruro de hidrógeno (HF), cloruro de hidrógeno (HCl) y pentóxido de dinitrógeno (N_2O_5). Estas medidas, junto con las de óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y de ácido nítrico (HNO_3) ofrecen una imagen de conjunto de los procesos fotoquímicos estratosféricos implicados en la pérdida de ozono. El UARS ofreció el primer cartografiado global de las capas de aerosoles volcánicos y documentó la lenta disminución de las cantidades de aerosoles que siguieron a la erupción del Monte Pinatubo, en las Filipinas. El satélite también nos ofreció la primera imagen mundial de las masas atmosféricas, un conocimiento más claro de las variaciones de radiación solar ultravioleta, una visión de la relación entre el vapor de agua de la troposfera superior y el clima e información de varios años sobre el transporte de gases traza en la estratosfera.

Está previsto que el satélite AURA de los EOS funcione en el período 2003-2008, y se basa en la herencia de las mediciones iniciadas por el UARS. AURA también llevará un Espectrómetro de Emisión Troposférica totalmente nuevo y de alta resolución espectral

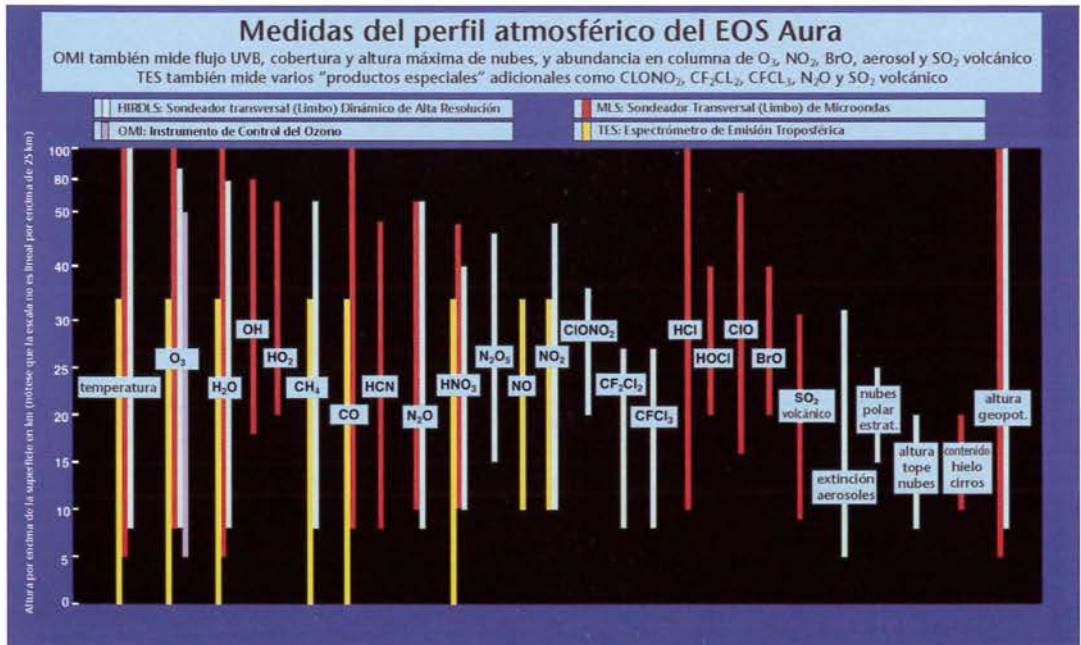
($\sim 0,025 \text{ cm}^{-1}$), que permitirá medidas de resolución vertical del ozono y de los gases traza constituyentes. La figura inferior resume la impresionante serie de medidas de química atmosférica realizadas por el AURA. (<http://eoschem.gsfc.nasa.gov/instruments/measurements.html>)

Otro importante compromiso de la NASA es facilitar datos de todos estos satélites a todos los investigadores sin ningún tipo de restricción. La NASA invita a las agencias operativas a que tengan en cuenta el uso rutinario de estas observaciones para incrementar los productos y servicios que ofrecen, y para crear otros nuevos a medida que los servicios meteorológicos siguen ampliándose de la meteorología a la predicción climatológica.

Camino de una Estrategia Integrada de Observación Mundial

La ubicuidad del cambio mundial, el poder de la observación desde el espacio para observarlo y la utilidad tanto de los sistemas meteorológicos operativos como de los orientados a la investigación ha originado un mayor impulso para la colaboración internacional en las ciencias terrestres. Con más de 100 años de experiencia en la coordinación internacional de observaciones, y con una historia de integración de observaciones desde el espacio con las realizadas in situ, la OMM está en una posición única para jugar un papel de dirección en la próxima era.

A mediados de la década de 1990, las naciones que compartían el espacio bajo la tutela del G-7 pidieron al Comité de Satélites de Observación de la Tierra



que empezara a reunirse para tratar la posibilidad de coordinar sus esfuerzos de forma más integrada y estratégica de lo que se había hecho hasta entonces. De estas conversaciones nació el concepto de Estrategia Integrada de Observación Mundial (IGOS). Desde el inicio, la OMM y su VMM fueron incluidas en las conversaciones.

La IGOS se definió a propósito como una estrategia y no como un sistema: los sistemas tienden a ser cerrados y rígidos; las estrategias tienden a ser más abiertas y capaces de madurar. La noción de IGOS permite tratar conjuntamente los programas de investigación y de observación, y permite la colaboración natural entre los sistemas de observación operativos y los orientados a la investigación. Los socios de la IGOS han empezado, sabiamente, despacio, con unos pocos proyectos demostrativos de colaboración en investigación de cubierta forestal y océanos. Pero ofrece el marco para tratar futuros programas de colaboración.

La estructura IGOS encaja bien con la gestión del entorno en el que evoluciona la observación de la Tierra. Entre las características clave de este entorno se incluyen: un número cada vez mayor de naciones compartiendo el espacio; una serie mayor de tipos de observación para tratar las complejidades del cambio mundial; y soluciones tecnológicas que permiten sistemas de observación y tipos de productos de información más integrados.

Entre las observaciones de amplio interés internacional se incluyen fuentes y sumideros mundiales de carbono, vientos troposféricos mundiales, humedad del suelo, salinidad de la superficie del océano,

procesos polares y procesos sólidos de la Tierra. Para algunos pueden faltar unos pocos años de experimentación. Las capacidades futuras de integración incluyen cambio de las mediciones existentes a órbitas geoestacionarias o L1/L2* para obtener vistas sinópticas, redes que funcionen de forma autónoma o inteligentes de sensores y sistemas de proceso de información en órbita que generen productos de conocimiento a medida para transmitirlos directamente al ordenador del usuario a un coste que no supere el de una llamada telefónica internacional actual.

Pero eso sería tema para otro artículo. Lo que hay que resaltar ahora es que la OMM y sus socios están en medio de una profunda evolución de la observación de la Tierra desde el espacio. Lo crítico de la investigación del cambio mundial está en lograr que converjan los sistemas de observación operativos y de investigación. Las nuevas tecnologías están haciendo visibles un conjunto mayor de parámetros del sistema terrestre. Pero el proceso organizativo para incorporar nuevas capacidades de observación desde esfuerzos de investigación a sistemas operativos va por detrás del ritmo al que las observaciones de investigación se vuelven útiles para mejorar los productos de predicción operativa meteorológica y climatológica, o al que los presupuestos aumentan para incorporar nuevas necesidades de observación sistemática para investigación climática en sistemas de observación meteorológica. El liderazgo de la OMM es esencial para garantizar que se pueda disponer tanto de las observaciones como de la investigación para hacer frente a los desafíos planteados por el cambio mundial en los años y las décadas venideros.



* L1 y L2 se refieren a puntos libres de Lagrange, es decir, puntos de gravedad neutral en los que las influencias gravitacionales de la Tierra y del sol están equilibradas. L1, a, aproximadamente, un millón de millas de la Tierra en la línea que la une con el sol, permite a una nave espacial una visión continua de todo el disco de la Tierra iluminada por el sol. Permitirá estudios de los cambios en el ciclo diurno. Por otra parte, L2 permite una visión continua de la cara de la Tierra en la que es de noche. Actualmente, hay sondas que vigilan el sol en L1 (p. ej., Soho) pero no las hay que vigilen la Tierra. Una ventaja sobre la onda geoestacionaria es que permiten una visión mejor de las regiones polares.