

UIT-R

Sector de Radiocomunicaciones de la UIT

Recomendación UIT-R RS.1883-1
(12/2018)

Utilización de sistemas de detección a distancia para el estudio del cambio climático y de sus efectos

Serie RS
Sistemas de detección a distancia



Prólogo

El Sector de Radiocomunicaciones tiene como cometido garantizar la utilización racional, equitativa, eficaz y económica del espectro de frecuencias radioeléctricas por todos los servicios de radiocomunicaciones, incluidos los servicios por satélite, y realizar, sin limitación de gamas de frecuencias, estudios que sirvan de base para la adopción de las Recomendaciones UIT-R.

Las Conferencias Mundiales y Regionales de Radiocomunicaciones y las Asambleas de Radiocomunicaciones, con la colaboración de las Comisiones de Estudio, cumplen las funciones reglamentarias y políticas del Sector de Radiocomunicaciones.

Política sobre Derechos de Propiedad Intelectual (IPR)

La política del UIT-R sobre Derechos de Propiedad Intelectual se describe en la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI a la que se hace referencia en la Resolución UIT-R 1. Los formularios que deben utilizarse en la declaración sobre patentes y utilización de patentes por los titulares de las mismas figuran en la dirección web <http://www.itu.int/ITU-R/go/patents/es>, donde también aparecen las Directrices para la implementación de la Política Común de Patentes UIT-T/UIT-R/ISO/CEI y la base de datos sobre información de patentes del UIT-R sobre este asunto.

Series de las Recomendaciones UIT-R

(También disponible en línea en <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>)

Series	Título
BO	Distribución por satélite
BR	Registro para producción, archivo y reproducción; películas en televisión
BS	Servicio de radiodifusión (sonora)
BT	Servicio de radiodifusión (televisión)
F	Servicio fijo
M	Servicios móviles, de radiodeterminación, de aficionados y otros servicios por satélite conexos
P	Propagación de las ondas radioeléctricas
RA	Radio astronomía
RS	Sistemas de detección a distancia
S	Servicio fijo por satélite
SA	Aplicaciones espaciales y meteorología
SF	Compartición de frecuencias y coordinación entre los sistemas del servicio fijo por satélite y del servicio fijo
SM	Gestión del espectro
SNG	Periodismo electrónico por satélite
TF	Emisiones de frecuencias patrón y señales horarias
V	Vocabulario y cuestiones afines

Nota: Esta Recomendación UIT-R fue aprobada en inglés conforme al procedimiento detallado en la Resolución UIT-R 1.

Publicación electrónica
Ginebra, 2019

© UIT 2019

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede reproducirse por ningún procedimiento sin previa autorización escrita por parte de la UIT.

RECOMENDACIÓN UIT-R RS.1883-1

Utilización de sistemas de detección a distancia para el estudio del cambio climático y de sus efectos

(2011-2018)

Cometido

Esta Recomendación proporciona directrices sobre la provisión de datos obtenidos por teledetección a bordo de satélites a efectos de estudiar el cambio climático.

Palabras clave

Cambio climático, servicio de exploración de la Tierra por satélite, SETS (activo), SETS (pasivo), teledetección

Recomendaciones del UIT-R conexas

Recomendación UIT-R RS.1859 – Utilización de sistemas de teledetección para la recopilación de datos en caso de catástrofe natural y emergencias similares

Informe UIT-R RS.2178 – Papel fundamental e importancia global de la utilización del espectro radioeléctrico para observaciones de la Tierra y aplicaciones conexas

La Asamblea de Radiocomunicaciones de la UIT,

considerando

- a) que el cambio climático es un fenómeno global que afecta a toda la humanidad;
- b) que cabe esperar que el cambio climático se manifieste mediante importantes modificaciones en el entorno terrestre que, a su vez, darán lugar a la aparición o al incremento de las catástrofes naturales;
- c) que para el estudio del cambio climático son fundamentales las capacidades de observación de la Tierra que sólo pueden satisfacer la instrumentación o los sensores de teledetección a bordo de satélites;
- d) que dichos sensores de teledetección a bordo de satélites ya existen y funcionan en bandas de frecuencias atribuidas actualmente al servicio de exploración de la Tierra por satélite (SETS);
- e) que, con el tiempo, las capacidades de detección mejoran y la sensibilidad de los sensores de teledetección a bordo de satélites se incrementa;
- f) que los sistemas SETS y MetSat son esenciales para la vigilancia y predicción del cambio climático, la supervisión de los océanos, el clima, los recursos hídricos, las previsiones meteorológicas y la asistencia en la protección de la biodiversidad,

reconociendo

que en la Resolución **673 (Rev.CMR-12)** se resuelve: 1) seguir reconociendo que el uso del espectro para aplicaciones de observación de la Tierra presenta un considerable valor económico y social, como se expone en los Anexos 1 y 2; 2) instar a las administraciones a que tengan en cuenta las necesidades de radiofrecuencia de los servicios de observación de la Tierra y, en particular, la protección de los sistemas de observación de la Tierra en las bandas de frecuencias correspondientes; 3) alentar a las administraciones a que consideren la importancia de la utilización y disponibilidad de espectro para las aplicaciones de observación de la Tierra antes de tomar decisiones que pudieran afectar negativamente a dichas aplicaciones,

observando

a) que la Resolución 73 – Tecnologías de la información y la comunicación y el cambio climático, reconoció que dichas TIC pueden aportar una contribución fundamental a la hora de reducir los efectos del cambio climático y adaptarse a los mismos, y que las TIC desempeñan un papel de gran importancia en la supervisión y estudio del cambio climático soportando la investigación científica básica, que ha ayudado a presentar este tema del cambio climático ante el gran público y a aumentar la sensibilización sobre los retos futuros que nos esperan al respecto;

b) que el Informe de la UIT «La UIT y el cambio climático», habla de fortalecer las asociaciones estratégicas con varios organismos de la Naciones Unidas, con el Banco Mundial, la Comisión Europea, con las agencias y organizaciones nacionales e internacionales (por ejemplo, las agencias de meteorología, el Grupo de Observaciones de la Tierra, EUMESAT, ESA, el Grupo de Coordinación de Frecuencias Espaciales, JAXA, NOAA, NASA y Roscosmos), con las ONG y con el sector privado, implicados en la lucha contra el cambio climático y aborda el cometido que puede desempeñar el SETS en la supervisión del cambio climático;

c) que el Informe UIT-R RS.2178 proporciona una amplia panorámica de las distintas aplicaciones de radiocomunicaciones utilizadas en la observación de la Tierra, la investigación espacial y la radioastronomía y describe su influencia y ventajas económicas y sociales para la comunidad mundial y, especialmente, su importancia para el estudio del cambio climático y la predicción del mismo, y para la alerta temprana, la supervisión y la reducción de los efectos de las catástrofes naturales y artificiales;

d) que el Informe del UIT-D D-STG-SG02.24-2014, que responde a la Cuestión 24/2 del UIT-D relativa a las TIC y el cambio climático, destaca las graves consecuencias del cambio climático y la función que desempeña la teledetección para su seguimiento y la comprensión de los procesos que intervienen en él,

recomienda

1 que las administraciones se familiaricen con las aplicaciones de los sensores de teledetección a bordo de los satélites para el estudio del cambio climático y reconozcan su importancia, como se explica en el Anexo 1;

2 que las administraciones y los operadores continúen suministrando datos medioambientales relacionados con el clima, como se indica en el Anexo 2;

3 que se refuerce la protección ofrecida a los sistemas que proporcionan observaciones climatológicas de vital importancia.

Anexo 1

Utilización de sistemas de detección a distancia para el estudio del cambio climático y de sus efectos

1 Introducción

Los vehículos espaciales del SETS proporcionan regularmente cobertura mundial con los mismos instrumentos o instrumentos funcionalmente similares. Por tanto, suministran conjuntos de datos plenamente coherentes en todo el mundo. Frecuentemente, esos conjuntos de datos se solapan en el tiempo y permiten elaborar conjuntos de datos contiguos que abarcan décadas. Si bien estos conjuntos de datos no se extienden a siglos o milenios, proporcionan, no obstante, datos cruciales para los estudios del cambio climático.

Los satélites constituyen el medio más adecuado de obtener una instantánea del estado actual de nuestro planeta desde una única perspectiva unificada. Ningún instrumento concreto o vehículo espacial puede ofrecer una imagen completa; sin embargo, la presente flota de vehículos espaciales, que funcionan de manera coordinada y comparten sus datos, nos dan la mejor evaluación disponible de las condiciones globales. Un solo instrumento de los satélites de órbita polar puede observar la totalidad de la Tierra diariamente y los instrumentos en los satélites geoestacionarios supervisan constantemente el ciclo diurno del disco de la Tierra situado por debajo de ellos. Así pues, los satélites medioambientales polares y geoestacionarios juntos mantienen una vigilancia constante de todo el planeta.

Estos datos medioambientales cumplen dos objetivos:

- proporcionan una base para observar y medir los cambios climáticos y sus efectos en el planeta;
- ofrecen información científica sólida para la elaboración de modelos climáticos.

Es fundamental asegurar una mejor comprensión del sistema de la Tierra – sus condiciones meteorológicas, clima, océanos, suelos, geología, recursos naturales, ecosistemas y las amenazas naturales y antropogénicas – con el fin de mejorar las previsiones, la adaptación y la atenuación de los cambios globales esperados y sus efectos en la civilización humana.

Las ciencias de la climatología han avanzado de forma espectacular gracias a las observaciones por satélite. El radiómetro incorporado en el Explorer 7 de 1959 a 1961 hizo posible medir directamente la energía que entra y sale de la Tierra. Esta misión y las siguientes permitieron a los científicos medir el balance energético de la Tierra con un nivel de precisión mucho mayor en comparación con el logrado en anteriores estimaciones indirectas y dio lugar a la aparición de modelos climáticos mejorados. A medida que los radiómetros se perfeccionaron, estas mediciones lograron la precisión, la resolución espacial y la cobertura global necesaria para observar directamente las perturbaciones en el balance de energía global de la Tierra asociadas a los fenómenos a corto plazo tales como erupciones volcánicas importantes o el fenómeno El Niño-Oscilación Austral (ENSO). Estos radiómetros miden directamente el transporte de calor en sentido Ecuador-Polo provocado por el sistema climático, el efecto invernadero de los gases atmosféricos y el efecto de las nubes sobre el balance energético total de la Tierra. Estas observaciones han profundizado nuestra comprensión del sistema climático y han mejorado la precisión de los modelos climáticos.

Los satélites implicados en la investigación atmosférica (por ejemplo, el AURA) y que soportan la meteorología operacional (por ejemplo, las series MetOp europeas y las series de satélites en órbita polar de la Administración Nacional de Estados Unidos de América para Mediciones Oceánicas y Atmosféricas (NOAA)) proporcionan diariamente perfiles tridimensionales a escala mundial de la temperatura y humedad atmosféricas así como datos relativos a los componentes atmosféricos

secundarios, tales como el ozono. Si bien estos datos se introducen en los modelos de previsiones meteorológicas, también sirven para definir el estado actual de la atmósfera y ofrecer pruebas a corto plazo de modelos climáticos.

Otras características terrenales son supervisadas por vehículos espaciales que no intervienen en estas mediciones atmosféricas. Por ejemplo, se pueden formular las siguientes observaciones:

- desde hace varias décadas, la superficie de la Tierra es supervisada constantemente por la serie Landsat (desde 1973) y la serie SPOT (desde 1986);
- desde 1978, las concentraciones de hielo marino son supervisadas constantemente por el Numbus-7 y, posteriormente, por la serie DMSP;
- desde 1996, los vientos en la superficie marina son vigilados intermitentemente por ADEOS-I y II, QUIKSCAT, el instrumento RapidSCAT en la ISS y, más recientemente, el OSCAT en OceanSat-2, KU-RFSCAT en HY-2A y ASCAT en los MetOp;
- desde 1992, las alturas y temperaturas de la superficie marina se vigilan continuamente por TOPEX/Poseidon y la serie Jason; y
- la humedad del suelo y la salinidad del océano son vigilados desde 2009 por el SMOS, Aquarius y SMAP.

Otros vehículos espaciales y otras técnicas, tales como los radares de apertura sintética (SAR) y las observaciones por microondas pasivas, mejoran nuestra capacidad para describir nuestro planeta, particularmente mediante la observación de las regiones polares donde la oscuridad invernal impide la obtención de imágenes ópticas o de las regiones en las que la persistente nubosidad oscurece la superficie (por ejemplo, la región amazónica, África central y los países insulares).

Se prevé que el alza del nivel del mar debido al cambio climático tendrá los primeros efectos graves en la sociedad. Se suele atribuir la elevación del nivel del mar al aumento de las temperaturas de los océanos y a la adición de agua procedente de los hielos glaciares. Si todo el hielo glacial de Groenlandia se derritiera, los mares se elevarían unos 7 metros; si todo el hielo glacial sobre la Antártida se derritiera, los mares se elevarían unos 70 metros. Alrededor del 40% de la población de la Tierra vive a menos de 100 km de una costa marina y podría verse amenazada por inundaciones a largo plazo (de siglos a milenios). Ocho de las diez ciudades más grandes del mundo están situadas en una costa. Esas ciudades y todas las zonas costeras bajas se verían gravemente afectadas por el aumento del nivel del mar de sólo unos pocos metros. Se prevé que en el próximo siglo o dos se producirá un aumento del nivel del mar de esa magnitud. Tanto la temperatura del océano como la masa glacial, que contribuyen a la elevación del nivel del mar, son medidas por instrumentos a bordo de satélites.

2 Hielo o la criosfera

Una de las cuestiones principales que se plantea en la investigación del cambio climático y la criosfera (región de los hielos) es la forma en que el calentamiento climático afectará a las capas de hielo. Este tema reviste importancia ya que el volumen de hielo continental y de agua fundida que llega a los océanos contribuye decisivamente en los cambios de nivel del mar. Antes de la aparición de los satélites, los datos recogidos de las regiones polares se limitaban a aquéllos obtenidos localmente durante las estaciones del año más favorables. La utilización de instrumentación radioeléctrica a bordo de satélites ha demostrado ser particularmente útil en las regiones polares puesto que en esas zonas de la tierra hay grandes periodos de oscuridad durante el invierno, obstaculizando de esa forma las observaciones del espectro visible. La visión sinóptica obtenida desde los satélites, especialmente desde los satélites equipados con sensores radioeléctricos, ha incrementado la cobertura de datos polares en varios órdenes de magnitud y el acceso ya no queda restringido por las estaciones del año.

Antes de la aparición de los satélites, se suponía que el equilibrio de la masa de hielo en la Antártida y en Groenlandia estaba controlado por la diferencia entre la tasa de fusión del hielo y la tasa de acumulación, y se suponía igualmente que el ritmo de descarga de hielo en el océano era constante. Las imágenes de radar del satélite RADARSAT demostraron que:

- 1) la velocidad del flujo de la capa de hielo es muy variable;
- 2) existen redes complejas de corrientes de hielo;
- 3) la velocidad del flujo de la corriente de hielo hacia el mar ha aumentado notablemente debido al cambio climático.

Una evidencia de que se está produciendo un cambio climático/calentamiento global es la retirada, en vez del avance, de los flujos de las capas de hielo (tanto en los glaciares como en el hielo del mar). El estudio de los regímenes de los glaciares en todo el mundo revela una amplia merma generalizada desde finales de los años 70, con una marcada aceleración a finales de los 80. La teledetección se utiliza para documentar los cambios en la extensión de los glaciares (el tamaño del glaciar) y la posición de la línea de equilibrio (la elevación del glaciar cuando la acumulación invernal queda equilibrada por la fusión en el verano). Desde 1972, los satélites han proporcionado imágenes ópticas de la extensión de los glaciares. El SAR se emplea actualmente para estudiar las zonas de acumulación de nieve del glaciar y la fusión del hielo a fin de determinar la variación climática, y la altimetría por láser se usa para medir los cambios en la elevación del glaciar.

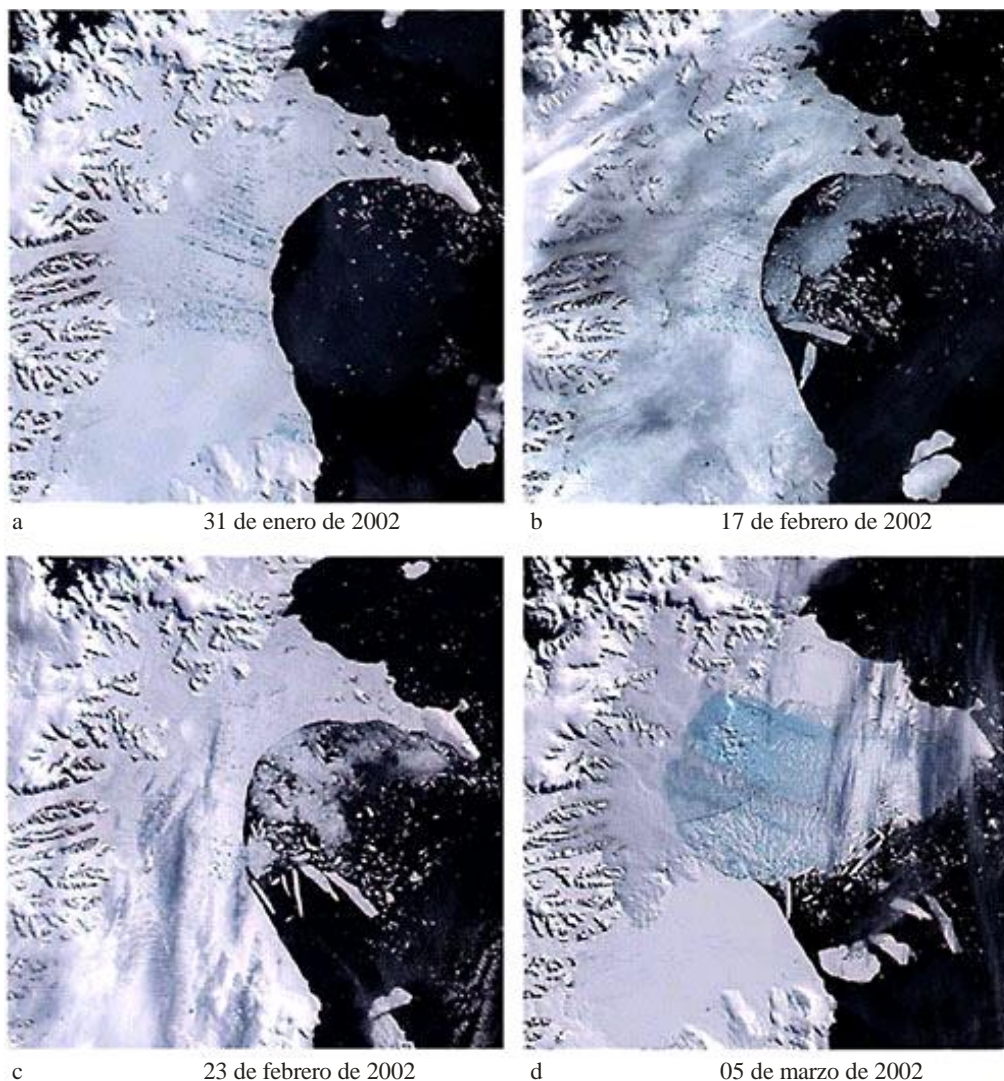
Como los glaciares responden a los anteriores y a los actuales cambios climáticos, se ha elaborado un completo inventario de glaciares a escala mundial con objeto de realizar un seguimiento de la extensión actual así como de las tasas de cambio de los glaciares del mundo. El programa de Mediciones de la Masa de Hielo en la superficie terrestre del proyecto Space utiliza datos del satélite ASTER y el Tragador Temático Ampliado de Landsat para inventariar unos 160 000 glaciares en todo el mundo. Estas mediciones y los resultantes análisis de tendencias son indicadores importantes del cambio climático y constituyen un ejemplo del valor y la importancia que tienen los conjuntos de datos obtenidos a largo plazo para comprender el complejo sistema climático.

Las capas de hielo pueden supervisarse fácilmente mediante la instrumentación a bordo de los vehículos espaciales, tanto activos como pasivos. Las rupturas de importantes placas de hielo (por ejemplo, la Barrera de Hielo Larsen B) en el Antártico se han observado desde el espacio. Estas rupturas, si bien no cabe atribuirles al calentamiento global, han sido aceleradas por dicho calentamiento. El colapso de la Barrera de Hielo Larsen B en la Antártida en 2002, detectado sólo gracias a la frecuente cobertura por imágenes de satélite, ilustra de manera inequívoca la dinámica de las capas de hielo en periodos de tiempo extremadamente breves (Fig. 1). Estas revelaciones tiene consecuencias de gran calado: la rápida transferencia de hielo de las capas de hielo continentales al mar puede provocar un espectacular crecimiento del nivel del mar.

También se pueden vigilar desde el espacio las grandes grietas que aparecen en las mesetas de hielo de la Antártida. Las observaciones regulares de la Antártida durante el verano mediante la combinación de imágenes ópticas de Sentinel-2 de Copernicus y los productos de radar de Sentinel-1 han demostrado su utilidad para el seguimiento de los rápidos cambios medioambientales y el suministro de información esencial para la toma de decisiones fundamentadas sobre cuestiones relativas a la seguridad en la Antártida.

FIGURA 1

**Colapso de la Barrera de Hielo Larsen B en la Antártica Occidental.
En sólo dos días se desintegraron 2 000 km² de barrera de hielo,
dejando pequeños fragmentos de hielo**



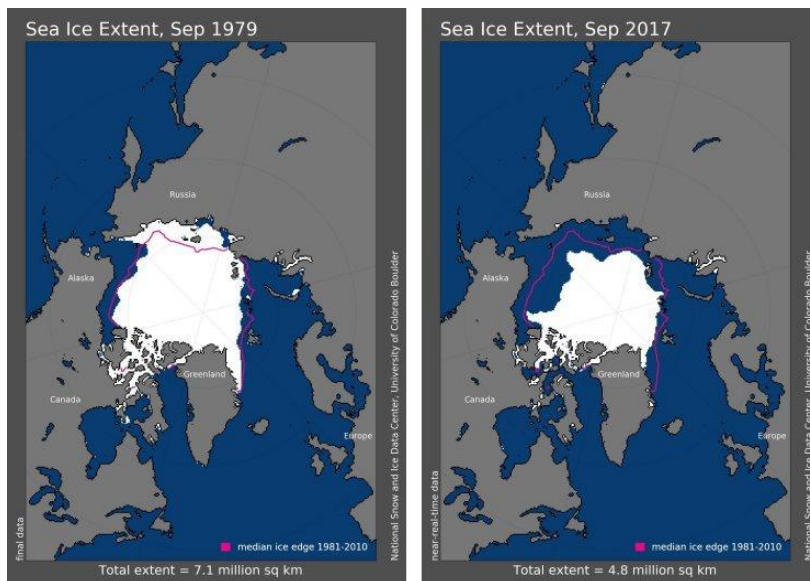
RS.1883-01

El hielo marino se forma a partir de agua del océano que se congela, ya sea a lo largo de las costas o en el fondo del mar (hielo rápido) o que flota en la superficie (hielo a la deriva) o se consolida (hielo compacto). Las extensiones de hielo compacto más importantes son los bancos de hielo polar. Debido a las grandes cantidades de agua que se añaden o se eliminan de los océanos y la atmósfera, el comportamiento de los bancos de hielo polar tiene repercusiones significativas en los cambios en el clima a nivel mundial.

El hielo del mar ha sido continuamente supervisado desde 1979 mediante sensores de microondas pasivos (radiómetros de microondas de barrido electrónico (ESMR), radiómetros de microondas de exploración multicanal (SMR), generadores de imágenes de microondas de sensor (SSM/I) y sistema de observación de la Tierra mediante radiómetros de exploración por microondas avanzado (AMSR-E). Al no estar limitados por las condiciones meteorológicas o por los niveles de iluminación, son perfectamente adecuados para supervisar el hielo en el mar debido al intenso contraste en las emisiones de microondas entre el océano abierto y el océano cubierto de hielo. El conjunto de datos recopilado a lo largo de 35 años con estos sensores de microondas pasivos ha permitido realizar un análisis de las tendencias que va más allá de la fuerte variabilidad interanual del hielo del mar.

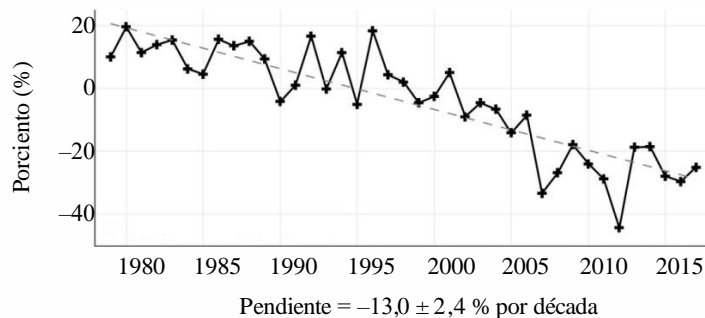
Desde 2000, se ha observado en el Ártico unos mínimos en las cantidades de hielo en verano durante cuatro de los últimos seis años (véase la Fig. 2). Además, las indicaciones más recientes apuntan a que las extensiones del hielo en invierno está empezando a disminuir a una mayor velocidad, posiblemente como resultado del calentamiento de los océanos asociado a una capa de hielo más delgada y menos extendida, como se puede apreciar en la Fig. 3. El ritmo lineal de descenso para febrero es de 46 900 km² por año, o el 3% por década. El derretimiento y la congelación del hielo (tanto el hielo marino como el glacial) también influyen en la salinidad de los océanos y vinculan la salinidad en la superficie marina a los cambios regionales del nivel del mar. Estas observaciones de la disminución del hielo en el Ártico son coherentes con los resultados del modelo climático que predicen un incremento del calentamiento en latitudes elevadas, que a su vez viene provocado en gran medida por el albedo del hielo. En contraste con el Ártico, no se ha detectado una tendencia clara en el volumen de la cobertura de hielo del Antártico.

FIGURA 2
 La superficie de hielo en el Ártico en septiembre de 1979 y 2017 . La línea de color magenta muestra el valor mediano de la extensión del hielo marino durante el mes entre 1981 y 2010



RS.1883-02

FIGURA 3
 Anomalia observada en la superficie de la capa de hielo marino entre 1979 y 2017



RS.1883-03

En estos últimos años, cada vez son más numerosos los informes sobre previsión de las condiciones del hielo del mar y estos informes se basan enteramente, o casi, en datos procedentes de satélites. Por ejemplo, el programa de Evaluación del Impacto Climático en el Ártico (ACIA 2005) llegó a la conclusión de que una disminución continua en el hielo del Ártico puede desembocar a corto plazo en un Océano Ártico sin hielo en algunas estaciones del año, lo que aumentaría consiguientemente el tráfico de barcos en esa zona ya que las rutas marítimas a través del Océano Ártico son mucho más cortas que las rutas que atraviesan el Canal de Panamá o el Canal de Suez. Sin embargo, también hay cierta evidencia de que una reducción de la capa de hielo vendrá acompañada de una mayor variabilidad interanual, al menos en algunas regiones.

Comprender los cambios en las capas de hielo, el hielo del mar, los casquetes polares y los glaciares reviste gran importancia a la hora de pronosticar el cambio climático y predecir sus efectos. En particular, la disminución de las capas de hielo y su contribución al incremento del nivel del mar y los océanos fue identificado como el tercer «Acontecimiento del Año» más significativo en 2006, según la revista Science. Teniendo en cuenta el cambio climático previsto y el correspondiente incremento del nivel del mar, contar en el futuro con una cobertura polar por satélite servirá para satisfacer unas necesidades sociales fundamentales que no pueden cubrirse por ningún otro sistema de observación.

3 Los océanos

Los océanos ocupan aproximadamente el 71% de la superficie de la Tierra y desempeñan un papel fundamental en el sistema climático en varios aspectos. También constituyen un excelente indicador del cambio climático. Por ejemplo, la medición de los niveles del mar revela claves fundamentales para entender el calentamiento global.

Los cambios de la meteorología, del clima y del medio ambiente plantean unos retos muy serios a la humanidad. Enfrentarse a esos retos exige mejorar los sistemas de previsión meteorológica, especialmente en lo referente a las predicciones a medio y largo plazo. Si se tiene una clara idea de lo que va a suceder en los próximos 10 días, en los próximos meses, o incluso en la próxima estación del año, las personas y la industria pueden prepararse mejor para hacer frente a comportamientos meteorológicos inestables. Abordar estos retos también implica una mejor comprensión de los factores climáticos globales que provocan fenómenos tales como El Niño y La Niña en el Océano Pacífico, peligrosos huracanes y tifones y, especialmente, crecidas del nivel del mar.

Una clave importante para entender el comportamiento de los fenómenos que provocan el cambio en los patrones climáticos sólo puede obtenerse representando las variaciones en las condiciones de la superficie de los océanos en todo el mundo y utilizando los datos recogidos para desarrollar y ejecutar modelos poderosos del comportamiento de los océanos. Combinando los modelos oceánico y atmosférico, podemos realizar previsiones tanto a corto como a largo plazo con la precisión necesaria. El acoplamiento de los modelos oceánico y atmosférico es necesario para tener plenamente en cuenta la dinámica a menor escala (media distancia) de los océanos. Este acoplamiento de los citados modelos se ha convertido en una parte muy importante de las previsiones meteorológicas para periodos mayores de dos semanas. Los océanos también constituyen una parte importante del proceso del cambio climático y es ampliamente reconocido que una elevación del nivel del mar en todo el mundo es potencialmente una de las consecuencias más devastadoras del calentamiento global.

3.1 Temperatura de la superficie del mar y elevación media del nivel del mar

Una contribución importante para las ciencias del clima fue el registro a largo plazo de la temperatura de la superficie del mar (SST) mediante el radiómetro avanzado de muy alta resolución (AVHRR) incorporado en las series de satélites de observación por infrarrojo de TV (TIROS-N) y la serie de satélites NOAA. La SST se mide actualmente también mediante instrumentos de microondas pasivos.

La SST es uno de los indicadores más importantes del cambio climático global y un parámetro vital para el establecimiento de modelos climáticos. Al ser el registro de datos oceanográficos más largo obtenido por teledetección, tiene una repercusión a escala mundial.

El registro de la SST ha demostrado el papel de los océanos en la variabilidad del clima regional y global y ha revelado importantes detalles sobre las corrientes oceánicas. Más del 80% del calentamiento total del sistema de la Tierra se almacena en los océanos y las corrientes oceánicas redistribuyen este calor en todo el planeta. El análisis de las tendencias de los registros de la SST ha ayudado a mejorar la comprensión de la intensa interacción entre clima y atmósfera en los trópicos, que también es responsable del fenómeno El Niño-Oscilación Austral (ENSO) en el océano Pacífico. Los avances en la comprensión del fenómeno ENSO, gracias a las observaciones por satélite de los vientos, las alturas y las temperaturas de la superficie marítima, han tenido una gran repercusión sobre las predicciones del clima y la meteorología regionales. Además, la intensidad de los huracanes ha estado vinculada a las temperaturas de la superficie del mar. En consecuencia, el conocimiento tanto de dichas temperaturas como de los propios huracanes se ha beneficiado de los estudios realizados utilizando datos procedentes de los satélites.

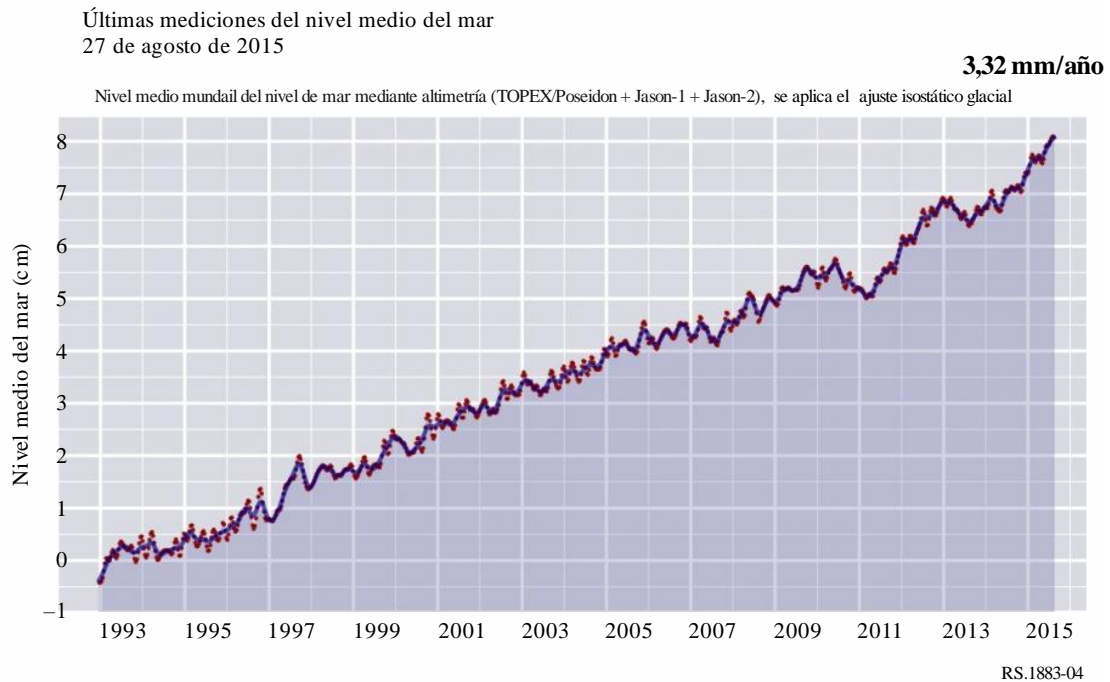
Además, la SST es fundamental en el acoplamiento del océano con la atmósfera y es un factor de control en el intercambio del calor y el vapor de agua entre ambos. El análisis de las tendencias de la SST ha puesto en evidencia el calentamiento global y la importante interacción entre el clima y la atmósfera en los trópicos, que también es responsable del fenómeno ENSO. Estas observaciones de la SST, combinadas con mediciones realizadas *in situ* de la temperatura vertical del océano hasta una profundidad de 3 000 m, han demostrado el origen antropogénico del calentamiento global de los océanos.

Comprender el incremento de la SST y la aportación del calor antropogénico a la superficie del océano también tiene consecuencias importantes a la hora de cuantificar y predecir la elevación del nivel del mar. El aumento del nivel medio del mar puede ser un signo de calentamiento global. La supervisión de este nivel es una aplicación de la altimetría y uno de los temas principales de las ciencias del medio ambiente del Siglo XXI.

Es bastante difícil separar la variabilidad natural del clima de los efectos del calentamiento global. Durante 15 años se han realizado mediciones de los niveles medios del mar a partir de observaciones realizadas desde satélites. Estas observaciones han sido coherentes y han producido una serie temporal precisa de observaciones por satélite. Sin embargo, dicho periodo de tiempo es corto. Además de ello, es necesario señalar que la perturbación producida por los seres humanos afecta también a la variabilidad natural del clima. Por tanto, las señales del cambio climático pueden detectarse únicamente si son mayores que la variabilidad natural de fondo. La detección del cambio climático a nivel mundial es mucho más exigente que la supervisión de las repercusiones a nivel regional.

Parte del incremento observado en el nivel del mar se debe al aumento de la temperatura del agua. El resto proviene de la fusión de los glaciares y de la fluctuación en el nivel de las aguas continentales. La Fig. 4 muestra que el aumento del nivel es de unos 3,3 mm/año, siendo aproximadamente de 5 cm en 15 años.

FIGURA 4
Elevación del nivel medio del mar



Fuente: © CNES, LEGOS, CLS

No obstante, el incremento medio del nivel del mar es sólo una parte de la historia. El aumento del nivel de los océanos no es ni mucho menos uniforme. En algunas regiones oceánicas el nivel del mar ha crecido (hasta 20 mm al año en algunos lugares), mientras que en otras ha disminuido una cantidad equivalente. Estas diferencias regionales, observadas por TOPEX/JASON desde 1993, reflejan principalmente las fluctuaciones del nivel del mar a lo largo de varios años.

Un problema importante es que la elevación de los niveles del mar puede inundar las regiones costeras de todo el mundo y puede llegar a sumergir completamente algunas islas que se encuentran a muy pequeña altura sobre el nivel del mar. Si bien se espera que este efecto no sea significativo sino a una gran escala de tiempo (décadas a siglos), los mapas topográficos levantados a partir de observaciones de satélite (mediante radares de apertura sintética tales como los de la Shuttle Radar Topology Mission y TerraSAR-X, ópticamente a través de ASTER) pueden ayudar a identificar las zonas que son vulnerables.

Las mediciones de la temperatura de la superficie del mar no sólo han revelado información importante sobre la circulación de las corrientes oceánicas (por ejemplo, la corriente del Golfo) sino que también han logrado avances en la investigación del clima y las observaciones de la SST han conducido a nuevos descubrimientos sobre el acoplamiento físico-biológico en el océano, lo que tienen implicaciones importantes en el papel que juegan los océanos en el ciclo del carbono.

Las observaciones realizadas por satélite constituyen el único medio para estimar y supervisar el cometido de la biomasa oceánica como sumidero del carbono. En particular, la cuestión fundamental de si la captación del carbono biológico está cambiando o no como consecuencia del cambio climático sólo puede abordarse realizando mediciones desde satélites. Requiere no solamente mediciones del color del océano (biomasa y productividad del fitoplancton) sino también observaciones coincidentes desde el espacio del entorno físico del océano (circulación y mezcla), intercambios tierra-océano (a través de ríos y marismas) y otros factores tales como vientos, mareas y captación de energía solar la superficie de los océanos. La observación de vínculos entre el entorno físico y químico y la biología del océano es un logro significativo de las observaciones efectuadas desde el espacio.

3.2 Humedad del suelo y salinidad del océano

La evaporación, la infiltración y la recarga de las aguas subterráneas normalmente se produce a través de la zona de aireación no saturada que se extiende desde la parte superior de la superficie terrestre hasta la zona acuífera. La zona donde se encuentran las raíces de la vegetación, donde ésta capta el agua, está en la zona de aireación y constituye la interfaz entre la vegetación y el sistema hidrológico. La cantidad de agua disponible en la vegetación controla la transpiración y la fotosíntesis de las plantas y, por consiguiente, la retención del CO₂. La cantidad de agua en la zona de aireación está también directamente relacionada con la capacidad de drenaje del suelo tras una precipitación de lluvia. Los esquemas de transferencia suelo-vegetación-atmósfera (SVAT) utilizados en meteorología e hidrología están diseñados para describir los procesos de evaporación básicos en la superficie y la repartición del agua entre la transpiración de la vegetación, el drenaje, la escorrentía superficial y el contenido de humedad del suelo. En los modelos SVAT debe indicarse un valor realista inicial de la cantidad de agua en la zona

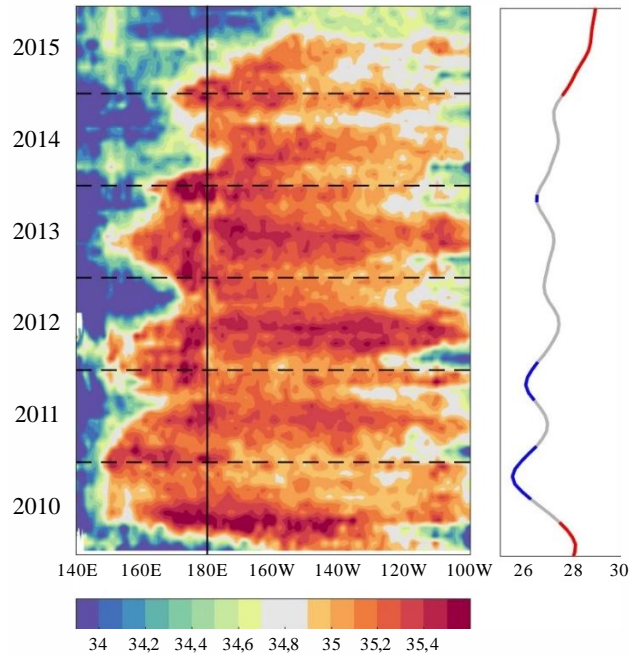
Cuando se trata de suelos desnudos o con vegetación muy dispersa, la tasa de evaporación y escorrentía puede calcularse a partir de las series temporales de valores de la humedad de la superficie del suelo. Si se trata de superficies cubiertas de vegetación, debe tenerse en cuenta la cantidad de agua en la vegetación (profundidad óptica de la vegetación). La propia profundidad óptica de la vegetación puede ser un parámetro muy útil para controlar la dinámica de la vegetación.

El conocimiento de la distribución de la sal (salinidad) en todos los océanos del mundo y su variabilidad anual e interanual son datos fundamentales para comprender el papel de los océanos en el sistema climático. La salinidad es muy importante a la hora de determinar la densidad del océano y, por consiguiente, la circulación termohalina. La salinidad del océano está también ligada al ciclo del carbono oceánico, pues juega un papel importante en el establecimiento del equilibrio químico, que a su vez regula la captación y liberación de CO₂. Por tanto, la integración de las mediciones de la salinidad de la superficie marítima en los modelos bio-geo-químicos oceánicos globales debe mejorar las estimaciones realizadas sobre la absorción de CO₂ por los océanos.

La salinidad de la superficie del océano varía en todo el mundo y es controlada por el equilibrio entre la evaporación, la precipitación y las escorrentías de los ríos, así como por la dinámica de los océanos. Lanzado en 2009, el satélite SMOS ha suministrado el registro continuo más largo de mediciones de salinidad de la superficie del mar desde el espacio. El satélite registró observaciones de la salinidad de la superficie del mar a principios de 2010 cuando un débil El Niño se desvanecía y se convertía en una fuerte La Niña, que duró hasta 2012. A principios de 2010 se observaron salinidades más bajas de lo habitual en el Pacífico ecuatorial a medida que la «piscina» o reservorio de agua fría del Océano Pacífico occidental se extendía hacia el Este. La piscina se replegó hacia el Oeste cuando se inició el episodio de La Niña. Recientemente el satélite SMOS constató un aumento del volumen de agua fría el Océano Pacífico tropical durante el desarrollo de El Niño en 2016 (véase la Fig. 5).

FIGURA 5

Salinidad en el ecuador: salinidad media de la superficie del mar alrededor del ecuador (2°S–2°N) registrada por el SMOS entre 2010 y 2015. La piscina de agua fría (en azul y verde) en el Océano Pacífico ecuatorial occidental se extiende hacia el Este durante los episodios de El Niño (a principios de 2010 y 2015) y se repliega hacia el Oeste durante los episodios de La Niña (a finales de 2010 y 2011). Derecha: el «índice de El Niño 3.4», basado en las observaciones de la temperatura de la superficie del mar, que indica los episodios de El Niño en rojo y de La Niña en azul



RS.1883-05

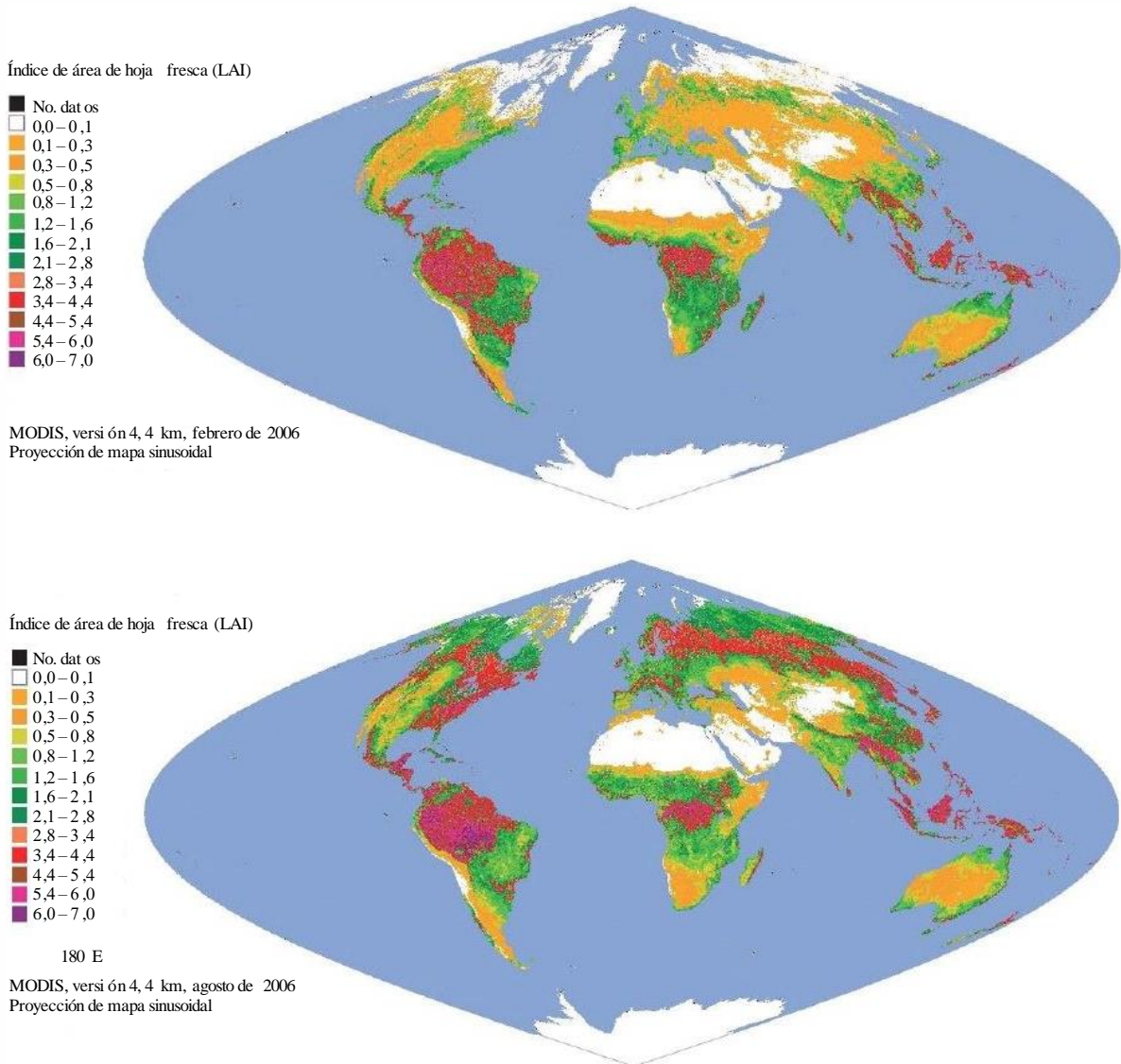
La misión del satélite SMOS es supervisar la humedad del suelo conjuntamente con la misión SMAP y la salinidad de los océanos conjuntamente con la misión Aquarius.

4 La biosfera

La supervisión por satélite de la dinámica de la vegetación de la Tierra es esencial para entender el funcionamiento del ecosistema mundial y responder a la variabilidad climática y al cambio climático. Con el instrumento MODIS en los satélites TERRA y AQUA y VIIRS en los satélites SUOMI NPP, estas observaciones (Fig. 6) han alcanzado más precisión ampliándolas a las mediciones biofísicas.

FIGURA 6

Índices de hoja fresca obtenidos con MODIS mostrando cambios estacionales en la vegetación



RS.1883-06

Fuente: *Earth Observations from Space: the First 50 Years of Scientific Achievements*, p. 75, 2008, downloadable from URL: <http://www.nap.edu/catalog/11991.html>

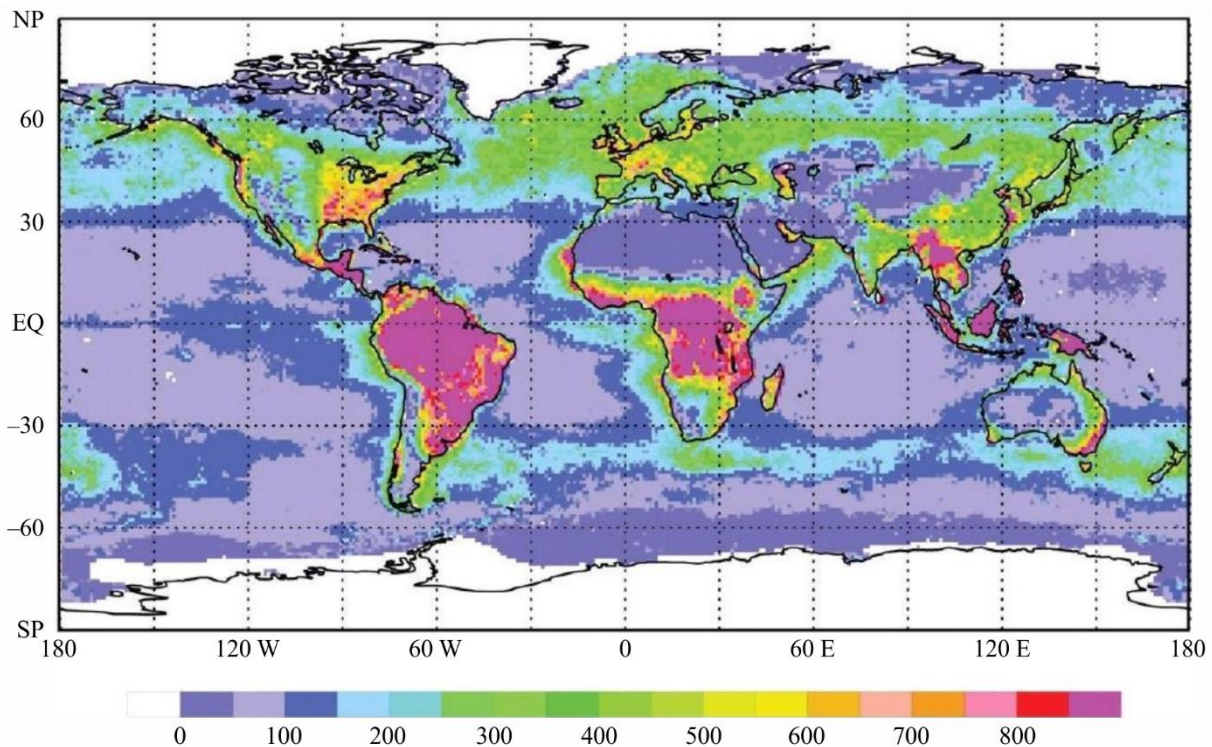
Los estudios sobre el cambio climático también se han aprovechado de la investigación llevada a cabo por satélite de ciclo del carbono y las fluctuaciones de energía en la Tierra.

La productividad primaria neta (PPN) se define como el flujo neto de carbono de la atmósfera a las plantas verdes por unidad de tiempo. Las observaciones por satélite de la PPN han supuesto una enorme contribución a la comprensión fundamental de la repercusión del cambio climático sobre la biosfera. La PPN viene influenciada por controles climáticos y bióticos que interactúan entre sí. La contribución de la tierra y del océano a la PPN es casi igual (Fig. 7), pero se produce una sorprendente variabilidad en la PPN a nivel local. Como los ciclos de vida del fitoplancton son varios órdenes de magnitud más cortos (días en vez de años o décadas) que los de las plantas terrestres, el fitoplancton puede responder a la influencia del clima en la circulación de los océanos, la combinación y el suministro de nutrientes y de luz mucho más rápidamente que las plantas situadas en ecosistemas terrestres. Por consiguiente, cabe esperar que la componente oceánica (aproximadamente la mitad) del ciclo del carbono responda más rápidamente a los cambios climáticos.

FIGURA 7

PPN anual mundial (en gramos de carbono/m²/año) para la biosfera, calculada a partir del modelo integrado CASA-VGPM (modelo de producción generalizado verticalmente). Los datos de partida para el color de los océanos obtenidos del sensor CZCS se promediaron entre 1978 y 1983

El índice de vegetación terrestre obtenido por sensores del AVHRR es el valor medio de 1982 a 1990



RS.1883-07

Lanzado en 1978, el Coastal Zone Colour Scanner (CZCS) (explorador cromático de las zonas costeras) ha demostrado que la productividad del océano puede observarse utilizando bandas visibles y casi infrarrojas; no obstante, las mediciones del CZCS resultaron saturadas sobre tierra y, en consecuencia, fueron inutilizables.

El AVHRR instalado en los satélites meteorológicos en órbita polar de la Administración Nacional de los Océanos y la Atmósfera (NOAA) ha obtenido un registro continuo de observaciones globales diarias desde 1978, en las bandas del rojo y casi infrarrojas. El conjunto de datos diarios obtenidos por el AVHRR abarca actualmente más de 25 años y es el registro global continuo más largo disponible de la productividad terrestre, la fenología (estudio de los ciclos periódicos en la vida de las plantas y los animales y la forma en que resultan influenciados por las variaciones climáticas estacionales e interanuales), y el cambio en el ecosistema para supervisar la respuesta de la biosfera a las modificaciones y la variabilidad climáticas.

Aunque el AVHRR no fue diseñado para supervisar el clima, las continuas mejoras en la calibración y análisis han dado lugar a un registro sólido para supervisar y evaluar las repuestas de la biosfera pasadas y futuras resultantes del cambio climático y la variabilidad de las actividades antropogénicas.

Un tema que suscita preocupación es el efecto del cambio climático sobre la agricultura. A medida que el clima se calienta, el periodo de crecimiento se alarga y las regiones septentrionales pasan a ser más productivas mientras que las regiones meridionales, sometidas a un intenso calor, pierden productividad. La productividad agrícola ha sido controlada desde el espacio durante décadas. El índice de diferencia normalizada de vegetación (NVDI) tiene la propiedad de oscilar entre -1 y $+1$, presentando valores en torno a $+1$ cuando se observa vegetación verde. Técnicamente, el NVDI es el dato del casi infrarrojo menos el dato del rojo (visible) dividido por la suma de ambos.

En la pasada década, los datos del NVDI obtenidos por el AVHRR se convirtieron en un componente crítico para supervisar el cambio climático, evaluando la duración y la temporización del cambio durante el periodo de crecimiento y supervisando el estado de la biosfera y otros fenómenos del ecosistema. Los registros llevados a cabo durante largo tiempo del NVDI han puesto en evidencia que este parámetro creció en respuesta a un calentamiento climático durante los años 80 y principio de los 90, pero esta tendencia se ha equilibrado recientemente. Los cambios en el NVDI planetario (verdor) han estado estrechamente relacionados con la dinámica diaria de la radiación activa terrestre interceptada fotosintéticamente y las concentraciones de CO₂ atmosférico. Existe una fuerte correlación negativa entre el NVDI y el CO₂ atmosférico de tal forma que el NVDI es elevado cuando las concentraciones de CO₂ son bajas y viceversa. Este comportamiento temporal en las fotosíntesis y en la respiración del ecosistema demuestra el acoplamiento dinámico existente entre la biosfera y la atmósfera.

La elevada frecuencia de revisita de los satélites Sentinel-2 contribuye a reforzar los esfuerzos por reducir la deforestación, al ofrecer la posibilidad de obtener datos a partir de imágenes libres de nubes. Esto será especialmente útil en las latitudes tropicales, en las que la fuerte nubosidad puede retrasar la obtención de un conjunto completo de datos. Los datos de alta resolución pueden contribuir a la detección de cambios en los fenómenos de inundación en los países afectados.

5 Cambio climático regional e intervención humana

El cambio climático no se produce de forma homogénea, es decir, la Tierra en su conjunto no se calienta de forma uniforme. El cambio climático suele producirse a nivel de una región, observándose más calor en algunas regiones que en otras y episodios de enfriamiento en algunas de ellas a corto plazo.

El aumento de la población humana ejerce una fuerte presión en el medio ambiente de la Tierra. Muchas de las acciones destinadas a hacer frente a ese aumento de la población afectan al clima, tanto a nivel local como mundial, y pueden ser observadas gracias a la instrumentación de los satélites.

Un ejemplo de esto fue la desviación del río Amu Darya en la década de 1960 realizada para regar campos de algodón y trigo. Décadas más tarde, el Mar de Aral, que fue el cuarto lago más grande del mundo con una superficie de 68 000 km², se secó casi por completo (Fig. 8). La industria pesquera local, que había suministrado una sexta parte del pescado de la Unión Soviética, se derrumbó. Mientras las costas se alejaban varios kilómetros de las ciudades, la población que había decidido permanecer ahí fue asolada por tormentas de polvo tóxico. El retroceso del Mar de Aral ha sido calificado como uno de los peores desastres ambientales del planeta.

FIGURA 8
Zona histórica del Mar de Aral



1977 (Landsat-2)

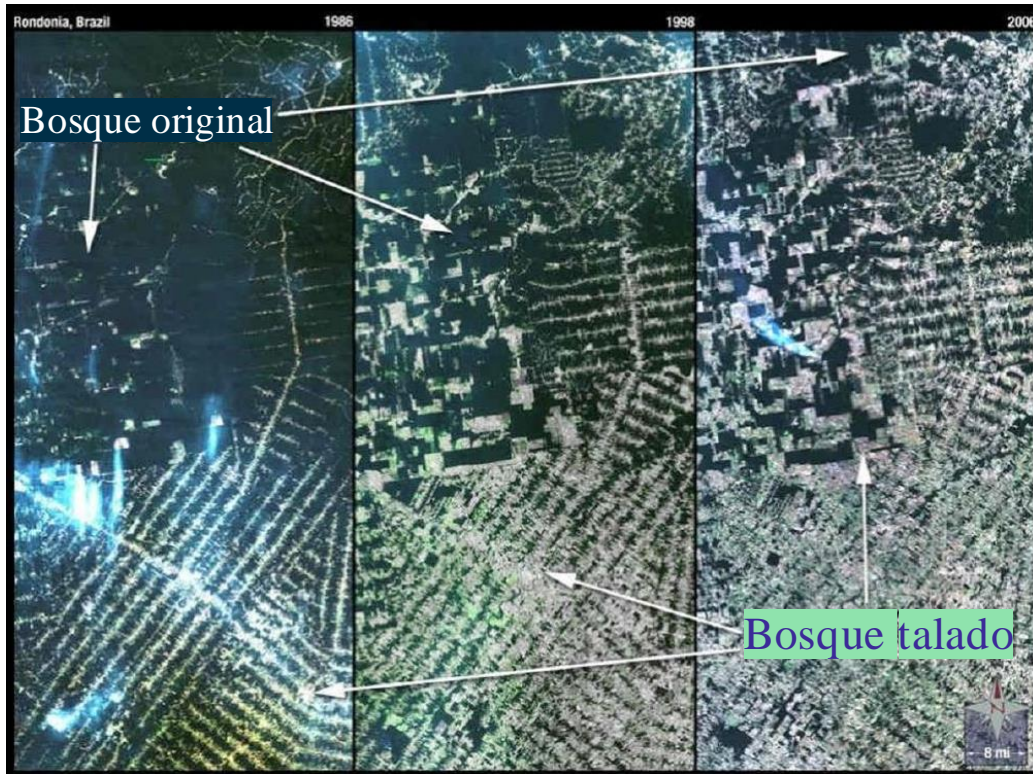


2014 (MODIS en TERRA)

RS.1883-08

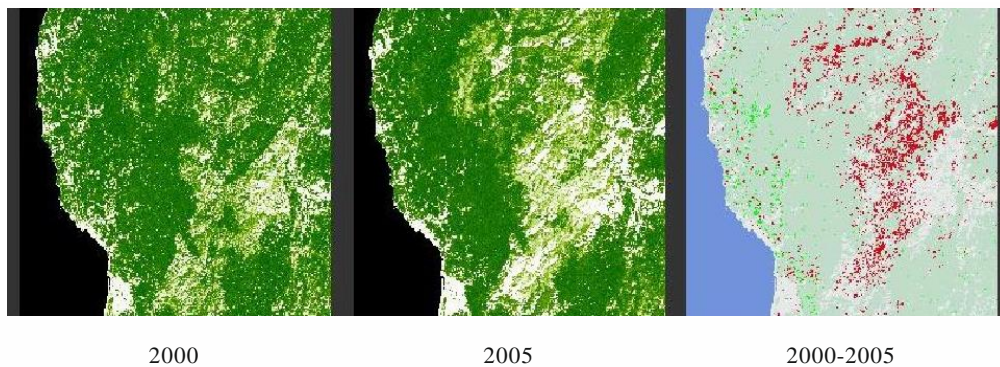
Los árboles forestales actúan como filtros de aire que eliminan el dióxido de carbono del aire y nos proporcionan oxígeno y agua. Los satélites permiten vigilar la salud y extensión de los bosques. Se han cartografiado las zonas en las que se han talado bosques (Fig. 9) y las zonas en las que se han recuperado los bosques (Fig. 10). Para ambas figuras se utilizaron datos del Landsat. Los cambios a largo plazo en la cubierta forestal global tienen repercusiones en el clima que deben ser objeto de una vigilancia constante.

FIGURA 9
Deforestación en la región Amazónica



RS.1883-09

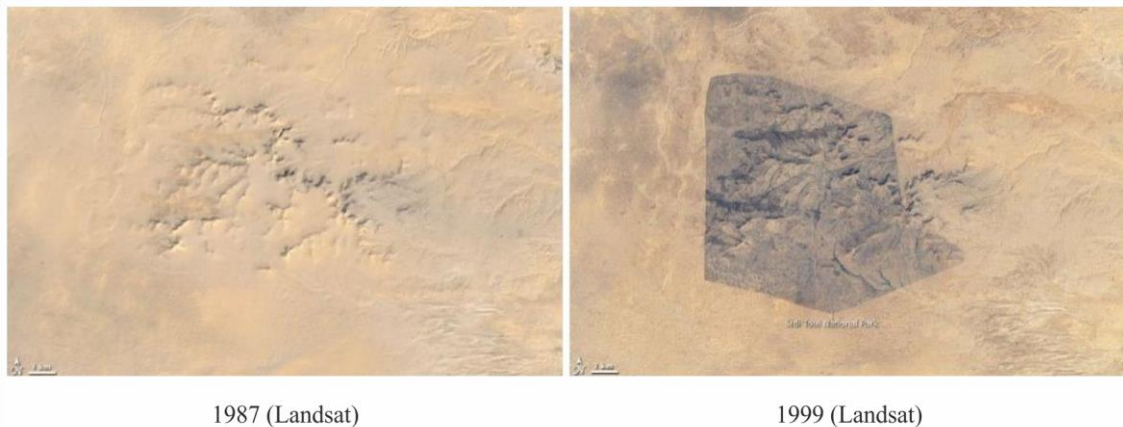
FIGURA 10
Deforestación y recuperación de la cubierta forestal
Observación de la cubierta forestal por Landsat –
Oregón (Noroeste de Estados Unidos)



RS.1883-10

El avance de los desiertos hacia las tierras de cultivo no solo afecta al suministro de alimentos y la tierra disponible para la habitación humana, sino que el cambio en el albedo de la Tierra debido a la falta de cobertura vegetal tiene consecuencias para el clima de la Tierra. El pastoreo de ganado puede afectar seriamente los entornos sometidos a estrés, en particular los desiertos. Las cabras pueden eliminar la ya frágil vegetación desértica, por lo que la simple instalación de cercas para mantener alejados a estos animales puede contribuir a restaurar el medio ambiente (véase la Fig. 11).

FIGURA 11

Restauración del Parque Nacional Sidi Tui (Túnez)

1987 (Landsat)

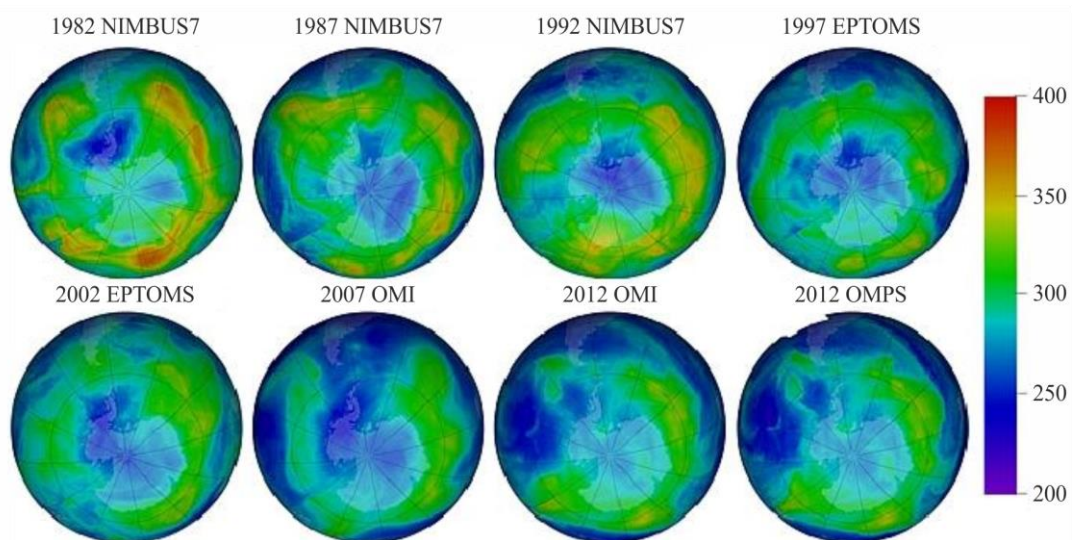
1999 (Landsat)

RS.1883-11

En 1987, la sequía, la agricultura y el pastoreo excesivo habían provocado la desertificación en la zona. En 1993, Túnez estableció el Parque Nacional de Sidi Tui, rodeándolo de vallas. En 1999, la pradera nativa había revivido (imagen de invierno). La transformación de la tierra cultivable en desierto no es necesariamente un proceso irreversible.

Los seres humanos también han introducido en la atmósfera compuestos químicos artificiales. A principios de los años ochenta se descubrió que la capa de ozono de la atmósfera, que nos protege de la radiación ultravioleta del Sol, estaba disminuyendo. En particular, apareció un «agujero» de ozono sobre el Polo Sur que aumentaba de tamaño año tras año. Esta observación se registró primero en los datos de los satélites y luego se confirmó con observaciones en tierra. Se logró establecer que la causa era la destrucción catalítica del ozono por halógenos atómicos. La principal fuente de estos halógenos era la fotodisociación de refrigerantes de halocarburos, disolventes, propelentes y agentes espumantes artificiales.

FIGURA 12

Distribución del ozono en el Polo Sur

RS.1883-12

En la Conferencia de Plenipotenciarios sobre el Protocolo relativo a los Clorofluorocarbonos del Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono (Montreal, 1987) se firmó un protocolo para limitar la producción y el uso de esos productos químicos. Gracias a ello se inició la lenta recuperación de la capa de ozono. Los instrumentos de los satélites, que mantienen una vigilancia constante de esa condición de la atmósfera (Fig. 12), han demostrado los efectos de las medidas adoptadas en Montreal y los protocolos subsiguientes (Londres, 1990 y Copenhague, 1992).

La distribución de la población también influye en el clima, ya que más de la mitad de la población de la Tierra reside actualmente en zonas urbanas. Las observaciones nocturnas de la luz visible que emana de las zonas pobladas nos han ofrecido las primeras indicaciones sobre la distribución de la población humana (véase la Fig. 13).

FIGURA 13

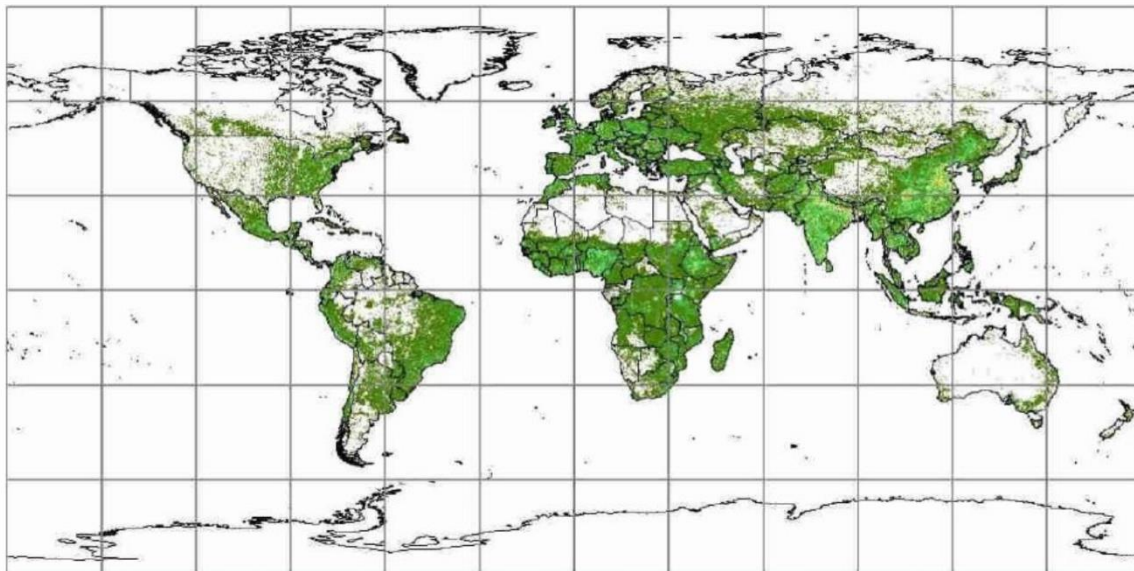
Observaciones nocturnas de las zonas pobladas iluminadas

RS.1883-13

(Datos de DMSP)

Sin embargo, se reconoció que esas observaciones no permitían evaluar adecuadamente la importancia de la población de los países en desarrollo que carecían de iluminación en las calles y de otras iluminaciones nocturnas características de los países desarrollados. Así pues, se elaboró posteriormente un modelo de población que agregó la proximidad de carreteras, el relieve, la cobertura de suelos y otras informaciones a las observaciones de luz nocturna. Los datos sobre el relieve, la cobertura de suelos y luces nocturnas proceden de los satélites. Este último modelo, que se presenta en la Fig. 14 *infra*, representa mejor a las poblaciones de los países en desarrollo.

FIGURA 14

Distribución de la población mundial

RS.1883-14

Las poblaciones urbanas situadas a lo largo de las costas son más vulnerables al aumento del nivel del mar. Esas poblaciones concentran también más recursos, como agua y alimentos, y ejercen una presión adicional sobre el medio ambiente local. Las islas de calor en los grandes centros urbanos afectan al clima local y regional, por lo que también afectarán al clima mundial a largo plazo.

6 Conclusión

Los sensores a bordo de satélites han proporcionado datos fundamentales para poder comprender mejor el comportamiento del planeta y los efectos del cambio climático. Como esa instrumentación continúa ofreciendo datos esenciales, debe protegerse en el futuro.

Anexo 2

Estado de las observaciones de las principales variables climáticas y factores determinantes

En el Cuadro A2-1 se exponen las mediciones necesarias, que se detallan en el Cuadro A2-2, respecto de las tecnologías utilizadas para obtenerlas. Esas mediciones se han extraído del Informe del Consejo de Investigación Nacional de Estados Unidos de América – Ciencias de la Tierra y sus aplicaciones desde el espacio, National Academic Press, Washington DC, 2007 (Cuadro 9.A.1, págs. 298-303). Este documento se puede consultar en <http://www.nap.edu/catalog/11820.html>.

En el Cuadro A2-2 se enumeran, según la tecnología utilizada, los elementos observados y las misiones disponibles para proporcionar esas mediciones, correspondientes en gran medida al año 2016 (cuando se redactó el presente Anexo) y de cara al futuro. El Cuadro A2-2 actualiza la información presentada en el Informe del Consejo Nacional de Investigación de EE.UU. mencionado anteriormente.

CUADRO A2-1

Tecnologías usadas para obtener las mediciones relacionadas con el clima

Objetivo	Tecnología	Imágenes del SAR	Altimetro de radar	Dispersimetría por radar	Radar de precipitación/nubes	Ocultancia radioeléctrica GPS	Imágenes pasivas de microondas	Sondas pasivas de microondas	LIDAR	Imágenes ópticas (UV-IR)	Imágenes multiespectrales ópticas	Sondas/espectrómetros IR	Radiómetros ópticos	Mediciones del limbo	Mediciones gravimétricas
Aerosoles estratosféricos									X					X	
Aerosoles troposféricos									X		X		X		
Perfil de temperatura atmosférica						X		X							
Perfil de agua atmosférica						X		X			X	X			
Agua atmosférica						X		X				X			
Propiedades de las nubes					X		X		X		X		X		
Perturbación por fuego										X					
Gases, otros												X			
Gases, ozono										X					
Gases, traza para control del ozono								X				X			
Glaciares/hielo marino		X					X		X		X				X
Aguas subterráneas							X								X
Niveles de los lagos		X							X		X				
Biomasa terrestre											X				
Cubierta de la Tierra		X									X				
Índice de la superficie de hoja											X				
Color del océano											X				
Nivel del océano (mar)		X	X												
Salinidad de los océanos				X			X								
Altura de la superficie del océano			X	X											X
Temperatura de la superficie del océano								X			X				

CUADRO A2-1 (fin)

Objetivo	Tecnología	Imágenes del SAR	Altimetro de radar	Dispersimetría por radar	Radar de precipitación/nubes	Ocultancia radioeléctrica GPS	Imágenes pasivas de microondas	Sondas pasivas de microondas	LIDAR	Imágenes ópticas (UV-IR)	Imágenes multiespectrales ópticas	Sondas/espectrómetros IR	Radiómetros ópticos	Mediciones del limbo	Mediciones gravimétricas
Estado del viento del océano				X			X								
Permafrost, nieve		X					X								
Precipitación					X		X								
Balance de radiación											X				
Descarga de ríos		X							X		X				
Irradiación solar													X		

CUADRO A2-2

Estado del cambio climático y variabilidad

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Imágenes del SAR	Permafrost, suelo congelado estacionalmente, cubierta de nieve (y equivalente de agua de nieve)	La combinación de radiómetros de microondas produce una combinación de agua, rugosidad y topografía para proporcionar el equivalente de agua de nieve	SAR en RADARSAT (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR en la serie Sentinel-1 (2014,+); HJ-1C (2012); COSI en KOMPSAT-5 (2013); PALSAR-2 en ALOS-2 (2014); RISAT-SAR en RISAT-1 (2012); SAR-C en RISAT-2 (2009); S-M OBRC en METEOR-M2 (2014); SAR-10 en Kondor-E1 (2013); X-SAR en TECSAR (2008)	BRLK en METEOR-MP (2021); S-SAR en NovaSAR-S (2018); SAR-L en SAOCOM-1,2 (2018); SAR-P en BIOMASS (2020); SAR-X en METEOR-MP (2021); SAR en PAZ (2018), CSG (2018, +), Constelación RADARSAT (2018, +), RISAT-1A (2019), TSX-NG (2018)
	Niveles de los lagos	Zona lacustre		
	Descarga de ríos	Lagos, zonas de ríos		
	Cubierta de la Tierra	Cobertura terrestre para retrodispersión del radar		
	Nivel del mar	Superficie de zonas costeras		

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Imágenes del SAR (fin)	Glaciares, hielo marino, casquetes de hielo	Zona y flujo de hielo, espesor del hielo marino obtenido a partir de datos topográficos	SAR en RADARSAT (1995, +), TSX (2007), TDX (2010), COSMO-SkyMeds (2007, +), C-SAR en la serie Sentinel-1 -1B (2014,+); SIRAL en CRYOSAT-2 (2010); SRAL en la serie Sentinel-3 (2016,+)	Constelación de RADARSAT (2019); InSAR en NISAR (2021)
Dispersimetría por radar	Estado del mar, viento de superficie	Vector del viento de superficie	ASCAT en MetOps (2006, +); SCAT en HY-2A (2011); OSCAT en OceanSat-2 (2009); DDMI en CYGNSS (2016); OSCAR en ScaSat-1 (2016)	OSCAT en OceanSat-3 (2018) y SCA en METOP-SG-B (2020); SCAT y SWIM en CFOSAT (2018); SCAT en METEOR-MP, -M (2018); WindRAD en FY-3 (2018)
	Salinidad del mar	Salinidad en la superficie, rugosidad del océano	KU-RFSCAT en HY-2A (2011); MWRI en HY-2A (2011);	
	Hielo marino	Tipo, extensión del hielo marino		SCA en METOP-SG-A (2022)
Radar de precipitación	Precipitación	Radar de precipitación: perfil vertical del índice de precipitación	DPR en GPM (2014)	
		Radar de nubes: índice de llovizna ligera	CloudSat (2006)	
Radar de nubes	Propiedades de las nubes (ubicación, tamaño de las gotas, propiedades del cristal de la nube de hielo)	Radar de nubes: límites de las nubes, distribución vertical del agua líquida, índice de llovizna	CloudSat (2006)	

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Altímetro de radar	Nivel del mar	Altura de nivel del océano	SSALT en la serie JASON (2001, +); Altika-AMU en SARAL (2013); RA en HY-2A/ (2011); SRAL en la serie Sentinel-3 (2016, +); JASON-3 (2016)	KaRIN en SWOT (2020); SRAL en JASON-CS/ SENTINEL-6 (2018, +); SHIOSAI en COMPIRA (2019)
	Corrientes oceánicas superficiales y subsuperficiales	Altura de la superficie del océano a partir de la cual se producen las corrientes	POSEIDON en la serie JASON (2001, +); RA en HY-2A (2011); SRAL en la serie Sentinel-3 (2016, +)	SRAL en JASON-CS/SENTINEL-6(2018, +); KaRIN en SWOT (2020)
Ocultancia radioeléctrica GPS	Temperatura: perfiles verticales	Perfiles de temperatura atmosférica con una resolución vertical de hasta unos 0,5 km cerca de la superficie	CHAMP (2000), COSMIC/ FORMOSAT-2 (2006); KOMPSAT-5 (2013); FY-3 -C (2013); MetOp (2006, 2012); TDX (2010); TSX (2007); Megha-Tropiques (2011); OceanSat-2 (2009); DDMI en CYGNSS (2016)	COSMIC-2/FORMOSAT-7 (2018); FY-3D.-3F(2016-2020); JASON-CS/SENTINEL-6 (2021); GRACE-FO (2018); METEOR-M-N3, METEOR-MP-N1,-N3 (2018); METOP-SG-A,-B (2022)
	Vapor de agua: cantidad en la columna, perfiles verticales	Perfiles del vapor de agua con una resolución vertical de hasta unos 0,5 km cerca de la superficie		
LIDAR	Aerosoles troposféricos: ubicación y propiedades	Perfil vertical de concentración de aerosoles, forma y tamaño	CALIPSO (2006)	ATLID en EarthCare (2019)
	Aerosoles estratosféricos: ubicación y propiedades	Perfil vertical de concentración de aerosoles, forma y tamaño		
	Propiedades de las nubes (ubicación, tamaño de las gotas, propiedades del cristal de la nube de hielo)	Límite superior para nubes ópticamente delgadas con polarización, fase de partículas		
	Glaciares, hielo marino, casquetes de hielo	Elevación del hielo	GLAS en ICESat (2003)	
	Niveles de los lagos	Elevación de las aguas superficiales		
Descarga de ríos	Altímetro Lidar: niveles de los ríos	ICESat (2002)		

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Imágenes pasivas de microondas	Precipitaciones y propiedades de las nubes	Índice de precipitación y agua líquida en las nubes	GMI en GPM (2014); SSM/I en la serie DMSP (1987, +), SSMIS en la serie DMSP (2003, +); MWRI en la serie FY-3 (2008, +); MWR en la serie Sentinel-3 (2016,+)	SSM/IS en DMSP (2020); MWI en METOP-SG-A (2022); MWR en Sentinel-3B (fin 2017)
	Glaciares, hielo marino, casquetes de hielo	Glaciar, extensión del hielo marino	SSM/I en la serie DMSP (1987, +), SSMIS en la serie DMSP (2003, +); AMSR-2 en GCOM-W1 (2012); MWRI en HY-2A (2011)	
	Masa de nieve	Equivalente de agua de nieve	SSM/I en DMSP (1995, +); AMSR-2 en GCOM-W1 (2012)	
	Aguas subterráneas	Humedad del suelo salvo en las zonas cubiertas por hielo-nieve y zonas de fuerte densidad de vegetación	MIRAS en SMOS (2009); Radiómetro en SMAP (2015); SSM/I en la serie DMSP (1987, +), SSMIS en la serie DMSP (2003, +); MWRI en la serie FY-3 (2008, +); VIIRS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
	Salinidad del mar	Salinidad de la superficie	Radiómetro SMAP en SMAP (2015), MIRAS en SMOS (2009);	
	Estado del mar, viento de superficie	Velocidad del viento de superficie	SSM/I en la serie DMSP (1987, +), SSMIS en la serie DMSP (2003, +); Windsat en Coriolus (2003), AMSR-2 en GCOM-W1 (2012); MTVZA-GY en la serie Meteor-M (2009, +) MWRI en HY-2A (2011)	

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Sondas pasivas de microondas	Temperatura: perfiles verticales	Perfil de la temperatura atmosférica	MSU desde 1979 actualmente en la serie NOAA (2002, +); SSM/I en DMSP (1995, +); AMSU en Aqua (2002), MetOp (2006, +); DFMRM en FAST-T; MTVZA-GY en la serie Meteor-M (2009, +); MWTS en la serie FY-3 (2003, +) CrIS, ATMS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	MWS, MWI en METOP-SG-A (2022); MTVZA-GY-MP en METEOR-MP (2021)
	Propiedades del agua atmosférica	Perfiles y cantidad total del vapor de agua atmosférica	SSM/I en la serie DMSP (1995, +); ATMS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018); Altika-RMU en SARAL (2013); AMSU en AQUA (2002), en la serie NOAA (1998, +); AMSU-A en la serie MetOp (2006 +); SSM/T en la serie DMSP (1999, +); SAPHIR en Megha-Tropiques (2011); MTVZA-GY en METEOR-M-1 (2009), -M2 (2014); MWRI en la serie FY-3 (2008 +) y HY-2A (2011); MWR en la serie Sentinel-3 (2016, +); AMR-2 en JASON-3 (2016)	AMR en SWOT (2020); AMR-C en JASON-CS/SENTINEL-6 (2018); MTVZA-GP-MP en METEOR-MP (2021); MWI y MWS en METOP-SG-A (2022)
	Vapor de agua: cantidad en la columna, perfiles verticales	Radiómetros de infrarrojo de exploración del limbo por microondas: volumen de la capa de vapor de agua en la tropósfera superior y en la estratósfera	TES, MLS en Aura (2004); MWR en la serie Sentinel-3 (2016,+)	
	Traza de gases para control del ozono (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Sondas de limbo en microondas: proporcionan el perfil vertical del ozono estratosférico	MLS en Aura (2004)	

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Sondas pasivas de microondas (<i>fin</i>)	Superficie del océano, temperatura subsuperficial	Sondas de infrarrojo por microondas: temperatura de la superficie del mar	AVHRR en la serie NOAA (2000, +); AIRS, MODIS en Aqua (2002); MODIS en Terra (1999); VIIRS, CrIS, ATMS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018); GMI en GPM (2014); AMSR-2 en GCOM-W1 (2012); MWRI en HY-2A (2011); MIRAS en SMOS (2009); WindSat en Coriolus (2003)	
Imágenes multispectrales ópticas	Radiación térmica global de la Tierra	En combinación con radiómetros de banda ancha: permiten la identificación de escena, parte superior de los flujos atmosféricos	MODIS, CERES en Terra (1999), Aqua (2002); VIIRS, CERES en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
	Balance de radiación de la superficie			
	Aerosoles troposféricos: ubicación y propiedades	Proporciona profundidad óptica, alguna inferencia de tamaño sobre océanos y superficies oscuras	AVHRR desde 1981, actualmente en la serie NOAA (2002, +); MODIS, MISR en Terra (1999); MODIS en Aqua (2002); VIIRS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	TROPOMI en Sentinel-5P (2017); UVNS (Sentinel-5) en Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) en MTG (2020)
	Propiedades de las nubes (ubicación, tamaño de las gotas, propiedades del cristal de la nube de hielo)	Propiedad de una sola capa de nubes efectiva. AVHRR – tamaño del hidrometeoro VIRS, MODIS y VIIRS – inferencia de la fase de los hidrometeoros		
Vapor de agua: cantidad en la columna, perfiles verticales	Cantidad en la columna de los canales de vapor de agua cerca del infrarrojo	MODIS en Terra (2000), Aqua (2002)		

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Imágenes multiespectrales ópticas (cont.)	Cubierta de la superficie de la Tierra y albedo en la superficie (cubierta de nieve, glaciares, casquetes de hielo, etc.)	Índice de vegetación, inferencia del albedo en la superficie	AVHRR en la serie NOAA (2002, +): inferencias de albedos espectrales corregidos atmosféricamente; MODIS en Terra (2000), Aqua (2002); Landsat desde 1973, -7,-8 (1999, 2013); VIIRS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018); MSI en Sentinel-2A/B (2015/2017)	
	Cubierta de la superficie de la Tierra y albedo en la superficie (excluida la capa de nieve, glaciares, casquetes de hielo)	Imaginería hiperespectral: tipos de vegetación, cubierta de la Tierra	Hyperion en EO-1 (2000)	
	Lago, niveles de los ríos	Imágenes de alta resolución: lagos, zonas de ríos	Landsat desde 1973, -7, -8 (1999, 2013)	
	Biomasa terrestre, fracción de radiación activa fotosintéticamente; Índice de la superficie de hoja	Índice de vegetación	AVHRR datos desde 1979, en la serie NOAA (2002, +); MODIS en Terra (2000), Aqua (2002); MISR en TERRA (1999); SeaWiFS (1997); VIIRS en SNPP (2012) y NOAA-20 (2018); MSI en Sentinel-2A/B (2015/2017)	FLORIS en Flex (2023)
	Índice de la superficie de hoja	Índice de vegetación a mayor resolución espacial	Landsat desde 1973, -7, -8 (1999, 2013); ASTER en Terra (2000); Hyperion en EO-1; en la serie SPOT (1994, +)	FLORIS en Flex (2023)
	Glaciares, hielo marino, casquetes de hielo	Zona de cobertura	AVHRR desde 1979, en la serie NOAA (2002, +); MODIS en Terra (2000), Aqua (2002); Landsat desde 1973, -7,- 8 (1999, 2013); VIIRS en SNPP(2011) y NOAA-20 (2018)	

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Imágenes multiespectrales ópticas (fin)	Superficie del océano, temperatura subsuperficial	Temperatura de la superficie del mar	AVHRR, datos desde 1981, en la serie NOAA (2000, +); MODIS en Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS en SNPP(2011) y NOAA-20 (2018)	
Imágenes ópticas (UV-IR)	Ozono en la estratosfera, troposfera	Radiómetro-imaginería UV: ozono en la columna estratosférica, perfiles aproximados de resolución vertical del ozono estratosférico	OMI en Aura (2004); OMPS en SNPP (2011) y NOAA-20(2018)	UVNS (Sentinel-5)/ en Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) en MTG (2020)
	Perturbación por fuego	Imaginería térmica cerca del infrarrojo: permite la detección con elevada resolución espacial de focos de incendios	AVHRR datos desde 1981, en la serie NOAA (2002, +); MODIS en Terra (2000), Aqua (2002); VIIRS en SNPP (2012) y NOAA-20 (2018)	UVNS (Sentinel-5) en Metop-SG-A (2020); UVNS (Sentinel-4) en MTG (2020)
Radiómetros y polarímetros ópticos (UV – IR)	Irradiación solar	Medición directa	SORCE (2003); TIM en Glory (2008)	
	Aerosoles troposféricos: ubicación y propiedades	Radiómetro-imaginería UV: profundidad óptica, alguna inferencia de absorción en capas de aerosoles elevadas	OMI en Aura (2004); OMPS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
		Polarímetros: profundidad óptica, tamaño, forma, albedo de dispersión sencilla		

CUADRO A2-2 (continuación)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Radiómetros y polarímetros ópticos (UV – IR) (fin)	Propiedades de las nubes (ubicación, tamaño de las gotas, propiedades del cristal de la nube de hielo)	Sondas de 15 μm , imaginería: presión de la capa de nubes para un sistema de nubes de una sola capa efectiva, incluso cirros ópticamente delgados	HIRS en la serie NOAA (2002, +); MODIS en Terra (1999), Aqua (2002); AIRS en Aqua (2002); CrIS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
		Radiómetros de múltiples vistas, polarímetros	MISR en Terra (1999); altitud de la nube a partir de imágenes estéreo	
Sondas IR	Traza de gases para control del ozono (HCl, N ₂ O, CH ₄ , H ₂ O, HNO ₃)	Proporciona perfiles verticales del ozono troposférico y estratosférico	AIRS en Aqua (2002)	
	CO ₂ , CH ₄	Sondas de infrarrojo	AIRS en Aqua (2002); CO ₂ solo con OCO-2 (2014)	
	CH ₄	Espectrómetro de infrarrojo: concentraciones en la columna de alta precisión del CH ₄	TES en Aura (2004); AIRS en AQUA (2002)	
	Vapor de agua: cantidad en la columna, perfiles verticales	Volumen de la capa de vapor de agua con una resolución vertical relativamente aproximada en la troposfera	HIRS datos desde 1979, en la serie NOAA (2002, +); CrIS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
		Radiómetros de infrarrojo con alta resolución espectral: proporcionan el volumen de la capa de vapor de agua con una resolución vertical más precisa en la troposfera	AIRS en Aqua (2002); TES en Aura (2004); CrIS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	

CUADRO A2-2 (*fin*)

Tecnología	Objetivo	Medición	Estado (alrededor de 2018)	Seguimiento (2018-2025)
Mediciones del limbo	Aerosoles estratosféricos: ubicación y propiedades	Mediciones del limbo y ocultación solar: perfil de extinción del aerosol	Radiómetro de infrarrojo; SAGE II en ERBS (1984-2006); SAGE III en Meteor (2002-2006) SciSat (Canadá-Estados Unidos)	
		Luz dispersa en el limbo: perfil de la profundidad óptica del aerosol	OMPS en SNPP (2011) y NOAA-20 (2018)	
Mediciones gravimétricas	Glaciares, hielo marino, casquetes de hielo	Masa de hielo combinada con mediciones topográficas		GRACE-FO (2018)
	Aguas subterráneas	Aguas subterráneas a gran escala (exige observaciones auxiliares <i>in situ</i>)		
	Corrientes oceánicas superficiales y subsuperficiales	Desplazamientos de masa bajo la superficie o barotrópicas (calculados junto con las mediciones del altímetro de superficie)		