

MARÍA JOSÉ LÓPEZ GARCÍA\*  
BERNARD J. DENORE\*\*

## LOS SATÉLITES DE OBSERVACIÓN DE LA TIERRA EN EL 2000

### RESUMEN

Este artículo presenta las tendencias actuales en los satélites de observación de la tierra, a partir del análisis de las series operativas, los satélites de reciente lanzamiento y programas en preparación. Se detallan cinco tipos de misiones: la nueva generación de sistemas meteorológicos, las misiones científicas de las grandes agencias espaciales, los sistemas ya operativos para la cartografía de recursos (Landsat, SPOT, IRS...), los nuevos sistemas comerciales de muy alta resolución y, finalmente, las interesantes oportunidades presentadas por los denominados micro- y minisatélites.

### ABSTRACT

This paper presents the current trends in satellite remote sensing of the Earth based on an analysis of operational missions, recently launched satellites and the programmes under preparation. Five types of missions are detailed: the new generation of meteorological systems, the scientific missions of the big space agencies, the currently operational Land Resources Satellites (Landsat, SPOT, IRS), new commercial very high resolution systems and, finally, the interesting opportunities presented by the so-called mini- and micro-satellites.

### INTRODUCCIÓN

En la segunda mitad del siglo XX la teledetección espacial surge y se desarrolla, con el apoyo económico de los gobiernos, como una técnica encaminada a proporcionar datos para el conocimiento de la atmósfera y de la superficie terrestre y marina. Muy pronto se convirtieron en operativos dos tipos de satélites: los meteorológicos para la observación de la atmósfera y los satélites denominados de recursos naturales con una alta resolución espacial, diseñados para la cartografía y la explotación de los recursos terrestres. Junto a estos programas, se fueron desarrollando, especialmente en la década de los 90, otros des-

---

\* Departament de Geografia. Universitat de València

\*\* Consultor Independiente de Teledetección. Valencia, bernard.denore@ctv.es

tinados al estudio global de la atmósfera, los océanos y la criosfera desde una perspectiva más científica que aplicada.

Los satélites meteorológicos geoestacionarios, pioneros en la observación espacial, se consideran ampliamente consolidados y sus datos son, en la actualidad, imprescindibles en los modelos meteorológicos. La experiencia de más de tres décadas de observación ha servido para demostrar la utilidad de la técnica y el éxito de las misiones ha llevado a las grandes agencias espaciales a preparar lo que se ha llamado "segunda generación" de satélites meteorológicos: en Europa la segunda generación de Meteosat, MSG, (Meteosat Second Generation), y en América el programa GOES-NEXT, caracterizada por mejoras sensibles en cuanto a resolución y frecuencia. La cooperación internacional ha marcado, desde sus inicios, el buen funcionamiento de estos programas, a los que se suman los satélites polares de la serie NOAA y la serie europea Metop prevista en los próximos años.

En el ámbito de los satélites de recursos terrestres, el programa Landsat ha sido, sin duda, el más fructífero, con más de 25 años de observación ininterrumpida de la superficie terrestre. Junto al Landsat, otros programas se consideran plenamente operativos en la actualidad: SPOT, IRS, y RADARSAT. Tras una primera etapa caracterizada por la investigación metodológica y el ensayo de nuevas aplicaciones, los datos proporcionados por los satélites de recursos se utilizan cada vez más, para la detección, cartografía, modelización y seguimiento de un gran número de fenómenos relacionados con el territorio. La facilidad para la integración de la información proporcionada por los satélites con todo tipo de datos georeferenciados en los Sistemas de Información Geográfica, así como la disponibilidad de series de imágenes retrospectivas ha incrementado enormemente las posibilidades de su aplicación. En los próximos años se asistirá al lanzamiento, en cada uno de estos programas, de nuevos satélites con sensores avanzados que muestran una clara tendencia hacia la mejor resolución espacial y espectral.

Junto a estos programas espaciales desarrollados por las grandes agencias internacionales, nacionales y regionales como la NASA (National Aeronautics and Space Administration), NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), ESA (European Space Agency), NASDA (National Space Development Agency of Japan), el CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) y el CSA (Canadian Space Agency), aparecen en los últimos años nuevos operadores: grandes compañías aeroespaciales, naciones emergentes en el ámbito espacial y empresas de nueva creación, y se abre el camino a la comercialización de satélites de muy alta resolución espacial. La apertura de una tecnología hasta ahora reservada al uso militar para la aplicación civil hace posible esta realidad. Si se cumplen los planes previstos, dentro de dos o tres años habrá una decena de satélites en órbita que proporcionarán datos con una resolución espacial de 10 metros o menos. La mejor resolución prevista es de 0,8 m y, como muchos de los sistemas tendrán capacidad estereoscópica, será posible proporcionar Modelos Digitales de Elevación de alta resolución (ESA, 1997). El lanzamiento el 24 de septiembre de 1999 del satélite IKONOS-2 con un sensor pancromático de 1 m de resolución y visible-infrarrojo próximo de 4 m, es el primer ejemplo de las actuales tendencias. Además, en el panorama actual hay que considerar las misiones de los denominados micro y minisatélites que surgen como alternativa o complemento a los grandes programas. Las constelaciones de microsátélites permitirán responder a las necesidades del usuario abaratando costes de diseño y lanzamiento y permitiendo así la entrada en el espacio a países que de otra forma no podrían

liderar grandes programas. Las misiones UoSat-12, SunSat y KitSat lanzados en 1999 por iniciativa de pequeñas empresas vinculadas a centros universitarios están mostrando la viabilidad de este tipo de experiencias.

Finalmente, en el terreno de la observación espacial, la creciente preocupación por parte de la comunidad científica y de los gobiernos por el análisis de las causas y consecuencias del "cambio global": disminución de la capa de ozono, cambio climático, desertificación, ascenso del nivel del mar, urbanización acelerada, cambios inducidos por el hombre, pérdida de la biodiversidad..., ha supuesto un nuevo impulso para una serie de programas espaciales con objetivos científicos, liderados por las agencias espaciales de los países desarrollados. Se trata de lo que hemos denominado misiones científicas de observación del Sistema Tierra. En los años noventa se crean programas como el Living Planet Programme de la ESA y el Earth Observing System (EOS) de la NASA (ESA, 1998; NASA, 2000a, b y c). La necesidad de disponer de series temporales largas con cobertura global para comprender el comportamiento global del planeta está siendo abordada con urgencia a través del IGOS (Integrated Global Observing Strategy), impulsado por el CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) un foro internacional dentro del cual se coordinan los esfuerzos de un gran número de agencias espaciales internacionales, nacionales y regionales (ESA, 1997; IGOS, 1999).

En general, la historia de la teledetección espacial muestra un incremento constante y exponencial en el volumen de datos adquiridos, en términos de cobertura espacial, temporal y espectral, es decir, cada vez se cubren mayores áreas del planeta con sensores de mayor resolución espacial, de forma más frecuente y utilizando zonas del espectro electromagnético más amplias. Tras casi medio siglo de desarrollo y experimentación de programas espaciales, los logros conseguidos conducen a la teledetección espacial hacia una nueva etapa donde se vislumbran cambios cualitativos importantes. Este artículo analiza las tendencias actuales y futuras de los programas operativos de observación de la tierra, destacando las nuevas misiones con sus mejoras y sus principales aplicaciones. Sin entrar en la descripción exhaustiva de todos los satélites actuales, se presenta una puesta al día de los sensores en órbita -centrándonos en aquellos de mayor interés para los especialistas en ciencias de la tierra- y se pretende suscitar una reflexión acerca de las consecuencias que las tendencias actuales en el mundo de la observación de la Tierra pueden suponer para la comunidad científica y el usuario, a corto y medio plazo.

#### SATÉLITES METEOROLÓGICOS

Desde la década de los años 60 hasta la actualidad se ha desarrollado una red mundial de satélites meteorológicos que proporcionan una cobertura global y continua del planeta. Esta red consta de satélites meteorológicos geoestacionarios y satélites meteorológicos de órbita polar, y se coordina -con el fin de asegurar la máxima eficacia y provecho en la adquisición y explotación de los datos- desde la Organización Meteorológica Mundial a través del programa GARP (Global Atmospheric Research Programme) y el CGMS (Co-ordination Group for Meteorological Satellites). Esta organización fue creada en 1972 a iniciativa de la OMM, la Agencia Espacial Europea, Japón y los Estados Unidos de América, posteriormente la URSS se unió al grupo en 1973, India en 1979 y la república de China en 1989 (WMO, 1999).

La red mundial de satélites geoestacionarios cubre una franja que va de 70° latitud N a 70° latitud S, con una alta frecuencia temporal, de día y de noche. La visión completa

del globo terrestre se obtiene con cinco satélites ubicados en una órbita ecuatorial a intervalos aproximados de 70° de longitud. Los cinco satélites operativos en la actualidad son: dos satélites GOES de EE UU, el satélite europeo Meteosat, el japonés GMS (Geostationary Meteorological Satellite), y el satélite de la federación rusa GOMS (Geostationary Operational Meteorological Satellite of Russia). Además la India mantiene un satélite (Insat) con capacidad para usos meteorológicos si bien se destina principalmente al uso nacional y la república china ha lanzado un satélite FY-2 (Feng-Yung) que está en fase experimental.

Europa queda bajo el campo de visión del Meteosat. Lanzado por primera vez en 1977, hasta la fecha se han puesto en órbita siete satélites, el último en septiembre de 1997, y se espera que la serie continúe proporcionando datos hasta, al menos, el 2003 cuando sea plenamente operativa una segunda generación de satélites Meteosat. La serie Meteosat está financiada y coordinada a través de la organización intergubernamental EUMETSAT (European Organisation for Meteorological Satellites), creada en 1986, y de la que forman parte 17 países europeos. Desde julio de 1999 Eslovaquia y Hungría cooperan también en la organización. EUMETSAT es responsable del lanzamiento y operatividad de los satélites y de la distribución de datos al usuario. Su sede se sitúa en Darmstadt (Alemania) donde se registran las imágenes y, tras algunas correcciones, se redistribuyen a una amplia red de estaciones receptoras, ya sea en alta resolución digital o en modo analógico (CGMS, 1999).

En la actualidad, los Meteosat cuentan con un sensor de barrido MVIRI (Meteosat Visible and InfraRed Imagery) que ofrece información en tres bandas: visible (0,45-1,0  $\mu\text{m}$ ) que informa sobre el brillo de la nube, infrarrojo medio (5,7-7,1  $\mu\text{m}$ ) utilizada para determinar el contenido de vapor de agua en la atmósfera, y el infrarrojo térmico (10,5-12,5  $\mu\text{m}$ ) para discriminar tipos de nubes y determinar la temperatura de la superficie del océano. La resolución espacial del sensor es de 2.500 m en el visible y 5.000 m en los otros y proporcionan imágenes cada 30 minutos.

Desde 1988 EUMETSAT ha trabajado en la mejora de los satélites, para hacer realidad el programa MSG (Meteosat Second Generation), Meteosat segunda generación, cuyo objetivo es producir tres nuevos satélites de avanzado diseño a partir del año 2000. El proyecto está financiado y cubierto hasta el año 2012, la Agencia Espacial Europea es responsable del desarrollo del satélite prototipo cuyo lanzamiento está previsto para octubre del 2000 y EUMETSAT se encarga de la construcción de los MSG-2 y -3, así como del lanzamiento y operación de toda la serie.

Esta nueva generación de satélites mantendrá las imágenes convencionales aunque mejoradas, pero abre una nueva misión (AirMass Analysis Mission) destinada a obtener datos sobre la estructura de la masa atmosférica mediante canales centrados en las bandas de absorción del vapor de agua, dióxido de carbono y ozono. Además, estarán provistos del radiómetro SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infra Red Imager) que proporcionará imágenes cada 15 minutos en 12 bandas espectrales centradas en diferentes ventanas y bandas de absorción del espectro solar y terrestre (Tabla 1). Esta mejora en la resolución temporal y espectral irá acompañada de un aumento en resolución espacial, las imágenes en el infrarrojo mejoran de 5 a 3 km y una de las nuevas bandas visibles HRV (High Resolution Visible) proporcionará imágenes de 1 km de resolución, todo lo cual se espera ayude a la predicción con el rápido reconocimiento y detección de situaciones meteorológicas de riesgo (CGMS, 1999).

Tabla 1. Bandas espectrales previstas en el radiómetro SEVIRI de la Segunda Generación de Meteosat (MSG)

| Banda   | Intervalo espectral ( $\mu\text{m}$ ) | Resolución espacial (km) | Principales aplicaciones   |
|---------|---------------------------------------|--------------------------|--|
| VIS 0,6 | 0,56-0,71                             | 3                        | Discriminación de nubes sobre tierra, vientos  |
| VIS 0,8 | 0,74-0,88                             | 3                        | Discriminación de nubes sobre agua, vegetación   |
| HRV     | 0,5-0,9                               | 1                        | Vientos, textura de las nubes, seguimiento de fenómenos locales, fenómenos convectivos                 |
| NIR 1,6 | 1,50-1,78                             | 3                        | Discriminación entre nubes de hielo y de agua  |
| MIR 3,9 | 3,48-4,36                             | 3                        | Detección de nieblas y nubes bajas, SST y temperatura superficie terrestre                             |
| IR 8,7  | 8,30-9,10                             | 3                        | Discriminación entre nubes de hielo y de agua  |
| IR 10,8 | 9,80-11,80                            | 3                        | SST y temperatura superficie terrestre, permite la corrección atmosférica por el método "split-window" |
| IR 12,0 | 11,00-13,00                           | 3                        | Estimación de la altura de las nubes e información sobre el perfil vertical de la atmósfera            |
| WV 6,2  | 5,35-7,15                             | 3                        | Contenido en ozono   |
| WV 7,3  | 6,85-7,85                             | 3                        | Estimación de la altura de las nubes e información sobre el perfil vertical de la atmósfera            |
| IR 9,7  | 9,38-9,94                             | 3                        |  |
| IR 13,4 | 12,4-14,40                            | 3                        |  |

Fuente: CGMS, 1999

Junto a los satélites geoestacionarios, se dispone de un sistema de satélites polares que proporcionan una cobertura global diaria del planeta, entre los que destacamos la serie operativa TIROS-NOAA de la NASA en funcionamiento desde 1960. Tras una primera etapa experimental, en 1978 se inicia su etapa operativa con el lanzamiento del TIROS-N al que siguieron los NOAA-6, -7, -8, -9...hasta el NOAA-15 en la actualidad. Funcionan por parejas, es decir, dos satélites que operan en órbitas complementarias, uno de ellos cruza el ecuador aproximadamente a las 7.30 y 19.30 h (número par) y el otro a las 2.30 y 14.30 (número impar). Así, la posibilidad de dos pasadas diurnas y dos nocturnas en cualquier punto del ecuador está asegurada y el doble (8 órbitas) en latitudes medias. Los principales sensores a bordo de los NOAA son el TOVS (TIROS Operational Vertical Sounder) y el AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). El TOVS consta de 3 sensores que realizan un sondeo vertical de la atmósfera: HIRS (High Infrared Resolution Radiation Sounder) con 19 canales en el infrarrojo y 1 en el visible; el MSU (Microwave Sounding Unit) radiómetro de microondas con 4 canales próximos a 55 GHz y el SSU (Stratospheric Sounding Unit) un radiómetro infrarrojo de presión modulada con 3 canales en 15 micras. El sensor AVHRR tiene 4 ó 5 canales (véase Tabla 2 ) uno en el visible, otro en el infrarrojo próximo, otro en el infrarrojo medio y 1 ó 2 en el térmico, con una resolución en el terreno de cada pixel es de 1,1 km<sup>2</sup> al nadir y una resolución radiométrica en los canales térmicos es de 0,12 K a 300 K

En la actualidad se trabaja en una nueva serie de satélites iniciada con el lanzamiento en mayo de 1998 del NOAA-K (NOAA-15), al que seguirán el NOAA-L cuyo lanzamiento está previsto en abril del 2000 y el NOAA-M en mayo del 2001. Las mejoras de esta nueva serie incluyen el sensor AVHRR/3 que incorpora un sexto canal en el infrarrojo próximo (1,6  $\mu\text{m}$ ) denominado 3A el cual operará durante la órbita diurna compar-

tiendo el trabajo con la banda 3 original (denominada 3B) que operará durante la órbita nocturna. De esta forma se mantiene el sistema de transmisión de la serie preparado para trabajar con 5 canales. Además, el sensor MSU y SSU han sido reemplazados por el AMSU (Advanced Microwave Sounding Units) que se espera proporcione mejor información sobre el perfil de humedad y temperatura (WMO, 1999; NOAA, 1999).

Tabla 2. Bandas espectrales del sensor AVHRR a bordo de los NOAA

| Banda | Intervalo<br>espectral ( $\mu\text{m}$ ) | Resolución<br>espacial (km) | Aplicaciones  |
|-------|--|-----------------------------|---|
| 1     | 0,58-0,68                                | 1,1                         | Seguimiento de nubes, <b>nieve</b> y <b>capa de hielo</b>                     |
| 2     | 0,72-1,1                                 | 1,1                         | Discriminación de superficies de agua y vegetación.<br>Aplicaciones agrícolas |
| 3     | 3,55-3,93                                | 1,1                         | Temperatura superficial del mar, volcanes e incendios forestales              |
| 4     | 10,3-11,3                                | 1,1                         | Temperatura superficial del mar, humedad del suelo                            |
| 5     | 11,5-12,5                                | 1,1                         | Temperatura superficial del mar, humedad del suelo                            |

Fuente: Fusco y Muirhead (1987)

La serie NOAA constituye una de las misiones espaciales que mayor éxito ha alcanzado. Originariamente diseñados para la recogida de información meteorológica, hoy día su uso se extiende a otras muchas aplicaciones terrestres y marinas: seguimiento de la vegetación a escala global y regional, cartografía de superficies cubiertas de hielo y nieve, oceanografía dinámica, hidrología, geología, detección de incendios, control de la contaminación atmosférica y marina, etc. El éxito y creciente uso de los datos NOAA se atribuye a una serie de factores: amplia cobertura temporal (4 imágenes diarias), resolución espacial media (1 km<sup>2</sup>), coste relativamente bajo de sus productos y fácil adquisición, alta resolución radiométrica, amplia zona de barrido y resolución espectral adecuada para una amplia diversidad de usos.

En Europa, la Agencia Espacial Europea y EUMETSAT colaboran en el desarrollo de un programa de satélites meteorológicos polares europeos (ESA, 1999a; CGMS, 1999). Se trata del programa MetOp (Meteorological Operational), una serie de tres satélites el primero de los cuales está previsto para el 2003. Los satélites llevarán instrumentos proporcionados por la ESA, EUMETSAT, NOAA y el CNES. Las mejoras en la plataforma, en el registro de la información y sistema de comunicación a bordo, y en los sensores, asegurarán beneficios respecto a los NOAA actuales. Está previsto que lleven varios sensores: ASCAT (Advanced Scatterometer), GOME (Global Ozone Monitoring Experiment), GRAS (Global positioning system Receiver for Atmospheric Sounding), HIRS (High Resolution Infrared Sounder) MHS (Microwave Humidity Sounder), IASI (Infrared Atmospheric Interferometric Sounder), AMSU (Advanced Microwave Temperature Sounder, AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer), ARGOS Data Collection System, Search and Rescue, y SEM (Space Environment Monitor). Estos sensores proporcionarán información sobre el perfil atmosférico (temperatura y humedad), las nubes, la superficie terrestre y marina (incluyendo medidas de los vientos oceánicos) y el contenido en ozono de la atmósfera.

## SATÉLITES DE RECURSOS

Se denominan así los satélites, generalmente de órbita polar y de alta resolución espacial, diseñados especialmente para la observación de la tierra. En su mayoría están provistos de radiómetros multispectrales que proporcionan información en el rango óptico, aunque en ocasiones incluyen bandas en el intervalo del térmico para estimar la temperatura de la superficie terrestre, o también, en los últimos años, sensores en el rango de las microondas. Todos ellos los hemos clasificado en tres grupos: grandes misiones operativas desarrolladas por las principales agencias espaciales, sistemas comerciales de muy alta resolución espacial que han surgido a finales del siglo XX, y los micro y mini-satélites a cuyo desarrollo se asiste en la actualidad.

*Grandes misiones operativas*

Son programas liderados por las grandes agencias espaciales nacionales que surgen con el objetivo de proporcionar datos sobre la superficie terrestre para la cartografía temática. Se trata de misiones continuadas y ampliamente consolidadas, entre las que destacamos el programa Landsat, la serie SPOT, IRS, y el satélite provisto de sensores activos RADARSAT.

*El programa Landsat*

Puede considerarse, sin duda, el más fructífero de todas las series puesto que ha proporcionado datos multispectrales de alta resolución durante más de 25 años, lo que representa el registro más largo de información sobre la superficie terrestre obtenido de forma global y repetitiva desde el espacio. El programa se inicia en 1972 con el lanzamiento del satélite ERTS-1 (rebautizado posteriormente como Landsat 1) que llevaba una cámara vidicon (RBV) y un radiómetro multispectral, el MSS (Multispectral Scanner System). Los Landsat 2 y 3, lanzados respectivamente en 1975 y 1978, portaban una configuración similar destacando el sensor MSS con 4 bandas espectrales en el visible-infrarrojo próximo y una resolución espacial de 79 m.

En 1982, con el lanzamiento del Landsat 4 se da paso a la segunda generación de los Landsat, que modifican sus características orbitales y de los sensores. El Landsat 4 tuvo una vida útil muy corta y fue sustituido en 1984 por el Landsat 5 que sigue proporcionando datos todavía en la actualidad. Ambos satélites mantienen el sensor MSS para garantizar la continuidad de los datos anteriores, eliminan las cámaras RBV e incorporan un nuevo sensor, denominado TM (Thematic Mapper), diseñado para la cartografía temática que proporciona datos de mayor resolución espacial, espectral y radiométrica. El TM registra la radiación en 7 bandas, tres de ellas están en el visible, una banda en el infrarrojo próximo, dos en el infrarrojo medio, y una en el térmico. La resolución espacial sobre el terreno es de 30 m para todas las bandas excepto el térmico con 120 m. La radiación recibida se registra en 256 niveles de intensidad en lugar de 64 ó 128, lo que permite la observación de cambios más pequeños en las magnitudes radiométricas para cada banda.

El Landsat 6 se lanzó en 1993 pero por fallos de comunicación con la plataforma no se ubicó en la órbita precisa y se perdió. Este fracaso y el dudoso éxito de la gestión privada de la distribución de las imágenes hizo temer por el futuro de estos satélites. No obstante y pese a algunas dificultades, se inicia el proyecto Landsat 7 que culmina con su lan-

zamiento, con éxito, el 15 de abril de 1999 y se espera tenga una vida de cinco años (NASA, 1999). El Landsat 7 incluye una versión mejorada del sensor TM, el ETM (Enhanced Thematic Mapper) que incorpora una banda pancromática (0,5-0,9  $\mu\text{m}$ ) con una resolución espacial de 15 m y parece abrir nuevas expectativas en la distribución y comercialización de los datos, con el abaratamiento anunciado de sus productos y el consiguiente acceso a un mayor número de usuarios.

#### *El Programa SPOT*

Como contrapartida a la serie Landsat en los años ochenta surge el programa SPOT (Systeme Pour la Observation de la Terre) diseñado en Francia por el CNES y desarrollado en colaboración con Bélgica y Suecia. Desde 1986 hasta la fecha se han puesto en órbita 4 satélites, y en la actualidad se prepara el lanzamiento del SPOT 5. La organización del programa se lleva a cabo conjuntamente por el CNES, responsable de la puesta en órbita, el mantenimiento y el control del satélite, así como de la recepción de imágenes en la estación de Toulouse, y la empresa Spot Image que se encarga de la definición del plan de funcionamiento diario del satélite -ya que las imágenes SPOT se toman también a petición del cliente- y de su explotación comercial.

Cada uno de los satélites SPOT 1, 2 y 3 está equipados con dos sensores idénticos HRV (High Resolution Visible), radiómetro de empuje que tiene dos formas de funcionamiento: el modo pancromático (P): 0,51-0,73  $\mu\text{m}$ , con una resolución espacial de 10 m y el modo multibanda (XS): con tres bandas (verde, rojo e infrarrojo próximo), con resolución espacial de 20 m. En cada escena cubre una franja de 60 km.

Además de mejorar sensiblemente la resolución espacial respecto al sensor TM del Landsat, otra de las ventajas del SPOT es la capacidad del HRV para variar su campo de observación gracias a un dispositivo móvil instalado en el equipo óptico que facilita observaciones no verticales de hasta 27 grados a ambos lados del nadir. Esta capacidad tiene implicaciones importantes ya que es posible observar la misma zona de terreno en órbitas sucesivas reduciendo la frecuencia temporal de 26 días a 2-3 días según latitudes y permitiendo la visión estereoscópica. Combinando dos imágenes de la misma zona registradas en días diferentes desde dos ángulos de visión distintos, es posible obtener un modelo tridimensional de la zona lo cual tiene gran valor para la interpretación topográfica y el desarrollo de Modelos Digitales de Elevación. En la actualidad, existen en órbita 3 satélites SPOT (SPOT-1 reactivado al fallar SPOT-3, SPOT-2 y SPOT-4), por lo que, combinando imágenes de dos satélites, es posible la adquisición estereoscópica el mismo día y, además, la repetitividad de la imagen se ha incrementado enormemente ya que, en teoría, es posible obtener una imagen diaria por alguno de los tres satélites en cualquier punto del 95% de la superficie terrestre.

La alta resolución espacial de las imágenes SPOT y su visión oblicua son las principales razones de su popularidad y del amplio número de aplicaciones a las que sirven (usos del suelo, cartografía topográfica y catastral, agricultura y bosques, exploración geológica y minera, recursos hídricos, estudios costeros, riesgos naturales, ...). Destaca el análisis visual, especialmente para el planeamiento del medio urbano, y las aplicaciones (agrícolas, forestales) que requieren un seguimiento frecuente.

El SPOT 4, puesto en órbita en marzo de 1998 incluye un sensor de alta resolución mejorado, el HRVIR que incorpora una nueva banda en el infrarrojo medio, y sustituye la banda pancromática del HRV por la banda del rojo que opera con una resolución de 20 y de 10 metros. Además el SPOT 4 ha incorporado un nuevo sensor denominado



VEGETATION dentro de un programa cofinanciado por la UE, Bélgica, Francia, Italia y Suecia, y liderado por el CNES. Este sensor, de características similares al AVHRR del NOAA, está diseñado para el seguimiento diario de la cobertura vegetal del planeta a escala global y regional. Opera de forma independiente al HRVIR, en 4 bandas espectrales (azul, rojo, infrarrojo próximo e infrarrojo medio) especialmente adecuadas para el estudio de la vegetación, incluyendo la banda del azul para la corrección atmosférica. Proporciona imágenes con una resolución espacial de 1 km x 1 km en el nadir y una franja de visión de 2.250 km, por lo que es posible obtener imágenes diarias en latitudes superiores a 35° (CNES, 1998).

Para el 2002 se prepara el lanzamiento del SPOT 5, desarrollado de nuevo en cooperación con Suecia y Bélgica, que dará continuidad al programa pero introduciendo un nuevo instrumento HRG (High Resolution Geometry) que proporcionará imágenes de muy alta resolución espacial (5 y 2,5 m para el modo pancromático, y 10 m en lugar de 20 m en las tres bandas del visible-infrarrojo próximo). Estas mejoras supondrán la aplicación de las imágenes para la cartografía topográfica a escala 1/50.000, con un error en la planimetría de 10 m, y en la elevación de 5 m.

#### *Los satélites IRS*

Junto a los programas Landsat y SPOT, en los años 90 hay que mencionar el programa espacial hindú IRS (Indian Remote Sensing Satellite) que tiene como objetivo mejorar el conocimiento de los recursos naturales en la India y combina características de los satélites Landsat MSS/TM y SPOT-HRV. Hasta el momento se han lanzado 5 satélites: IRS-1A en 1988, IRS-1B en 1991, IRS-P2 en 1994, IRS-1C en 1995 y IRS-1D en 1997. El IRS-1A estaba equipado con el sensor multispectral de empuje LISS-I (Linear Imaging Self Scanning) con 4 bandas en el intervalo espectral del visible al infrarrojo próximo y una resolución espacial de 72,5m. Los satélites IRS-1B y IRS-P2 trabajan con LISS-II que mantiene las 4 bandas espectrales pero con resolución espacial de 32 m x 37 m (Government of India, 1999).

En la actualidad, con el IRS-1C y la puesta en órbita del IRS-1D, es posible obtener imágenes de la misma zona con una frecuencia de 12 días. Ambos satélites están equipados con tres sensores: un pancromático (PAN) que proporciona imágenes con una resolución espacial de 5,8 m, el LISS-III que mejora la resolución espacial a 23,6 m (a excepción de la banda del infrarrojo medio) y un sensor de baja resolución espacial (188 m) y amplia visión, el WiFS (Wide Field Sensor) con una banda en el rojo y otra en el infrarrojo próximo, útil para la vegetación (Euromap, 1998). En cuanto a las aplicaciones, destaca la cartografía de gran escala, la planificación urbana, la discriminación de cubiertas de vegetación, cartografía de usos del suelo y gestión de recursos naturales. El sensor WiFS por sus características espectrales y su resolución se ha mostrado útil para el seguimiento de la vegetación a escala regional.

En los próximos años está previsto el lanzamiento del IRS-P5 (CARTOSAT-1) que únicamente trabajará con una cámara pancromática con 2,5 m de resolución, 30 km de barrido y capacidad estereoscópica. La alta resolución espacial lo hace adecuado para la cartografía y la confección de modelos digitales del terreno. Se espera que proporcione información para el catastro a una escala 1/5000 y que permita el trazado de curvas de nivel de 2-5 m. Si las previsiones se cumplen, a mediados del 2000 se pondrá en órbita el IRS-P6 (RESOURCESAT-1), específicamente diseñado para aplicaciones agrícolas y de recursos terrestres. Estará dotado de un sensor PAN con resolución 10 m y del LISS-IV, versión

mejorada del LISS-III con una resolución espacial de 10 m. Aunque es difícil encontrar información actualizada sobre estas misiones, se remite al lector a las páginas web de SATELLUS (1999) e ISRO (1999).

#### *RADARSAT*

El RADARSAT es un sistema avanzado de observación de la Tierra desarrollado por la Agencia Espacial Canadiense en colaboración con la NASA y puesto en órbita en 1995. Es el primer satélite radar civil operativo. Transporta el sistema SAR, radar de apertura sintética más avanzado del mundo. Opera en una única frecuencia (banda C) y tiene la capacidad exclusiva de trabajar en una franja de hasta 500 km. Proporciona cobertura global con la flexibilidad de operar en diversos modos y posiciones (franjas de barrido de 50 a 500 km con resoluciones que varían de 10 a 100 m y ángulos de incidencia de 20° a 50°). Aunque la repetitividad de la órbita es de 24 días, la mayor parte de la superficie terrestre obtiene una cobertura más frecuente. Utilizando la franja de barrido de 500 km, el RADARSAT proporciona imágenes diarias del Ártico, de algunas zonas de Canadá cada tres días, y consigue una cubierta total de latitudes ecuatoriales en cinco días (CCRS, 1999).

La información que proporciona es de gran utilidad en una amplia gama de campos: agricultura, cartografía, hidrología, selvicultura, oceanografía, reconocimiento de la cubierta de hielo, geología, desastres naturales como inundaciones o erupciones volcánicas, vigilancia costera. Además el RADARSAT proporcionó la primera cartografía detallada de la Antártida y los datos registrados han ayudado enormemente a la comunidad científica a conocer mejor y proteger esta inmensa fuente de recursos.

Para mantener su liderazgo en tecnología SAR, la agencia canadiense en colaboración con el sector privado prepara el lanzamiento en el 2001 del RADARSAT 2 (HEBERT, 1999) con una vida prevista de 7 años. Esta plataforma será más ligera, más barata y capaz y se supone dará continuidad al RADARSAT 1, aumentando la resolución espacial y aún más la flexibilidad de su configuración. Además, incorporará un transmisor de datos más potente que permitirá su recepción con antenas más pequeñas y baratas y será programable con más velocidad, aumentando así el acceso a la información captada.

#### *Satélites de muy alta resolución*

El lanzamiento el 24 de septiembre de 1999 del satélite IKONOS-2 ha supuesto la puesta en órbita del primer satélite no militar de muy alta resolución, por iniciativa totalmente privada y con un claro objetivo comercial. Este sistema y otros siete actualmente en proyecto son posibles gracias a los avances tecnológicos y, sobre todo, a la desclasificación de una tecnología hasta ahora reservada al uso militar como resultado del final de la guerra fría. Los operadores de estos sistemas pretenden proporcionar información valiosa para mercados específicos con una rentabilidad importante. Algunas estimaciones cifran el mercado global a principios del siglo XXI en torno a 3.000 a 8.000 millones de dólares.

La Tabla 3 recoge las características principales de los siete sistemas que identifica Fritz (1999), al que hemos añadido un octavo proyecto, el RapidEye, una iniciativa alemana que propone ofrecer imágenes con resolución espacial de 3 a 6 m diariamente de cualquier parte del mundo.

Tabla 3. Satélites de muy alta resolución previstos en la próxima década.

| Sistema     | Resolución espacial (m)                                   | Franja de barrido (km) | Ciclo                | Repetitividad | Fecha lanzamiento                         |
|-------------|---|------------------------|----------------------|---------------|---|
| IKONOS      | Pancromático: 0,82<br>Multiespectral: 3,28                | 121                    | 14 días              | 1-3 días      | 24 /9/ 1999                               |
| QuickBird   | Pancromático: 0,82<br>Multiespectral: 3,28                | 22                     | 20 días              | 1-5 días      | 2000                                      |
| OrbView     | Pancromático: 1<br>Multiespectral: 4<br>Hiperespectral: 4 | 64                     | 16 días              | <3 días       | 1999<br>2000                              |
| EROS        | Pancromático: 1,5<br>Multiespectral: 3,3                  | 182<br>256             | 7 & 15 días          | 3 días        | 2000-1 2 sats<br>2001-4 6 sats            |
| Resource 21 | Vis-NIR: 10<br>MIR: 20-100                                | 205                    | 3 días a<br>12 horas | SD            | 2000 2 sats<br>2001 2 sats                |
| GEROS       | Pancromático: SD<br>Multiespectral: 10                    | SD                     | 24 días /sat         | 16 días       | 2000 2 sats<br>2001 2 sats<br>2002 2 sats |
| XSTAR       | Hiperespectral: 20<br>(>10 bandas)                        | 320                    | 4 -7 días            | SD            | 2001 1 sat<br>2002 1 sat                  |
| RapidEye    | Multiespectral: 3-6                                       | 200                    | 2 días               | 1 día         | 2001 2 sats<br>2002 2 sats                |

Fuente: Fritz (1999), modificada

SD (Sin Determinar)

Las principales ventajas de estos satélites son su alta resolución espacial (entre 0,8 m y 5 m en el modo pancromático y entre 3 y 20 m en el rango multispectral), su capacidad para repetir paso sobre las áreas de interés -gracias a su agilidad y precisión de "punteo"- alcanzando una resolución temporal de 1-5 días, y la entrega de datos e información al cliente en plazos comprendidos entre 15 minutos y 24 horas, si bien esta disponibilidad dependerá en gran parte del acceso que tenga el usuario a las redes de comunicación. Además, la mayoría de estos sistemas tendrán capacidad estereoscópica, permitiendo generar Modelos Digitales de Elevación con precisiones de hasta 2 m en vertical, la modelización tridimensional de edificios y la clasificación de "usos" del suelo y no sólo de "cobertura".

El potencial de aplicación de estos datos es enorme destacando su uso para la cartografía de gran escala, la agricultura de precisión o las aplicaciones relacionadas con la integración de los datos en los Sistemas de Información Geográfica: evaluación de desastres, servicios de emergencia, detección de riesgos, planeamiento urbano, catastro, marketing de grandes superficies, control de tratados internacionales, arqueología, demografía, turismo, ingeniería de infraestructuras, telefonía, etc. Además, es seguro que las empresas privadas se preocuparán por crear muchos más mercados innovadores.

En los albores del siglo XXI se ha producido un salto cualitativo importante en la observación espacial, los satélites civiles acceden a la resolución de 1 m hasta ahora reservada a la observación militar por parte de las grandes potencias. Ante el desarrollo de estos sistemas de muy alta resolución el mercado de la teledetección espacial se enfrenta a importantes retos. Por un lado, en el ámbito del tratamiento de la información será necesario un esfuerzo de adaptación para desarrollar *softwares* operativos que puedan manejar un volumen tan considerable de datos, crear los algoritmos de corrección nece-

sarios, garantizar el control de calidad y la integración con otros datos dentro de los SIG. Por otro lado, en el terreno de los operadores será necesario avanzar en la legislación internacional para asegurar un acceso equitativo a la información para todos los usuarios y para resolver problemas que puedan surgir referentes a la competencia desleal que representan los programas públicos y privados. Todo ello sin entrar en el debate, casi moral, que supone la observación tan detallada desde el espacio, o en las consecuencias que en el terreno militar pueden derivarse de este hecho.

### *Los micro y minisatélites*

En la actualidad un tema de preocupación para los gobiernos y la comunidad científica es el desarrollo sostenible y la conservación de la biodiversidad. El desarrollo sostenible sólo es posible con una buena gestión medioambiental basada en el control y seguimiento del entorno a nivel local, que facilite el uso racional de los recursos naturales. Los países en vías de desarrollo necesitan, de manera especial, datos regulares, frecuentes, fiables, y accesibles sobre sus recursos a fin de planificar sus políticas medioambientales a corto y largo plazo (Naciones Unidas, 1999). Los satélites pequeños, de misiones limitadas pero específicas podrían facilitar este trabajo y contribuir al freno de la reducción de los recursos naturales, incluyendo los bosques tropicales, y a una mejor gestión medioambiental (DENORE, 1999)

Los satélites convencionales de teledetección son altamente costosos, por término medio cuestan más de \$200M cada satélite. En consecuencia las misiones son pocas e infrecuentes y sus datos, aunque de muy alta calidad, son igualmente costosos, aún cuando sus operadores reciben importantes subvenciones de los gobiernos. El desarrollo de sensores de semiconductores bidimensionales de alta densidad (CCD, Charge Couple Devices) junto con la potencia de los microprocesadores de bajo consumo energético han supuesto la posibilidad de llevar a cabo misiones de observación de la Tierra utilizando pequeños satélites de bajo coste. Esto satélites se denominan minisatélites cuando su peso oscila entre 100 y 500 kg y microsátélites cuando es inferior a 100 kg y su viabilidad técnica está siendo demostrada por las misiones llevadas a cabo hasta la fecha, entre las que destacamos los satélites UoSat-12, SunSat 1 y la misión KitSat. (MILNE *et al.*, 1999; FOUQUET y SWEETING, 1998a y b).

#### *UoSat 12*

El Uosat 12, puesto en órbita el 21 de abril de 1999 a bordo de un cohete militar ruso (SS18Dneper), es el primer minisatélite (aproximadamente 325 kg) que ha tomado imágenes de la Tierra (SSTL, 1999). Está provisto de un sensor multiespectral que proporciona imágenes con una resolución de 30m y 10m en el modo pancromático. Constituye el último de los satélites desarrollados y puestos en órbita por la empresa SSTL (Surrey Space Technology Ltd.) con sede en el Reino Unido. Esta empresa, pionera y líder en el sector, fue también la primera en ubicar un sensor multiespectral a bordo de un microsátélite (de sólo 50 kg). Desde principios de los ochenta, ha lanzado 14 pequeños satélites de los cuales 11 siguen funcionando en la actualidad. La empresa trabaja en colaboración con centros de desarrollo y agencias espaciales de los países emergentes (Chile, Corea, Malasia, Pakistán, Portugal, Singapur, Sudáfrica, Tailandia y, recientemente, China) y tienen previsto la creación de una constelación de minisatélites que proporcionaría imágenes en tiempos de desastres y emergencias.

### *SunSat 1*

Este microsatélite constituye una misión sudafricana, en operación desde el 23 de febrero de 1999, desarrollada por la Universidad de Stellenbosch y subvencionada por la NASA (ESL, 2000). Su objetivo fundamental era mostrar la máxima calidad de imagen posible con un sensor a bordo de un microsatélite. Está equipado con un sensor de alta resolución HRI (High Resolution Imager) que capta imágenes en tres bandas espectrales: verde (510-590 nm), rojo (600-685 nm) e infrarrojo próximo (710-900 nm) con una resolución espacial de 12,4 m, y una franja de barrido de unos 40 km. El sensor es dirigible, permitiendo la adquisición de pares estereoscópicos.

### *KitSat*

La misión Kitsat es una serie de tres satélites coreanos desarrollados por SaTReC (Satellite Technology Research Centre of Korea) y puestos en órbita el 26 de mayo de 1999. Su principal objetivo, al igual que otros programas de los países emergentes, consistía en el desarrollo de una tecnología autóctona pero, por sus prestaciones, ha mostrado ampliamente la capacidad para desarrollar un sistema de observación de la Tierra con un coste reducido. Está provisto del sensor MEIS (Multispectral Earth Imaging System), un radiómetro de empuje de 3456 píxeles que capta imágenes en tres bandas espectrales: verde (520-620 nm), rojo (620-690 nm) e infrarrojo próximo (730-900 nm), con una resolución espacial de 15 m y una franja de barrido de 50 km.

La principal ventaja de los micro y minisatélites estriba en el abaratamiento de los costes del programa lo cual se debe no sólo al diseño de la plataforma sino a los menores costes de lanzamiento (llegan a ser hasta 7 veces más barato por cada kilogramo del satélite y, en cifras globales, hasta 100 veces menor) y de los sistemas de transmisión-recepción-archivo-distribución, esto es, el denominado "segmento terreno".

Las grandes misiones de los satélites operativos utilizan grandes estaciones de recepción, archivo y distribución de datos, centralizadas y de alto coste. Los operadores de los microsatélites están adecuando sus sistemas para la transmisión directa de los datos, en tiempo real, desde el satélite a numerosas estaciones ubicadas allí donde el usuario lo requiera. Este sistema reduce enormemente la complejidad y tamaño de las bases de datos (aunque el volumen total de datos podría aumentar) y facilita la distribución incluso en zonas donde no se dispone de sistemas de comunicaciones avanzados. De ahí la ventaja de los microsatélites en aplicaciones como el control de incendios, lucha contra la contaminación o el seguimiento de tormentas, para las cuales el acceso a los datos en "tiempo real" es de suma importancia.

La viabilidad de las pequeñas estaciones de recepción de coste reducido, con capacidad para el almacenamiento y tratamiento de datos se ha visto claramente demostrada por sistemas de adquisición tipo HRPT (High Resolution Picture Transmission) de los satélites NOAA en meteorología y las estaciones Rapids (DOWNEY *et al.*, 1998) con capacidad para recibir imágenes SPOT, ERS, JERS, entre otros y ScanER (R&D Center Scanex, s.a.) que trabaja específicamente con la serie RESURS de satélites rusos. Este planteamiento en la adquisición repercutirá en un futuro próximo en la liberalización del acceso a la información con las ventajas adicionales que se derivan de ello, por cuanto el sector privado tendrá amplias oportunidades para crear mercados de servicios de información, especialmente en los países menos favorecidos donde la inversión es más problemática.

El bajo coste de los micro y minisatélites permite el acceso al espacio a muchos más países que podrán planificar misiones acordes con las necesidades específicas de su geografía, problemas medioambientales y niveles de desarrollo económico y tecnológico. Si las iniciativas individuales se pudieran coordinar se crearían constelaciones de satélites que proporcionarían imágenes con periodicidad casi diaria. Del mismo modo que la actual "constelación" de satélites meteorológicos - con componentes geoestacionarios y polares - comparte costes y explota sus sinergias, una constelación de pequeños satélites podría dar lugar a economías y ventajas mutuas. Tal colaboración supone, también, la reducción de riesgos puesto que el éxito de las misiones no dependería de un único satélite.

Tabla 4. Características de los satélites de recursos naturales

|  | Grandes misiones operativas   | Satélites de muy alta resolución   | Micro y minisatélites  |
|--|---|--|--|
| Financiación                                 | Pública   | Privada  | Mixta  |
| Ejemplos                                     | Landsat, SPOT, IRS  | IKONOS, EarlyBird  | SunSat, KitSat, UoSat12  |
| Resolución espacial                          | Alta:<br>5-20 m pancromático<br>10-30 m multiespectral  | Muy alta:<br>1-2 m pancromático<br>3-5 m multiespectral                                      | Media a alta:<br>30 m pancromático y multiespectral.   |
| Período orbital                              | 14 días   | 14 días  | 20 días/n, n=números de satélites en la constelación, Ej. si n=10, periodo = 2 days                        |
| Repetitividad                                | 7-14 días, SPOT es dirijible pero es necesario hacer llegar las peticiones con un mes de antelación.  | 1-3 días "casi tiempo real" gracias a su agilidad  | 20/n días  |
| Continuidad                                  | Políticamente incierto  | Financiación "blue chip" pero viabilidad comercial por demostrar                             | Desconocida en la actualidad pero el bajo coste es factor positivo   |
| Segmento terreno                             | Gran dependencia de los satélites<br>Dominado por grandes centros de recepción y archivos muy centralizados.<br>Casi sin desarrollar en los países en vías de desarrollo. | Operadores mantienen satélite de repuesto<br>Constituye un importante reto para la industria | Simplicidad de satélites, aumenta su longevidad.<br>Bajos costes ofrecen muchas oportunidades comerciales. |
| Accesibilidad                                | Una demora de 15 días a un mes entre la adquisición de imagen y entrega al cliente.   | Distribución en tiempo real vía Internet, etc.   | Recepción directa por parte del usuario con su propia antena.  |
| Calidad de imagen – estabilidad radiométrica | Estable, 8 bits   | 11-12 bit pixels   | Cuestionable   |
| Calidad de imagen – precisión geométrica     | 20-50 m   | 2-10 m, muchas veces con capacidad estereoscópica.   | Desconocida  |

En consecuencia, los micro y minisatélites pueden suponer una oportunidad muy interesante para naciones pequeñas o menos desarrolladas que podrán tener acceso al espacio sin necesidad de integrarse en grandes programas espaciales internacionales, los cuales suelen ser caros, inflexibles, responden a objetivos no siempre compatibles, y causan importantes demoras en su progreso.

Como contrapartida, en este contexto resulta cada vez más difícil mantenerse informado sobre quiénes están preparando qué misiones. En la actualidad se sabe que hay iniciativas para una colaboración entre Brasil y China (programa CBERS), otra entre España y Argentina (Cesar), y otra como el Surrey Space Club, el grupo de organizaciones que ha dado los primeros pasos en este ámbito bajo la tutela de SSTL. Es seguro que hay y, en el futuro, habrá muchas más misiones.

Para finalizar esta sección presentamos en la Tabla 4 un resumen de las principales características de los satélites en cada uno de los grupos comentados, que permite comparar las ventajas y desventajas de cada uno de ellos.

#### MISIONES CIENTÍFICAS DE OBSERVACION DEL SISTEMA TIERRA

En la actualidad existen del orden de 45 satélites en órbita provistos de gran variedad de sensores, activos y pasivos, que operan en un amplio rango espectral, y que proporcionan información sobre diversos fenómenos y parámetros geofísicos para conocer mejor el funcionamiento del sistema Tierra. Es posible enumerar hasta 25 parámetros clave (véase Tabla 5) sobre los cuales los satélites artificiales son capaces de proporcionar datos de forma operativa (ESA, 1997).

Tabla 5. Parámetros proporcionados por la teledetección espacial en los distintos campos de las ciencias medioambientales

| ATMÓSFERA  | TIERRA   | OCÉANO  | NIEVE Y HIELO   |
|--|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aerosoles</li> <li>• Humedad atmosférica</li> <li>• Temperatura atmosférica</li> <li>• Vientos atmosféricos</li> <li>• Tipo de nube, cantidad y temperatura del techo</li> <li>• Propiedades y perfil de las partículas nubosas</li> <li>• Agua líquida y precipitación</li> <li>• Ozono</li> <li>• Balance de radiación</li> <li>• Gases trazadores</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Albedo y reflectividad</li> <li>• Topografía</li> <li>• Humedad del suelo</li> <li>• Vegetación</li> <li>• Temperatura superficial terrestre</li> <li>• Otros aspectos</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Color /biología</li> <li>• Topografía del océano y corrientes</li> <li>• Viento de la superficie del mar</li> <li>• Temperatura superficial del mar</li> <li>• Altura y espectro del oleaje</li> <li>• Otros aspectos</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Topografía de la capa de hielo</li> <li>• Límite, cubierta y profundidad de la nieve</li> <li>• Límite y espesor del hielo oceánico</li> </ul> |

Fuente: ESA (1997)

En este apartado describimos aquellas misiones que proporcionan datos para el conocimiento del funcionamiento del planeta como sistema. A diferencia de los satélites de recursos con tendencia a la mejora en la resolución espacial, en este caso se trata de programas orientados a la creación de amplias bases de datos que permitan caracterizar y

modelizar procesos globales y a la experimentación con nuevos sensores que midan un número creciente de parámetros medioambientales. Hemos incluido aquí los satélites dedicados a la observación del mar, si bien por su importancia y características podrían ser objeto de una sección propia.

### *El estudio del mar*

En el ámbito de la oceanografía al igual que en el de la meteorología, los satélites artificiales constituyen una técnica de observación muy valiosa ya que, con frecuencia, es la única forma de obtener una visión global continuada de fenómenos dinámicos de gran extensión (ROBINSON, 1985). Satélites específicamente oceanográficos son: el Seasat puesto en órbita en junio de 1978 que tuvo un período de vida de 106 días; el Nimbus 7 lanzado también en 1978; la serie japonesa MOS (Marine Observation Satellite) operativa entre 1987 y 1996; y el satélite TOPEX/Poseidon (Ocean Topography Experiment) lanzado en 1992 y en operación hasta abril de 1999. Además, la serie europea ERS (European Remote Sensing Satellite) en órbita desde julio de 1991 está equipada con sensores radar y radiómetros en el infrarrojo térmico y microondas que proporcionan valiosa información para el estudio del océano. Véase López García (2000) para una descripción detallada de estos sistemas.

Entre las primeras aplicaciones destaca la medida del color del mar, relacionada con parámetros biológicos como el fitoplancton o con la cantidad de materiales en suspensión disueltos. Las observaciones del color del mar, junto con los datos de temperatura superficial del mar, pueden ser utilizados como indicadores de la presencia de bancos de pesca, para determinar la calidad de las aguas y, en el caso de zonas costeras, para conocer los procesos de erosión y transporte de sedimentos. Hasta la fecha, con la excepción del sensor CZCS (Coastal Zone Colour Scanner) a bordo del Nimbus 7 especialmente diseñado para obtener información sobre el color del mar, los satélites con sensores ópticos (SPOT, Landsat y NOAA) tienen una aplicación limitada debido a su resolución espectral. Sin embargo, proyectos como el SeaWiFS, abren nuevas expectativas para los próximos años.

La determinación de la temperatura superficial del mar SST constituye una de las aplicaciones más extendidas con sensores en el infrarrojo térmico tipo AVHRR a bordo del NOAA y ATSR (Along Track Scanning Radiometer) a bordo del ERS, o en intervalo de las microondas (AMSR). La temperatura superficial del mar es un parámetro clave para estudios sobre el intercambio de calor océano-atmósfera, para detectar frentes y estructuras térmicas de mesoescala, inferir la circulación oceánica, así como para identificar anomalías térmicas y su relación con el clima, como el fenómeno de "El Niño-La Niña". La metodología para obtener datos de temperatura superficial del mar a partir de la temperatura radiativa registrada por el sensor se halla, en la actualidad, muy desarrollada, sin embargo los datos de temperatura *in situ* todavía juegan un papel crucial en la calibración y la conversión de los datos.

Otras características igualmente accesibles por teledetección, si bien todavía requieren mejoras en los sensores y en la metodología son: la topografía del mar a partir de altímetros como los ubicados en plataformas como el ERS, TOPEX/Poseidon y JASON-1; la intensidad y dirección del viento en la superficie del mar mediante el dispersómetro de microondas AMI (Active Microwave Instrument) a bordo del ERS y el radar de apertura sintética SAR (Synthetic Aperture Radar) entre otros; medidas de la altura del oleaje a



partir del altímetro y el SAR; la cartografía de los fondos oceánicos, y la detección y seguimiento de contaminación marina.

### *Programas globales*

El panel intergubernamental sobre el cambio climático, un foro internacional creado por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de la Naciones Unidas sobre Medioambiente, identificó varios temas clave que requieren investigación para comprender mejor el funcionamiento del clima (Asrar y Dozier, 1994). Estas cuestiones hacen referencia a:

- Nubes: formación, disipación y propiedades radiativas, que influyen en la respuesta de la atmósfera al "efecto invernadero"
- Océanos: el intercambio de energía entre el océano y la atmósfera, entre las capas superiores y profundas, el transporte dentro del océano, todo lo cual controla la tasa de cambio climático y los aspectos del cambio regional
- Gases de "efecto invernadero": cuantificación de la entrada y salida de los gases, sus reacciones químicas en la atmósfera y como influyen en el cambio climático
- Capas de hielo: predicción del estado y nivel del mar en el futuro
- Hidrología continental
- Impacto del cambio en los ecosistemas

Para avanzar en estos estudios se requiere la cooperación internacional ya que ningún país o región puede abordar en solitario el análisis global del planeta. Las instituciones científicas internacionales han organizado tres programas de cooperación para la investigación de los cambios globales: el WCRP (World Climate Research Programme) que forma parte del Programa Mundial del Clima, el IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme) y el IHDP (International Human Dimensions Programme) del Cambio global.

A su vez la comunidad internacional ha creado varios foros, comités y organizaciones que se responsabilizan de responder a las necesidades para entender el clima, los océanos y los procesos terrestres, dentro de una estrategia integrada para la observación global, IGOS (Integrated Global Observing Strategy). En este sentido cabe destacar el papel del CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), una organización informal internacional que reúne a las agencias espaciales nacionales y regionales para coordinar sus esfuerzos en la observación del sistema Tierra. Está actualmente analizando los satélites, sensores y productos de los programas en operación y previstos en los próximos 15 años, así como los requerimientos de las organizaciones científicas internacionales e intergubernamentales. Además, el CEOS estudia y fomenta un sistema internacional para el tratamiento, archivo y disseminación de las grandes cantidades de datos disponibles junto con la posibilidad de crear una red complementaria de observaciones sobre el terreno para la calibración y validación de las observaciones especiales.

Se describe a continuación, a modo de ejemplo, los tres programas de más firme propósito enfocados al estudio del cambio global, liderados por las agencias espaciales japonesa, estadounidense y europea. Sin embargo, no son los únicos, hay y habrá más, como el programa IRS de la India, misiones propuestas por la Federación Rusa (METEOR), China y Brasil (CBERS), Australia (ARIES) y Suecia (Odin). Una descripción más detallada de éstas y otras misiones previstas para los próximos años puede encontrarse en el

documento CEOS (ESA 1997).

#### *ADEOS-MIDORI*

El satélite ADEOS (Advanced Earth Observing Satellite), denominado MIDORI en Japón, es la primera plataforma internacional dedicada a la investigación medioambiental terrestre, desarrollada y gestionada por la agencia espacial japonesa. Puesta en órbita en agosto de 1996 y provista de ocho sensores, su objetivo era proporcionar medidas de la atmósfera y de la superficie terrestre y marina para el estudio de la pérdida de la capa de ozono, los gases de "efecto invernadero" y el fenómeno de "El Niño". Tras 10 meses en operación el satélite dejó de funcionar en junio de 1997 y espera ser reemplazado por el ADEOS II en el año 2000. Este satélite estará equipado con varios sensores incluyendo el radiómetro AMSR (Advanced Microwave Scanning Radiometer) para observar el ciclo hidrológico, y el GLI (Global Imager) un sensor multispectral para el estudio de los océanos y la atmósfera. Se espera así adquirir datos para el estudio de la circulación de agua y energía, el ciclo del carbono y contribuir al estudio de los mecanismos que afectan al cambio climático (NASDA, 1999).

#### *EOS (Earth Observing System)*

Este programa de la NASA consiste en el desarrollo y puesta en operación de una serie de satélites polares de observación de la superficie terrestre, la atmósfera, el océano y la biosfera con objeto de disponer de información para analizar las causas y efectos del cambio global y avanzar en el desarrollo de modelos de predicción a largo plazo. Es un ambicioso programa de observación a largo plazo (18 años) que incluye muchas misiones, muchos instrumentos y un importante componente de colaboración internacional. Para lograr sus objetivos los sensores medirán los flujos radiativos de la Tierra desde el ultravioleta a las microondas, y se espera formar una base de datos globales y a largo plazo. Además de la serie de satélites, los norteamericanos están invirtiendo importantes esfuerzos en la creación de una red informática para el tratamiento, archivo y distribución de los datos (el denominado sistema EOSDIS) así como en la constitución de equipos multidisciplinarios internacionales para el análisis de los datos.

Dentro del programa destacan tres misiones: Terra (EOS-AM), Aqua (EOS-PM) y EOS-Chem, la primera de las cuales se inició el 18 de diciembre de 1999 con el lanzamiento del satélite Terra 1 (NASA, 2000a, b y c). Terra lleva cinco instrumentos para el estudio de la dinámica de la atmósfera y los ciclos de agua y energía, los intercambios radiativos entre las nubes y las masas de aire y tierra, perfiles verticales de CO<sub>2</sub>, aerosoles atmosféricos y metano volcánico. El objetivo último de la NASA es asegurar que éste y otros programas espaciales (Landsat 7, NOAA, GOES, TRMM, EOS-ALT, EOS-COLOR etc.) estén plenamente integrados entre sí, con datos terrestres y con los demás programas internacionales.

#### *ENVISAT / Living Planet*

El satélite ENVISAT es un proyecto de la Agencia Espacial Europea que tiene su lanzamiento previsto en junio del 2001 con una duración de cinco años. Tiene dos objetivos fundamentales: dar continuidad a las medidas del ERS-1 y ERS-2 para la circulación oceánica y la cartografía de ecosistemas y su fenología, y contribuir a los estudios de las propiedades de la superficie terrestre, la química de la atmósfera, la distribución de los aerosoles y la biología marina (ESA, 1999b). Después del ENVISAT la ESA propone progra-

mar sus misiones de una forma distinta a través del programa "Living Planet" que proporcionará un marco de financiación global a medio plazo asegurada. Este programa establece unos objetivos científicos claros y corresponde a la industria y la comunidad científica el proponer las misiones para cumplirlos. Las nuevas misiones se dividen en dos grupos, las denominadas "Earth Explorer" que cubre los requerimientos de investigación y para las cuales en la actualidad hay dos propuestas (una para el estudio del campo de gravedad terrestre y otra para el estudio de la dinámica atmosférica) y las "Earth Watch" misiones prototipo orientados a nuevas aplicaciones según los requerimientos del mercado.

#### CONCLUSIONES

Tras el análisis de las principales misiones de observación de la Tierra actualmente en funcionamiento abrimos una reflexión acerca de las actuales y futuras tendencias y de los retos con los que nos enfrentamos los usuarios y los diversos especialistas que intervienen en el proceso de adquisición de información. Los avances científicos y tecnológicos (microprocesadores, los PCs, el Internet, etc.) en las dos últimas décadas han permitido e impuesto un desarrollo acelerado de las técnicas espaciales que se ha visto impulsado por una creciente demanda de la información. Al mismo tiempo, las necesidades a cubrir por el potencial usuario están siendo redefinidas a medida que la técnica ofrece más y mejores posibilidades. Las tendencias actuales de la teledetección pueden resumirse:

- i) *Mejoras en la resolución espacial de las imágenes:* los sensores ubicados en satélites operativos de recursos muestran una clara tendencia a la mayor resolución espacial. Estos programas junto con los nuevos sistemas comerciales de muy alta resolución permitirán el uso de las imágenes para la cartografía de gran escala, incluyendo el trazado de curvas de nivel e incluso la extracción de Modelos Digitales de Elevación. Los satélites civiles proporcionan ya imágenes con resolución inferior a 1 m. Se identifican nuevos retos para el científico y la industria que deberá adecuar su tecnología para el tratamiento de esta información.
- ii) *Programas científicos de observación de la Tierra:* las grandes agencias espaciales están liderando misiones espaciales a medio y largo plazo cuyo objetivo es obtener información para diagnosticar y modelizar el funcionamiento del sistema Tierra y el cambio global. Se experimenta con nuevos sensores avanzados, en un amplio rango espectral, que proporcionen medidas sobre varios parámetros. En el conjunto de estos programas se identifican iniciativas intergubernamentales que fomentan la cooperación científica internacional y la creación de bases de datos globales útiles y accesibles.
- iii) *Micro y minisatélites:* las misiones de pequeños satélites -de bajo coste- son una alternativa viable especialmente para países en vías de desarrollo con dificultad para acceder o liderar grandes programas espaciales. El éxito de estas iniciativas parece ligado al logro de la coordinación y colaboración entre países interesados que compartan objetivos comunes, así como en conseguir un buen funcionamiento de los sistemas de recepción-distribución de la información.
- iv) *Ampliación del mercado:* los avances en la informática, con el desarrollo de softwares

específicos de fácil manejo, está haciendo posible el acceso de la información espacial a un número de usuarios -no expertos- cada vez mayor. Junto a ello, cada vez se considera más el valor temporal de las imágenes como documento único del pasado y se acude a la explotación de bases de datos retrospectivas. Las posibilidades de los nuevos sensores, sin duda, cubrirán demandas cada vez mayores. Finalmente, la tecnología de internet que facilita el acceso a los archivos de imágenes y la rápida adquisición de las imágenes, favorece el uso de los datos tanto actuales como retrospectivos.

- v) *Comercialización*: se asiste a la entrada del sector privado en el mundo de la teledetección espacial, con compañías comerciales que asumen el diseño, lanzamiento y operación de los satélites artificiales. La información obtenida podrá ser adquirida por organismos públicos (servicios nacionales de meteorología, hidrología...) y por empresas privadas. Todavía es pronto para valorar las consecuencias, ventajas e inconvenientes, derivadas de esta nueva tendencia.

Finalmente, centrándonos en el ámbito de los satélites de recursos, los aspectos comentados (aparición de los pequeños satélites, entrada del sector privado como competidor comercial, los nuevos sensores de muy alta resolución, la ampliación del mercado potencial) hacen vislumbrar importantes cambios a medio y corto plazo con tendencia a facilitar al usuario el acceso a la información. La viabilidad demostrada por las pequeñas estaciones de recepción permitirían el acceso directo y en tiempo real a los datos de los satélites de recursos con la misma facilidad con que es posible, hoy día, acceder a los datos meteorológicos. Siendo optimistas, esto repercutirá en el abaratamiento de la información que, por otra parte, ya se intenta desde programas operativos como el Landsat. Las tendencias actuales apuntan hacia una etapa de mayor liberalización que, por un lado beneficiaría al usuario y, por otro, permitiría rentabilizar al máximo las inversiones que, de hecho, ya se están produciendo básicamente desde el sector público. Que se consoliden o no dichas tendencias dependerá de si la industria espacial, global por su naturaleza, es capaz de responder al reto de servir a los requerimientos de la gestión medioambiental, a escala local, que exige el desarrollo sostenible de los recursos en nuestro planeta.

#### BIBLIOGRAFIA

- ASRAR G. and DOZIER J. (1994): *EOS: Science Strategy for the Earth Observing System*, AIP Press, Woodbury, NY
- CCRS (1999): *RADARSAT: General Overview* [en línea], rev. 16-10-98.  
<<http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/radarsat/specs/radovere.html>>, [consulta: 12 enero 2000]
- CGMS (1999): *Directory of Meteorological Satellite Applications*, Publicación en CD-ROM, EUMETSAT, Paris.
- CNES (1998): *SPOT-4 Satellite pour l'observation de la terre. Dossier d'informations*, Centre Nationale D'Etudes Spatiales. París, 48 p.
- DENORE B.J. (1999): *COCONUDS User Needs Assessment Workshop*, JRC, Ispra, 22 April 1999, GEOSYS, S.L. Madrid. Publicación [en línea] <<http://coconuds.nlr.nl/>>
- DOWNEY, I.D., WILLIAMS, J.B., ARCHER, D.J., STEPHENSON, J.R., STEPHENSON, R., LOOYEN, W. (1998): *Enabling Local User Access to Remote Sensing Data: RAPIDS - a Practical and*

- affordable X-band Ground Station for Developing Countries. *Proceedings 27<sup>th</sup> Int. Symp. On Remote Sensing of Environment*, Tromso, Junio 1998.
- Euromap (1998): *IRS-1C, Orbit and Coverage* [en línea], rev. 14-10-98.  
<[http://www.euromap.de/doc\\_106.htm](http://www.euromap.de/doc_106.htm)> , [consulta: 8 noviembre 1999]
- ESA (1997): *Committee on Earth Observation Satellite: Towards an Integrated Global Observing Strategy*, (1997 CEOS Year Book), Smith System Engineering Limited, U.K., 145p.
- ESA (1998): *The Earth Explorers, The science and research elements of ESA's Living Planet Programme*. ESA Publications Division, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands.
- ESA (1999a): *METOP* [en línea], rev. 5-11-99.  
<<http://earth.esa.int/missions>> , [consulta: 10 diciembre 1999]
- ESA (1999b): *Envisat 1: Mission and System* [en línea], rev. 6-12-99.  
<<http://envisat.estec.esa.nl/>> , [consulta: 8 diciembre 1999]
- ESL (2000) *SUNSAT*. Electronic Systems Laboratory, [en línea], rev. 2-1-2000,  
<<http://sunsat.ee.sun.ac.za>>, [consulta: 27 enero 2000]
- FOUQUET M. y SWEETING, M. (1998a): "Earth Observation using low cost SSTL Microsatellites", *Proceedings 47 IAF Congress*, Beijing.
- FOUQUET M. y SWEETING, M. (1998b): "UoSat-12 Minisatellite for High Performance Earth Observation at Low cost", *Proceedings 47 IAF Congress*, Beijing.
- FRITZ, L.W. (1999): High Resolution Commercial Remote Sensing Satellites and Spatial Information Systems. *ISPRS Highlights*, Vol. 4, No 2, p19-30
- FUSCO, L. y K. MUIRHEAD (1987): AVHRR Data Services in Europe - The Earthnet Approach, *ESA Bulletin* 49, 9-19 pp.
- Government of India (1999): "National Paper of India "Space for development: An Indian perspective". Presentado en: *Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space*. (A/CONF.184/NP/35), Vienna, 10-30 Julio 1999.
- HEBERT, P. (1999): RADARSAT-2 Opportunities. Presentado en: *UNISPACE III Technical Forum Workshop on Developing Indigenous Earth Observation Capabilities in Developing Countries*. July, Vienna.
- IGOS (1999) *Integrated Global Observing Strategy (IGOS) PartnersHome Page*, [en línea], rev. 18-10-99  
<<http://www.igospartners.org/>>, [consulta: 8 diciembre 1999]
- ISRO (1999): *Indian Space Research Organization* [en línea], rev. 25-1-2000  
<<http://www.isro.org/>>, [consulta: 27 enero 2000]
- LÓPEZ GARCÍA, M.J. (2000): Sensores y plataformas en: J.A. Sobrino (coordinador) *Teledetección*, Universitat de València, Servei de Publicacions, Valencia, cap. 2.
- MILNE, G.W., MOSTERT, S., SCHOONWINKEL, A. y DU PLESSIS, J.J. (1999): Early orbit status of SUNSAT, South Africa's first satellite, en: *Unispace III-United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space*, Viena, Julio 1999.
- Naciones Unidas (1999): *Report of the Third United Nations Conference on the Exploration and Peaceful Uses of Outer Space*. (A/CONF.184/6), Vienna, 19-30 July 1999.
- NASA (1999): *Landsat 7. Science Data Users Handbook* [en línea], rev. 20-9-99.  
<[http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook\\_toc.html](http://ftpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html)>, [consulta: 3 noviembre 1999]
- NASA (2000a): *TERRA, The EOS Flagship*, [en línea], rev. 20-1-2000  
<<http://terra.nasa.gov>>, [consulta: 21 enero 2000]
- NASA (2000b): *Earth Observing System: Aqua*, [en línea], rev.  
<<http://aqua.gsfc.nasa.gov>>, [consulta: 21 enero 2000]

- NASA (2000c): *EOS Chemistry (CHEM) Project Home Page*, [en línea], rev. 12-1-2000  
<<http://eos-chem.gsfc.nasa.gov>>, [consulta: 21 enero 2000]
- NASDA (1999): *ADEOS Home Page*, [en línea], rev. 3-9-99  
<<http://www.eorc.nasda.go.jp/ADEOS/>>, [consulta: 21 enero 2000]
- NCDC (1998): *About National Climatic Data Center's Satellite Resources*, [en línea], rev. 21-10-98.  
<<http://www.ncdc.noaa.gov/ol/satellite/satelliteresourcesabout.html>>, [consulta: 27 octubre 1999]
- NOAA (1999): *NOAA KLM Users's Guide*, [en línea], rev. Mayo 1999.  
<<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>>, [consulta: 4 noviembre 1999]
- R&D Center ScanEx (s.a.) *The ScanER Personal Ground Station*, R&D Center Scanex, 22/5 Lva Tolstogo st., 119021 Moscow, Russia.
- ROBINSON, I.S. (1985) *Satellite Oceanography. An Introduction for Oceanographers and Remote-sensing Scientist*, New York: John Wiley & Sons, 445 p.
- SATELLUS (1999): *Swedish Space Corporation Group: Remote Sensing Satellites* [en línea], rev. 22-12-99  
<[http://satellites.satellus.se/irs\\_1.asp](http://satellites.satellus.se/irs_1.asp)>, [consulta: 27 enero 2000]
- SSTL (1999): *Surrey Satellite Technology Ltd.* [en línea]  
<<http://www.sstl.co.uk/>>, [consulta: 6 diciembre 1999]
- WMO (1999): *World Meteorological Organization Satellite Activities: Space-based Global Observing System (GOS)*, [en línea], rev. 30-8-99.  
<<http://www.wmo.ch/hinsman/GEOPresent.html>>, [consulta: 27 enero 2000]