

SENSORES ESPACIALES PARA ESTUDIOS AMBIENTALES, A LAS PUERTAS DEL SIGLO XXI

J. Elvecio Pernía P.

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales,
Laboratorio de Fotogrametría y Sensores Remotos, Mérida - Venezuela, Email: epernia@forest.ula.ve

RESUMEN

Las imágenes de percepción remota de gran visión y carácter repetitivo para la evaluación de los recursos terrestres han estado disponibles al medio civil, a nivel mundial, desde 1972, cuando se inició el programa LANDSAT. Para entonces la explotación del espacio extraterrestre estaba limitada a las dos superpotencias: EE. UU. y Unión Soviética. Esta última desarrolló y operó sistemas paralelos a los de EE.UU., pero con una filosofía de distribución muy restringida. A partir de entonces se ha producido un avance progresivo en los sistemas civiles de percepción remota, beneficiado por la incorporación, a partir de 1986, de otros países como Francia e India, y últimamente con el desarrollo de sistemas netamente comerciales.

Acercándonos al siglo XXI, la resolución espacial de los instrumentos a bordo de satélites ronda el metro y la resolución espectral ha trascendido el marco multiespectral para alcanzar el hiperspectral (hasta más de 100 bandas). Los nuevos sensores han sido diseñados para observar prácticamente en cualquier dirección produciendo imágenes estereoscópicas que permiten la creación de modelos digitales del terreno (MDT) y mapas de escala hasta 1:5.000, con curvas de nivel cada 2 a 5 m. Con la resolución espacial del metro es posible llegar a estudios detallados como catastro y planificación urbana y la planificación de las actividades agrícolas. El marco hiperspectral permitirá llegar al nivel de la composición química de los elementos y materiales de la escena. Pero así como esta resolución fina es una necesidad para los estudios detallados, las resoluciones muy gruesas, en el orden de varios cientos de metros hasta varios kilómetros, son buscadas y muy valoradas para estudios de grandes regiones del planeta y estudios globales. El panorama que se presenta para el advenimiento del nuevo siglo es muy promisor, con numerosos sistemas, de variadas características, para satisfacer un gran número de aplicaciones referentes a las actividades del manejo de los recursos y el monitoreo ambiental. Este artículo presenta información general sobre 17 programas espaciales y 39 satélites de percepción remota.

Palabras clave: Programas de percepción remota, sensores remotos, imágenes de satélite, evaluación de recursos, monitoreo ambiental.

ABSTRACT

Broad vision and repetitive remote sensing images for the evaluation of the earth resources have been available to the world civil community since 1972, when the LANDSAT program started. For then, the exploitation of the extraterrestrial space was limited to the two superpowers: the U.S.A. and the Soviet Union. The later developed and operated parallel systems to those of the U.S.A., but with a very restricted distribution philosophy. Since then, a great and progressive improvement of the civil remote sensing systems has been undertaken, with the benefit from the incorporation, since 1986, of some other countries such as France and India, and more recently, with the development of commercial systems.

Arriving to the XXI century, the spatial resolution of the instruments on board the satellites circa the meter, and the spectral resolution has undergone the multiespectral frame to reach the hyperspectral one (up to more than 100 bands). The new sensors have been designed to look practically in any direction, producing stereoscopic images for the generation of digital terrain models (DTM) and the drawing of maps up to 1:5.000 scale with 2-5 m contour lines. With one meter spatial resolution it is possible to arrive to detailed studies such as urban cadastral surveys, urban planning and farming planning. The hyperspectral scope will allow to arrive to the level of the chemical composition of materials and elements on the scene. But, as the fine resolution is a requirement for detailed studies, in the same way, the coarse resolutions, in the order of several hundreds of meters up to several kilometers, are envisioned and valued for studies of great regions of the planet and for global studies. For the arriving of the new century the panorama looks promising, with numerous systems, with different characteristics to satisfy a great number of applications related to the management of the earth resources and environmental monitoring. General information about 17 spatial programs and 39 remote sensing satellites is presented in this article.

Key words: remote sensing programs, remote sensors, satellite images, resource evaluation, environmental monitoring.

INTRODUCCIÓN

Desde que ERTS-1 (luego rebautizado LANDSAT-1) inició en 1972 la obtención de imágenes de la superficie terrestre han transcurrido 27 años. Este

fue el primer programa de larga duración, con amplia difusión de imágenes de percepción remota al medio civil. Las primeras imágenes en falso color del

LANDSAT-1, por una parte sorprendieron, con su amplia cobertura y visión de conjunto de los paisajes y sus componentes mayores. También resultó significativo contar con un sistema con capacidad repetitiva en el tiempo. Pero, por otra parte, pareció muy limitado el detalle local que permitían sus 80 metros de resolución. Una ciudad mediana se veía como una uniforme mancha gris clara en las bandas del visible y algo oscura en las bandas infrarrojo cercano. En estos 27 años muchos han sido los avances en el desarrollo científico y tecnológico y en la visión del mundo. Desde 1993 la comunidad civil ha contado con imágenes de 2 m de resolución, tomadas desde el espacio por los antiguos sistemas fotográficos militares de la Unión Soviética, donde se aprecia con detalle los elementos urbanos, como son las calles y las edificaciones. Esta posibilidad ocurrió como consecuencia de un trascendente cambio político de orden mundial como fue el **fin de la guerra fría**.

Desde 1995 otras imágenes han sorprendido a los usuarios con la definición del detalle urbano. Son las tomadas por un sensor óptico-electrónico pancromático a bordo del satélite IRS-1C de la India, con una resolución espacial de 5.8 metros. Este sistema, totalmente civil, es el resultado del avance tecnológico que ha venido ocurriendo desde 1972, y que con el inicio del sistema francés SPOT en 1986, dejó de ser patrimonio exclusivo de las dos grandes potencias. Una manera de apreciar el avance tecnológico de los sistemas de percepción remota desde el espacio es observando la disminución del tamaño de las unidades de resolución o píxeles, a través del tiempo, es decir, el aumento del poder de resolución espacial, que se presenta en el Cuadro 1.

Para los últimos años del siglo XX varios sistemas con 1 metro de resolución espacial están poniéndose en órbita. El panorama para comienzos del nuevo siglo se presenta promisor para la evaluación de los recursos ambientales del planeta, con una variada oferta de imágenes cuyas características pueden resumirse de la manera siguiente:

- Resolución espacial: desde muy gruesa, generalmente de 0.5 a 4 Km, como en los sistemas AVHRR de la Agencia Nacional Oceanográfica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) y VEGETATION de SPOT-4 y 5, hasta muy fina, en el orden del metro, como en los sistemas QuickBird, Orbview e Ikonos.
- Resolución espectral: desde las imágenes

pancromáticas (una sola banda) fotográficas y óptico-electrónicas, hasta las imágenes hiperespectrales (de 32 a 256 bandas), pasando por varios sistemas multiespectrales (3-30 bandas) (Stoney, 1997).

- Resolución temporal: desde los sistemas con capacidad de tomar varias imágenes por día (AVHRR de NOAA por ejemplo), hasta los que vuelven a tomar la misma área cada tres o cuatro semanas.
- Tipo de energía electromagnética utilizada por los sensores: visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio, infrarrojo termal y microondas.
- Capacidades cartográficas: los sistemas espaciales de cruce de siglo tienen la capacidad de adquirir imágenes monoscópicas y estereoscópicas para producir tanto mapas planimétricos como mapas planialtimétricos, con exactitud planimétrica dentro del pixel y con curvas de nivel con intervalo menor de los 10 metros y exactitud igual a la mitad del intervalo entre curvas. Así mismo, estas imágenes suministran la información necesaria para preparar mapas temáticos en una extensa gama de disciplinas y aplicaciones.
- Países promotores: EE.UU., Rusia, Francia, India, Suecia, Bélgica, Canadá, Japón, China, Brasil, Corea, Australia, Israel, Inglaterra, y algunos otros.
- Naturaleza: muchos programas continuarán siendo financiados por las agencias gubernamentales en combinación con firmas comerciales (LANDSAT, SPOT, IRS, JERS, etc.), mientras que otros están siendo construidos, colocados en órbita y operados totalmente por el sector comercial (QuickBird e Ikonos, por ejemplo).

CUADRO 1. Aumento del límite de resolución espacial de los sistemas de percepción remota a través del tiempo.

Año	Límite de resolución espacial	Satélite	País
1972	~ 80 m	LANDSAT-1	EE.UU.
1982	30 m	LANDSAT-3	EE.UU.
1986	10 m	SPOT-1	FRANCIA
1993	2 m	COSMOS	RUSIA
1995	5.8 m	IRS-1C	INDIA
1999/2000	1 m	QUICKBIRD-1, ORBVIEW-3	EE.UU.

PROGRAMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA PARA EL CRUCE DE SIGLO

Programa NOAA (EE.UU.)

La Administración Nacional Oceanográfica y Atmosférica (NOAA) de los Estados Unidos adelanta uno de los programas espaciales atmosféricos más antiguos y con mayor tradición en el mundo. Desde que NOAA-1 fue lanzado en diciembre de 1970, un total de 14 satélites de este programa han sido colocados en órbita, de los cuales NOAA-13 no funcionó por una falla de energía (Sizemore y Carroll, 1999). Con esta excepción, los variados sensores de los satélites NOAA han suministrado muy valiosos datos para la evaluación no sólo de la atmósfera, sino también de los mares, océanos y áreas continentales.

Actualmente se cuenta con el satélite NOAA-14, operativo desde marzo de 1995, y con el NOAA-15, lanzado el 13 de mayo de 1998, colocados en órbitas cercanamente polares, heliosincronizadas, de 850 Km de altura. NOAA-14 porta un radiómetro de alta resolución AVHRR-2, un sensor de temperatura HIRS-2, una unidad de microondas pasivo MSU y un radar para búsqueda y rescate SRSAT. AVHRR-2 registra fajas de 2.600 Km, en cinco bandas espectrales, una en el visible, una en el infrarrojo cercano y tres en el infrarrojo termal. La resolución en el visible es de 500 m y en el infrarrojo es de 1.000 m. El sensor de temperatura HIRS-2 cubre fajas de 2.240 Km, en 20 bandas espectrales, una en el visible y el resto en el IR termal, con resolución de 17.4 Km. El radar pasivo MSU cubre fajas de 2.348 Km, con resolución de 109.3 Km, con cuatro longitudes de onda (0.596, 0.558, 0.546 y 0.518 cm) (Sizemore y Carroll, 1999).

NOAA-15 porta los instrumentos sensores AVHRR-3, HIRS-3, AMSU-A, AMSU-B, SBUV-2, OCI y SRSAT. El radiómetro de alta resolución AVHRR-3 cubre fajas de 2.940 Km en seis bandas espectrales, cinco de las cuales son las mismas de AVHRR-2 (NOAA-14) y una adicional en el infrarrojo medio. El sensor de temperatura HIRS-3 es similar al HIRS-2 (NOAA-14), excepto por ligeros cambios en los rangos espectrales de cinco de sus bandas del infrarrojo termal. El radar de microondas pasivo AMSU-A trabaja con una resolución de 40 Km, en fajas de 2.240 Km de ancho y con 10 longitudes de onda diferentes. AMSU-B registra fajas de 2.240 Km,

pero con resolución de 15 Km y con tres longitudes de onda diferentes (en el rango de 0.16 a 0.33 cm) (Sizemore y Carroll, 1999).

Está previsto el lanzamiento del satélite NOAA-L(16) para diciembre de 1999, del NOAA-M(17) para abril del año 2001 y del NOAA-N(18) para el año 2003. Estos tres satélites tendrán órbitas y sensores con características similares a los de NOAA-15 (Sizemore y Carroll, 1999).

Programa LANDSAT (EE. UU.)

El quinto satélite de este programa, el cual estuvo operando desde marzo de 1984, fue retirado del servicio a comienzos del presente año de 1999. Su sustituto, el LANDSAT-7 fue colocado en órbita el 31 de marzo de 1999 (LANDSAT-6 cayó al mar en 1993, durante el lanzamiento de su cohete portador). LANDSAT-7 conserva la mayor parte de las características de la órbita del anterior, es decir, opera en órbitas cercanamente polares, heliosincronizadas, a una altura nominal de 705 Km. El ancho de la faja de rastreo es de 185 Km.

En este satélite el rastreador multiespectral MSS fue excluido, y el rastreador TM fue sustituido por el rastreador ETM (Enhanced Thematic Mapper = "Mapeador" Temático Mejorado). ETM opera con las mismas siete bandas espectrales de su predecesor: una en el azul, una en el verde, una en el rojo, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el termal. La banda termal de ETM tiene una resolución espacial de 60 m, en comparación con los 120 m que tenía esa banda en TM. El resto de las bandas multiespectrales son grabadas con 30 m de resolución. El otro avance importante en ETM es la inclusión de una banda pancromática (Banda 8) que opera en el rango espectral de 0.5 a 0.9 μm de longitud de onda (verde, rojo e infrarrojo cercano), y tiene una resolución espacial de 15 m (American Society of Photogrammetry, 1997). Esta imagen pancromática en LANDSAT-7 es importante, en primer lugar, porque provee imágenes de muy buena definición de una extensión de 183 x 185 Km y, en segundo lugar, permite mejorar la definición de las imágenes obtenidas con las bandas multiespectrales, a través de una técnica del procesamiento digital que combina ambos tipos de imágenes. Un próximo LANDSAT-8 está planificado tentativamente para el año 2005.

Programa SPOT (Francia)

SPOT-4 fue puesto en servicio en marzo de 1998 en una órbita cercanamente polar, heliosincrónica, de 830 Km de altura. Porta dos instrumentos HRV (High Resolution Visible) que, fundamentalmente, son iguales a los de sus predecesores. Cada instrumento HRV puede cubrir el terreno con visión nadiral y no nadiral (perpendicular a la dirección de la órbita), a través de un arreglo lineal de detectores de tipo CCD (Charge Coupled Device) que opera en modo pancromático y en modo multiespectral. En modo pancromático trabaja con energía electromagnética de 0.51 a 0.73 μm y con 10 m de resolución. En el modo multiespectral opera con resolución de 20 m y en tres bandas espectrales: una en el verde (0.50-0.59 μm), una en el rojo (0.61-0.68 μm) y otra en el infrarrojo cercano (0.79-0.89 μm). El ancho de la faja en SPOT va de 60 Km en la visión nadiral, hasta 80 Km en la visión no nadiral extrema (Lillesand y Kiefer, 1994). La visión nadiral y no nadiral permite obtener pares estereoscópicos para la producción fotogramétrica de mapas a curvas de nivel cada 25 m y modelos digitales del terreno.

En SPOT-4 se incluyó un nuevo sensor, el denominado VEGETATION, el cual, con dos instrumentos, observa fajas de 2.250 Km de ancho cada una, con una resolución espacial de un Km y con cuatro bandas espectrales (azul, rojo, infrarrojo cercano e infrarrojo medio). Fue diseñado especialmente para el monitoreo de la vegetación de grandes áreas (países, continentes, globo terrestre) y para alimentar los modelos de cambios climáticos globales.

SPOT-5 está planificado para ser lanzado a finales del año 2000, con una vida útil programada de cinco años, y tendrá un diseño diferente al de sus predecesores. Seguirá operando en los modos pancromático y multiespectral, aunque el poder de resolución espacial será doblado (píxeles de 5 y 10 m respectivamente). El otro avance radica en el cambio de diseño para la obtención de las imágenes estereoscópicas, que ya no se obtendrán desde órbitas diferentes sino desde una misma, de la manera siguiente: un instrumento HRG (High Resolution Geometric) mirará la faja a cubrir con visión inclinada hacia delante y el otro mirará esa misma faja con visión inclinada hacia atrás. Las dos imágenes de la misma área, tomadas con visión inclinada hacia delante y hacia atrás, permitirán la estereoscopia

(American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997). Este diseño elimina el problema presentado en los anteriores SPOT en los que habiéndose obtenido una imagen del par deseado en un determinado día, por condiciones de nubosidad, no había garantía de obtener la otra imagen del par en los días sucesivos, debiéndose esperar infructuosamente, en algunas áreas tropicales, incluso por varios años. En SPOT-5, al obtenerse una imagen del par, en el mismo momento se obtendrá la otra, en condiciones similares de iluminación.

Programa IRS (India)

India está operando varios sistemas espaciales de percepción remota para evaluación de recursos, de tecnología muy avanzada. Desde 1995 hasta el presente (julio de 1999) ostenta el récord de resolución de 5.8 m para un sensor óptico-electrónico espacial (no fotográfico) con fines civiles.

El satélite IRS-1C fue puesto en servicio en 1995, con vida útil planificada hasta finales del año 2000. Porta tres instrumentos sensores: el sensor pancromático de 5.8 m de resolución, opera con energía electromagnética de 0.5 a 0.75 μm . Tiene visión nadiral y no nadiral (en la dirección transversal a la órbita), ancho de faja de 70 Km y capacidad estereoscópica. El sensor multiespectral LISS-3 trabaja con 4 bandas espectrales (una en el verde, otra en el rojo, otra en el infrarrojo cercano y otra en el infrarrojo medio). La resolución espacial de las tres primeras bandas es de 23.5 m y la de la última es de 70.5 m. El ancho de las fajas es de 142 Km. El tercer sensor es el WiFS, que cubre fajas de 774 Km de ancho, con resolución gruesa de 180 m. Opera con una banda en el rojo y otra en el infrarrojo cercano (EOSAT, 1996).

El satélite IRS-1D fue lanzado en setiembre de 1997, con sensores y características idénticas a las de IRS-1C. Su vida útil programada es de cinco años (hasta el año 2002).

El satélite IRS-P5 o CARTOSAT-1 está planificado para entrar en operación a finales de 1999. Porta el sensor MAPSAT con capacidad de producir imágenes pancromáticas estereoscópicas, con visión hacia delante y hacia atrás de la misma faja de rastreo, con resolución espacial de 2.5 m (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997).

El satélite IRS-P6 será puesto en órbita en el año 2000 y ha sido diseñado fundamentalmente para

evaluación ambiental. Porta dos instrumentos sensores: el sensor multiespectral LISS-4 trabajará con tres bandas espectrales y tamaño de pixel menor de 6 m, y el instrumento multiespectral AWiFS operará con tres bandas (visible e infrarrojo cercano) y 80 m de resolución (Environmental Remote Sensing Center, 1999).

Programa ERS (Unión Europea)

La Agencia Espacial Europea (ESA) colocó en órbita el satélite ERS-1 en 1991, que operó hasta 1996. El satélite ERS-2 ha estado funcionando desde 1995 hasta el presente. ERS-2, al igual que ERS-1, porta varios instrumentos, uno de ellos es un instrumento de microondas activo (AMI), capaz de operar como un radar de visión lateral de apertura sintética (SAR) y como un escaterómetro para medir la velocidad del viento. Opera con energía electromagnética de 5.7 cm de longitud de onda (Banda C), polarización VV, ángulo de incidencia de 23°, resolución espacial de 30 m, abarcando fajas de 100 Km de ancho. También este radar puede medir la dirección y la longitud de las ondas de la superficie oceánica. Como escaterómetro, el instrumento AMI utiliza tres antenas adicionales que envían tres haces de iluminación, uno en la dirección perpendicular a la proyección de la órbita, otro a 45° hacia delante, con respecto al primer haz, y un tercero a 45° hacia atrás con respecto al primer haz, en una faja de 500 Km de ancho (European Space Agency, 1992 ; Duchossois y Zobl, 1995). El satélite ERS-2 porta otros tres instrumentos de importancia para estudios ambientales: un radar altimétrico (RA), un radiómetro avanzado de barrido (AATSR) y un instrumento experimental para el monitoreo global del ozono (GOME). El radar altimétrico RA permite la medición de la elevación de la superficie del mar, la altura de las olas marinas significativas, varios parámetros de las masas de hielo y una estimación de la velocidad del viento a nivel de la superficie del mar. La exactitud de RA en altimetría es de 10 cm. El radiómetro AATSR cubre fajas de 500 Km, con resolución de 0.5 Km, con una banda en el rojo, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y tres en el infrarrojo termal. Estas bandas son combinadas con los datos aportados por un sensor de microondas que opera con dos longitudes de onda para medir la temperatura de la superficie del mar, la temperatura en el tope de las nubes y el contenido

del vapor de agua en la atmósfera. El instrumento GOME cubre fajas de 960 Km de ancho con resolución de 40 Km x 2 Km y 40 Km x 320 Km, utilizando energía ultravioleta, azul, verde y rojo (Canada Centre for Remote Sensing, 1998).

Programa ENVISAT (Unión Europea)

El satélite ENVISAT-1, planificado para ser lanzado a mediados de 1999, es la continuación del programa ERS y será colocado en una órbita cercanamente polar, heliosincronizada, de 787 Km de altura. El programa ENVISAT está orientado primeramente hacia la investigación y portará instrumentos pre-operacionales para el monitoreo y el estudio del medio ambiente. Portará 9 instrumentos sensores, dentro de ellos: un radar avanzado de apertura sintética (ASAR), un radiómetro avanzado de rastreo (AATSR), un espectrómetro de mediana resolución (MERIS), un radar altimétrico avanzado (RA-2), un radiómetro de microondas (MWR), un interferómetro Michelson (MIPAS) y un espectrómetro de absorción para cartografía atmosférica (SCIAMACHY) (Envisat-Team, 1997).

El radar de apertura sintética ASAR constituye una versión avanzada del radar a bordo del ERS-2. Operará con energía electromagnética de 5.6 cm de longitud de onda (Banda C), polarización HH y VV y en dos modalidades diferentes: con fajas de 400 Km de ancho y resolución de 100 m y con fajas de 100 Km de ancho y resolución de 30 m. Las imágenes de este radar servirán para la evaluación de las áreas continentales (geomorfología, rugosidad de la superficie, humedad del suelo; humedad, geometría y biomasa de la vegetación), evaluación de los océanos (topografía de la superficie y características de las olas) y de las masas de hielo (dinámica y diseminación de los hielos marinos, propiedades de las acumulaciones de nieve, etc.). El radiómetro avanzado AATSR emplea un canal en infrarrojo medio y tres en termal para el monitoreo oceánico, y canales en el verde, rojo e infrarrojo medio para el monitoreo de las áreas continentales. Tiene visión nadiral y cubre fajas de 500 Km de ancho. La resolución en el visible es de 0.5 Km y en el infrarrojo de 1 Km. Será utilizado para estudios atmosféricos (detección de nubes, procesos de radiación), estudios de las áreas continentales (índices de vegetación, contenido de humedad del follaje), evaluación de los océanos (temperatura de la superficie del mar,

productividad biológica, variabilidad física) y evaluación de las coberturas de hielo y nieve. El espectrómetro de mediana resolución MERIS medirá la radiancia en el rango 0.4-1.05 μm de longitud de onda, en bandas espectrales programables desde tierra de 2.5 a 20 nanómetros (nm) de resolución espectral. Por vía telecomando es posible seleccionar hasta un máximo de 15 bandas individuales. MERIS observará fajas de 1.450 Km de ancho, proporcionando cobertura global cada 2-3 días. La resolución en el nadir será de 300 m y 1.200 m. Los datos de este espectrómetro serán utilizados para estudios atmosféricos (nubosidad, contenido de vapor de agua, tipo y concentración de aerosoles), evaluación de las coberturas del terreno y estudios oceánicos (concentración de clorofila en la parte superior del océano, erosión costera, transporte y deposición de sedimentos). El radar altimétrico RA-2 tendrá una resolución altimétrica de menos de 25 cm en el océano (altura de olas) y de menos de 4.5 cm en las tierras y los hielos. Esta información será utilizada para la cartografía planialtimétrica del terreno, la determinación de la forma del geoide en el mar (nivel medio del mar), las corrientes de circulación oceánica, la altura de las olas y la velocidad del viento en el océano. Así mismo, para el estudio de la extensión, la dinámica y el balance de las masas de hielo. El interferómetro MIPAS y el espectrómetro de absorción SCIAMACHY servirán para la química atmosférica (concentración de H_2O , O_3 , CH_4 , CO , N_2O , F_{11} , F_{12} , F_{22} , etc.), presión y temperatura vía O_2 y CO_2 , concentración de aerosoles, etc. (Envisat-Team, 1997).

Programa RADARSAT (Canadá)

Programa del gobierno canadiense para la explotación comercial de las imágenes tomadas por radares desde el espacio. RADARSAT-1 fue colocado en servicio en noviembre de 1995 en una órbita de 798 Km, cercanamente polar, heliosincronizada. RADARSAT-1 porta un radar de apertura sintética (SAR) que trabaja con energía electromagnética de 5.6 cm de longitud de onda (Banda C), polarización HH, y observa el terreno con seis diferentes modos de operación: 1) en el modo estándar obtiene fajas de 100 Km de ancho y resolución de 28 m x 25 m, 2) en el modo de faja amplia abarca 150 Km de ancho y resolución de 28 m x 35 m, 3) en el modo de resolución fina las fajas son de 45 Km de ancho y la resolución

es de 10 m x 9 m, 4) en el modo de cobertura extendida la faja es de 75 Km y la resolución de 20 m x 28 m, 5) en el modo angosto de ScanSAR obtiene fajas de 300 Km de ancho, con resolución de 50 m x 50 m, y 6) en el modo amplio de ScanSAR obtiene fajas de 500 Km de ancho y resolución de 100 m x 100 m (RADARSAT International, 1994).

Un nuevo satélite (RADARSAT-2) está programado para ser lanzado en el año 2001, con una órbita y un sistema de radar similares a los de RADARSAT-1, pero con mayores capacidades. Trabjará con 12 modos diferentes de operación en cuanto a ángulos de incidencia, ancho de faja y resolución espacial. Podrá tomar fajas de 10 a 500 Km de ancho y la resolución de las imágenes irá de 3 m x 3 m hasta 100 m x 100 m. La frecuencia de pasada será de 24 días, pero la resolución temporal será de 2-3 días para el ecuador. Un satélite RADARSAT-3 está propuesto para el año 2004 (Canada Centre for Remote Sensing, 1998).

Programa SPIN (Rusia)

SPIN es un programa comercial ruso para la obtención de imágenes espaciales, con sistemas fotográficos utilizados con fines militares durante la "guerra fría". Estas fotografías han sido promocionadas comercialmente desde 1993. El programa utiliza satélites de la serie Cosmos que son colocados en órbitas no polares (65° de inclinación) y a 220 Km de altura. Portan dos sistemas fotográficos: el sistema KVR-1000 y el sistema TK-350. Las fotografías son vendidas en película negativa, película positiva, en copias en papel y en medio digital.

El sistema KVR-1000 consiste en una cámara de 1000 mm de distancia focal, que proporciona fotografías pancromáticas de 2 m de resolución, a escala media 1:220.000. El formato de esta cámara es de 18 cm x 18 cm, que corresponde a un área del terreno de 40 Km x 40 Km. Estas imágenes pueden ser ampliadas hasta 1:10.000 sin mayor pérdida de detalle. En formato digital el tamaño del pixel es de 1.56 m. Se cuenta con imágenes en archivo desde 1984 (Sklaris, 1999).

La cámara TK-350 es una cámara desarrollada para generar información cartográfica planialtimétrica de exactitud. Tiene 350 mm de distancia focal y resolución de 10 m a la escala típica de 1:660.000. El formato es de 30 cm x 45 cm, que abarca 200 Km x 300 Km. Estas imágenes pueden ser

ampliadas hasta la escala 1:50.000 sin pérdida significativa de calidad. Produce fotografías pancromáticas estereoscópicas con 60 a 80 % de recubrimiento longitudinal. Con 80 % de solape se obtiene visión estereoscópica con geometría verdadera (sin exageración vertical). Estas imágenes permiten elaborar mapas a curvas de nivel y/o modelos digitales del terreno. Los promotores indican que con ellas es posible obtener una exactitud de 5 m en altura (RMS), con puntos de control terrestre. El archivo de imágenes de la cámara TK-350 se remonta al año 1981 (Sklaris, 1999).

El programa SPIN no ha sido diseñado para operar continuamente sobre todo el planeta, ni tampoco tiene frecuencia repetitiva preestablecida. Las tomas sobre nuevas áreas se hacen bajo contrato, con varios meses de anticipación. El programa SPIN-2 actual continuará operando hasta el 2001.

Programa ALMAZ (Rusia)

El lanzamiento del satélite ALMAZ-1B está previsto para 1999 y tendrá una vida útil programada de tres años. Será colocado en una órbita no polar de 405 Km de altura. ALMAZ-1 fue un satélite que operó desde abril de 1991 hasta octubre de 1992 (Lillesand y Kiefer, 1994), y portó uno de los sistemas de radar más eficientes desarrollados hasta el momento para el espacio. ALMAZ-1B, además de un complejo de cuatro radares para la producción de imágenes, alojará cinco sensores óptico-electrónicos y un lidar (instrumento que mide la respuesta de la superficie terrestre a un rayo láser de corta duración)

Los cuatro radares están integrados electrónicamente. Uno de ellos (SLR-3) es de apertura real, el cual usa una antena angosta instalada en el lado izquierdo del satélite, que transmite energía electromagnética de 3.49 cm de longitud de onda en un haz muy ancho, de 450 Km en el terreno, y produce una resolución acimutal de 1200 a 2000 m. Los otros tres radares son de apertura sintética (SAR), denominados SAR-3, SAR-10 y SAR-70, que trabajan con energía electromagnética de 3.49, 9.58 y 70 cm respectivamente y con diferentes modalidades de operación. Estos tres radares trabajarán con un sistema de antenas, colocadas a ambos lados del satélite, las cuales, con modalidades diferentes de operación, producirán anchos de faja y resoluciones diferentes.

SAR-3 transmitirá un haz angosto de microondas polarizadas verticalmente. Produce una faja de 20-30 Km de ancho y resolución en acimut de 5-7 m y en rango (en la dirección de propagación de la iluminación) de 4-7 m. El radar de 9.58 cm (SAR-10) puede operar con resolución alta, de 5-7 m en acimut y fajas de 20-30 Km de ancho; con resolución media, de 15 m en acimut y 4-7 m en la dirección del rango y fajas de 60-70 Km de ancho; y con resolución baja, cubriendo fajas de 120-170 Km de ancho y resolución de 30 m en acimut y 22-40 m en el rango. El radar de 70 cm (SAR-70) opera con una de las antenas instaladas en el lado derecho del satélite y toma fajas de 120-170 Km de ancho y resolución de 30 m en acimut y 22-40 m en rango. Este radar puede transmitir energía polarizada horizontal o verticalmente y puede recibir las respuestas del terreno polarizadas horizontal, verticalmente o con ambas polarizaciones simultáneamente.

Los cinco sensores óptico-electrónicos son los siguientes: un instrumento de barrido de empuje, basado en un arreglo lineal de detectores tipo CCD, denominado SELVA; dos rastreadores multizonales (MSU-E); un rastreador multiespectral (MSU-SK) y un espectro-radiómetro para el monitoreo oceánico (SROSM).

El instrumento SELVA proveerá imágenes pancromáticas estereoscópicas, con visión hacia delante y hacia atrás, así como imágenes multiespectrales en el visible e infrarrojo cercano, con capacidad para la cartografía topográfica y aplicaciones geodésicas.

ALMAZ-1B portará dos rastreadores MSU-E, uno de los cuales observará el terreno por el lado izquierdo del satélite y el otro por el lado derecho, con inclinación de 20° en la dirección perpendicular a la órbita, de manera que las fajas cubiertas coincidan lo más cerca posible con las fajas tomadas por los radares SAR. Los dos instrumentos MSU-E pueden ser operados de manera independiente o simultáneamente con los radares SAR.

El rastreador multiespectral MSU-SK es un instrumento de amplio campo de visión, resolución media, que trabaja con cinco bandas espectrales, una en el verde, otra en el rojo, dos en el infrarrojo cercano y una en el infrarrojo termal (10.4-12.6 μm).

El espectro-radiómetro para el monitoreo oceánico (SROSM) mide la radiación propia emitida, y la solar reflejada por la superficie del océano en once bandas espectrales, que cubren el visible, el

infrarrojo cercano y el infrarrojo termal (de 0.42 a 0.88 y de 3.6 a 12.5 μm).

Programa EOS (EE.UU.)

El programa Sistema de Observación de la Tierra (Earth Observing System: EOS) es la parte central de la **Misión al Planeta Tierra**, desarrollado por la Administración Nacional Aeroespacial de los Estados Unidos (NASA), dentro del gran Programa Internacional de Investigación sobre Cambios Globales. EOS está diseñado para funcionar en una serie de satélites individuales de tamaño mediano y pequeño, a ser lanzados en las próximas dos décadas (Price, 1994). Los cinco primeros satélites son: AM-1 (Ante Meridian), COLOR (color oceánico), AERO-1 (aerosoles de la atmósfera), PM-1 (Post Meridian; nubes, nieve, hielo, temperatura, productividad de la tierra y del océano), ALT (circulación de las corrientes oceánicas, balance de masas de las capas de hielo) y CHEM (química atmosférica) (Lillesand y Kiefer, 1994).

El lanzamiento del primer satélite EOS AM-1 está programado para finales de julio de 1999 (Jonsson, 1999). Portará cinco instrumentos: 1) Un espectroradiómetro de imágenes de moderada resolución (MODIS), el cual opera con 36 bandas espectrales, con resolución espacial de 250 m a 1 Km, útiles para múltiples aplicaciones en océanos y área continentales, cobertura y propiedades de las nubes; 2) Un radiómetro espacial avanzado para medir la emisión térmica y la reflexión (ASTER), que consiste en tres rastreadores que operan en el visible e infrarrojo cercano, medio y termal, con 15-30 m de resolución y capacidad estereoscópica a lo largo de la faja rastreada (delante/atrás). Será útil en estudios de vegetación, tipos de rocas, volcanes y nubes; 3) Un espectroradiómetro de ángulo múltiple (MISR), consistente en varios arreglos lineales de detectores del tipo CCD, que registran la superficie terrestre en cuatro bandas y con nueve ángulos de visión separados. Provee visiones en múltiples ángulos de elementos de la superficie terrestre, datos sobre nubes y aerosoles de la atmósfera; 4) Un sistema para la medición de la energía radiante de las nubes y la tierra (CERES), que consiste en dos rastreadores de banda amplia, para medir el flujo radiante en el tope de la atmósfera y monitorear el balance de radiación total de la tierra; y 5) Un rastreador de tres canales en el infrarrojo cercano

(MOPITT), para medir el monóxido de carbono y el metano, a través de perfiles de la atmósfera (Lillesand y Kiefer, 1994).

Programa CBERS (China-Brasil)

Proyecto conjunto entre los gobiernos de China y Brasil para desarrollar dos satélites de percepción remota de cobertura global, con una vida útil de dos años para cada uno, que serán colocados en órbitas cercanamente polares, heliosincronizadas, y altura de 778 Km. El lanzamiento de CBERS-1 está programado para 1999 y el de CBERS-2 para el año 2000. Estos dos satélites portarán tres instrumentos sensores: un sensor de visión amplia (WFI), un instrumento CCD de alta resolución y un rastreador de infrarrojo (IR-MSS) (INPE, 1996).

El sensor WFI tiene capacidad de observar una faja de 890 Km de ancho para producir una visión sinóptica de todo el globo terrestre cada cinco días. Su resolución espacial es de 260 m y opera con dos bandas espectrales, en el rojo y en el infrarrojo cercano. El instrumento CCD abarca franjas de 129 Km de ancho, tiene una banda pancromática de 0.51 a 0.73 μm de longitud de onda y cuatro bandas adicionales: en el azul, en el verde, en el rojo y en el infrarrojo cercano. La resolución espacial es de 20 m para todas las bandas, incluyendo la pancromática. La frecuencia de pasada del satélite es de 26 días, sin embargo, este sensor puede registrar la misma área cada tres días usando la visión inclinada, cuya máxima inclinación es de aproximadamente 32°. El rastreador IR-MSS también toma fajas de 120 Km de ancho, pero sólo con visión nadiral y resolución temporal de 26 días. Opera con una banda pancromática de 0.50 a 1.10 μm y dos bandas multiespectrales, una en el infrarrojo medio y otra en el termal. La resolución espacial es de 80 m, excepto para la banda termal que es de 160 m (INPE, 1996).

Está en estudio el desarrollo de dos nuevos satélites (CBERS-3 y CBERS-4), con mejoras significativas en la resolución de los instrumentos.

Programa QUICKBIRD (EE.UU.)

Este es uno de los nuevos programas de percepción remota espacial de naturaleza netamente comercial. Es propiedad de Earth Watch, empresa de los EE. UU. formada en 1995 para explotar el mercado de

imágenes de alta resolución para fines civiles. El programa de inicio de Earth Watch fue el Early Bird, cuyo primer satélite (Earl Bird-1) fue lanzado en diciembre de 1997 con sensores de resolución de 3 y 15 m. Al poco tiempo de su lanzamiento el centro de control de Earth Watch perdió la comunicación con el satélite. La compañía continuó exclusivamente con el programa Quick Bird y el lanzamiento del primer satélite (Quick Bird-1) está programado para 1999, con una vida útil de cinco años. Este programa está diseñado para obtener imágenes pancromáticas y multiespectrales de muy alta resolución, de 1 y 4 m respectivamente, y capacidad estereoscópica, proporcionada tanto por visión inclinada hacia delante y hacia atrás, como hacia la derecha y hacia la izquierda de la faja de rastreo. El ancho de la faja es de 22 Km. El sensor pancromático operará con luz de 0.45 a 0.90 μm y el sensor multiespectral con cuatro bandas, en el azul, el verde, el rojo y el infrarrojo cercano. Ambos sensores son del tipo arreglo lineal de detectores CCD (pushbroom linear array). Estas características le dan al sistema excelentes capacidades para la cartografía detallada, tanto topográfica como temática. La altura de la órbita será de 600 Km. QuickBird-1 tendrá una órbita no polar, con 66 grados de inclinación (no heliosincronizada), que le da la habilidad de observar sitios de la superficie terrestre en diferentes horas del día, con diferentes condiciones de iluminación (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 1997). Por el contrario, Quick Bird-2, que será lanzado en el año 2000, tendrá una órbita cercanamente polar, heliosincronizada, que le permitirá la obtención de imágenes con condiciones similares de iluminación. Las demás características de los sensores serán similares a las de Quick Bird-1.

Programa ORB VIEW (EE.UU.)

Programa comercial de la empresa estadounidense ORBIMAGE que opera los satélites meteorológicos Orb View-1 desde 1995 y Orb View-2 desde 1997. Estos dos satélites trabajan con resolución espacial de 10 Km y 1.1 Km respectivamente y tienen una vida útil programada de cinco años.

ORBIMAGE lanzará en los próximos dos años dos satélites de alta resolución, para la evaluación detallada de áreas del terreno. Ambos han sido

proyectados con una vida útil de cinco años. Orb View-3 será lanzado en 1999, portará instrumentos sensores con capacidad de obtener imágenes pancromáticas de 1 m de resolución, e imágenes multiespectrales de 4 m de resolución y cuatro bandas espectrales (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano). El ancho de la faja es de sólo 8 Km. La altura de la órbita será de 470 Km y los sensores tendrán capacidad de visión a la derecha y a la izquierda de la órbita, hasta un máximo de 45° de inclinación, lo cual le permite una resolución temporal menor de 3 días. Los instrumentos de Orb View-3 han sido diseñados para observar hacia delante y hacia atrás, obteniéndose de este modo dos fajas de imágenes para visión estereoscópica.

Orb View-4 será puesto en servicio en el año 2000 y tendrá las mismas características y capacidades pancromática y multiespectral que Orb View-3. Adicionalmente, tendrá capacidad de tomar imágenes hiperespectrales en 200 bandas, en el rango de 0.45 a 2.5 μm de longitud de onda, resolución espacial de 8 m y ancho de faja de 5 Km. La capacidad hiperespectral será utilizada en la identificación de tipos de materiales y componentes químicos.

Programa IKONOS (EE.UU.)

Programa de percepción remota de alta resolución, de las empresas comerciales estadounidenses Space Imaging y Eastman Kodak Company. IKONOS-1 fue lanzado a finales de abril de 1999, pero desafortunadamente al día siguiente fue declarado perdido. Un segundo satélite (IKONOS-2) será lanzado en el año 2000, con una vida útil programada hasta el 2003. Será colocado en una órbita de 680 Km y portará la cámara digital Space Imaging, fabricada por Kodak, la cual consiste en un telescopio liviano capaz de producir imágenes pancromáticas de 1 m de resolución, e imágenes multiespectrales en 4 bandas (azul, verde, rojo e infrarrojo cercano), con 4 m de resolución. La cámara digital de IKONOS-2 tendrá la capacidad de tomar imágenes con visión nadiral y con visión inclinada, hacia delante y hacia atrás y en la dirección perpendicular a la órbita. IKONOS-2 tendrá la posibilidad de retomar una determinada área cada tres días. Además, puede ser programado en tiempo casi real, lo que permitirá la programación de nuevas adquisiciones de imágenes, de acuerdo al estado actual del tiempo.

Programa WIS-EROS (Israel-EE.UU.)

West Indian Space (WIS) es una compañía comercial israelí-estadounidense que lleva a cabo el programa EROS (Earth Remote Observation System), cuya finalidad es poner en funcionamiento una constelación de seis satélites livianos, con instrumentos de percepción remota de alta resolución. En los años 1999 y 2000 serán lanzados dos satélites EROS-A, y el primer satélite EROS-B será lanzado en el año 2001. A partir del año 2004 la constelación EROS estará operando a completa capacidad, con resolución temporal diaria para cualquier punto de la Tierra. La compañía WIS está adelantando una campaña comercial basada en el suministro de imágenes de alta resolución, precio bajo y servicios para tres sectores importantes: 1) el sector militar y manejo de emergencias, 2) el sector de ingeniería, infraestructura y cartografía y 3) el sector agrícola.

Los satélites EROS-A serán colocados en órbitas no polares, de 480 Km de altura y de aproximadamente 50° de inclinación, para maximizar la resolución temporal. Portarán solamente cámaras pancromáticas, basadas en arreglos lineales de detectores (CCD), con resolución espacial de 1.8 m, utilizando la técnica de barrido de empuje. Las fajas tendrán un ancho de 12.5 Km. Los satélites EROS-B serán colocados en órbitas cercanamente polares, heliosincronizadas, a una altura de 600 Km y portarán cámaras pancromáticas de tipo CCD, similares a las de EROS-A, pero con resolución espacial de 0.82 m y fajas de 16 Km de ancho.

El programa EROS ha sido diseñado montando la cámara de percepción remota en el mismo "bus" del satélite. De esta manera la cámara es orientada en cualquier dirección dentro de los 45° de inclinación, orientando el eje nadiral del satélite hacia el área a ser observada. Esta visión inclinada permite obtener imágenes estereoscópicas y aumentar la resolución temporal del sistema.

Programa ALOS (Japón)

NASDA, la Agencia Espacial de Japón, lleva adelante el programa ALOS (Advanced Land Observing Satellite), cuyo objetivo es poner en operación, a principios del año 2003, un satélite de observación de la tierra, con capacidad cartográfica y de monitoreo ambiental y de emergencias. Este satélite será colocado en una órbita cercanamente polar,

heliosincronizada, y de 700 Km de altura (Osawa et al., 1995).

El satélite ALOS portará un radiómetro que opera en el visible y en el infrarrojo cercano (AVNIR-2: Advanced Visible and Near Infrared Radiometer-2), el cual consta de dos partes: una parte pancromática y una parte multiespectral. El componente pancromático consiste en tres telescopios que observan simultáneamente dentro de una faja tres líneas diferentes del terreno, perpendiculares a la dirección de la faja, con el propósito de obtener imágenes estereoscópicas desde una misma órbita, usando el concepto de visión hacia delante y hacia atrás. Para obtener buena exactitud en altura en la cartografía planialtimétrica, los telescopios dirigidos hacia delante y hacia atrás tendrán una inclinación de $\pm 24^\circ$, a partir del nadir, lo cual corresponde con una relación B/H=1 (para la altitud del satélite, que será de 700 Km). Un tercer telescopio mira nadiralmente. La resolución espacial en modo pancromático será de 2.5 m y el ancho de la faja será de 35 Km. El componente multiespectral tendrá un telescopio propio, con visión nadiral y visión inclinada, en la dirección perpendicular a la de la órbita, dentro de 40° a la izquierda y a la derecha, lo cual permitirá aumentar la resolución temporal. Esta parte multiespectral registrará en cuatro bandas espectrales, en azul, verde, rojo y en infrarrojo cercano, con una resolución espacial de 10 m y ancho de faja de 70 Km. Con estas características las imágenes AVNIR-2 (pancromáticas y multiespectrales) permitirán preparar mapas planialtimétricos y temáticos, a escala 1:25.000 (Osawa et al., 1995).

El segundo sensor a bordo de ALOS será un radar de apertura sintética (SAR), denominado PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar), que operará en la banda L (25 cm), polarización HH y VV, ángulos de incidencia de 20 a 55° y dos tipos de resolución: en el modo fino trabajará con 10 m de resolución y fajas de 70 Km de ancho y en el modo grueso, con 100 m de resolución y ancho de faja de 250 Km (Osawa et al., 1995). ALOS-A1, programado para ser lanzado en el año 2004, tendrá órbita y sensores similares a los de ALOS.

Programa ARIES (Australia)

El objetivo de este programa comercial australiano es desarrollar y operar un satélite para la evaluación

de los recursos del globo, usando la más reciente tecnología hiperespectral. Su principal mercado estará en el sector de la exploración minera y, en segundo lugar, en el monitoreo y manejo ambiental. ARIES-1 iniciará su operación en el año 2000, con una vida útil programada de cinco años. Su órbita cercanamente polar, heliosincronizada, tendrá un altura de 500 Km (ARIES-1 Project Team, 1997).

Los sensores de ARIES-1 obtendrán imágenes pancromáticas de 10 m de resolución espacial, e imágenes hiperespectrales en 96 bandas, con 30 m de resolución espacial en los siguientes rangos espectrales: a) de 0.40 a 1.05 μm , en bandas de 20 nanómetros (nm) de amplitud, b) de 1.05 a 2.0 μm , en bandas de 32 nm de amplitud, y c) de 2.0 a 2.5 μm , en bandas de 16 nm de amplitud. Adicionalmente, se obtendrán dos series de tres bandas de 16 nm de amplitud, centradas en 0.94 y 1.14 μm , para correcciones atmosféricas (ARIES-1 Project Team, 1997). ARIES-1 tendrá la capacidad de observar nadiralmente y con visión inclinada de $\pm 30^\circ$, perpendicular a la dirección de la órbita. Con estas visiones la resolución temporal (revisita) será de siete días. Las fajas obtenidas nadiralmente tendrán no menos de 15 Km de ancho (ARIES-1 Project Team, 1997).

IMPLICACIONES DE LAS IMÁGENES EMERGENTES PARA LA EVALUACIÓN AMBIENTAL

Nivel de detalle

Las imágenes tomadas desde plataformas espaciales desde la década del 60 hasta mediados de los 80 eran de amplia cobertura y nivel de detalle muy general (gran visión). Aunque en el presente la "agudeza visual" de los sistemas de percepción remota ha crecido a límites sorprendentes, persiste la demanda de imágenes de visión amplia y nivel de detalle general. Esta demanda está dada por la necesidad que ha surgido en las últimas décadas de evaluar las condiciones ambientales de una manera global, la cual determina la resolución espacial y temporal de los datos que se requieren para este propósito. Resultan apropiadas en este caso imágenes multitemporales muy generales. Por ejemplo, los modelos utilizados para la evaluación de los cambios

climáticos globales requieren mapas de cobertura vegetal del planeta, con frecuencia semanal a mensual. Para ello se han utilizado exitosamente por largo tiempo imágenes de los satélites meteorológicos NOAA, con resolución espacial de 0.5 a 4 Km, a partir de las cuales se preparan los mapas de vegetación utilizando la técnica de procesamiento digital conocida como *índices de vegetación* (Lillesand y Kiefer, 1994).

Por otra parte, el enorme desarrollo tecnológico ocurrido durante las últimas décadas ha logrado producir sensores espaciales con un metro de resolución y hasta dos centenares de bandas espectrales (imágenes hiperespectrales). Imágenes con esta resolución espacial permiten estudios muy detallados de planificación urbana, catastro rural y urbano, planificación vial y planificación agrícola. La condición hiperespectral hace posible evaluaciones muy detalladas de los diferentes ambientes del planeta (tierras, océanos, hielos y atmósfera), hasta el nivel de la composición química de los materiales y elementos constitutivos, utilizando técnicas homólogas a las que se emplean en el análisis espectral de sustancias químicas y en el análisis espectral de planetas y estrellas.

Dentro de estos dos extremos, estudios globales con imágenes con resolución en el orden del Km y estudios del detalle urbano con imágenes de resolución en el orden del metro, se plantea una variada gama de necesidades intermedias. Los usuarios de estos tiempos cuentan ya con una amplia oferta de productos obtenidos desde el espacio (Cuadro 2), para satisfacer tales requerimientos.

Naturaleza del estudio

Como puede apreciarse en la información antes presentada de los programas de percepción remota, las plataformas espaciales portan gran diversidad de instrumentos, con o sin la capacidad de generar imágenes. Radars altimétricos con resolución dentro del decímetro en la medición de alturas, radares escaterómetros para medir la velocidad del viento a nivel del mar, sondeadores de temperatura a nivel del mar, del tope de las nubes y de perfiles atmosféricos, instrumentos para medir el contenido de vapor de agua, polutantes y componentes químicos en la atmósfera, sensores para la determinación del contenido de clorofila de los océanos; cámaras fotográficas, rastreadores

CUADRO 2. Satélites de percepción remota en operación actualmente o en el futuro próximo.

PROGRAMA/ SATÉLITE	PAÍS	AÑO LAN- ZAM.	NAT. PROG.	ALT. ORB (KM)	SENSOR	No. BAN- DAS	TIPO ENERGÍA ELECTROMAG.	RESOL. ESPAC. (m)	TIPO VISIÓN	VISIÓN ESTE- REA	FREC. PASAD (DÍAS)	RESOL. TEMP. (DÍAS)	ANCHO FAJA (KM)
NOAA-14	EE.UU.	1995	Gob.	850	AVHRR-2	5M	R+IRc+IRt	500, 1000	N	No	9	<1	2.600
NOAA-15	EE.UU.	1998	Gob.	850	AVHRR-3	6M	R+IRc+IRt	500, 1000	N	No	9	<1	2.940
NOAA-1(16)	EE.UU.	1999	Gob.	850	Sensores similares a los de NOAA-15								
LANDSAT-7	EE.UU.	1999	Gob-Com.	705	ETM	1P	V+IRc	15	N	Z T	16	16	185
						7M	A+V+R+IRc+IRm+IRt	30, 60(t)	N	Z T	16	16	185
SPOT-4	FRANCIA	1998	Gob-Com.	830	2HRV	1P	V+R	10	N D/I	D/I	26	5 (Tróp.)	2x60-80
						3M	V+R+IRc	20	N D/I	D/I	26	5 (Tróp.)	2x60-80
						4M	2VEGET.	1.000	N	No	26	1-2	2x250
SPOT-5	FRANCIA	2002	Gob-Com.	830	2HRG	1P	V+R	2.5-5	N D/I D/A	D/A	26	5 (Tróp.)	2x60-80
						4M	V+R+IRc+IRm	10 y 20	N D/I D/A	D/A	26	5 (Tróp.)	2x60-80
						4M	2VEGET.	1.000	N D/I	No	26	1-2	2x250
IRS-P2	INDIA	1994	Gob.	817	LISS-2	4M	A+V+R+IRc	36	N	No	22	22	74
IRS-1C	INDIA	1995	Gob.	817	PAN	1P	V+R	5.8	N D/I	D/I	24	5	74
						4M	LISS-3	25 y 70	N	No	24	24	142
						2M	WiFS	180	N	No	24	5	774
IRS-1D	INDIA	1997	Gob.	904	PAN	1P	V+R	5.8	N D/I	D/I	24	5	74
						4M	LISS-3	25 y 70	N	No	24	24	142
						2M	WiFS	70	N D/I	No	24	5	774
IRS-P5 CARTOSAT-1	INDIA	1999	Gob.	904	MAPSAT	1P	V+R	2.5	N D/I D/A	D/A	296	5	30
IRS-P6	INDIA	2001	Gob.	904	LISS-3	4M	V+R+IRc+IRm	23	N	No	24	24	140
						3M	LISS-4	<6	N D/I	D/I	24	5	25
						3M	AWiFS	80	N D/I	No	24	5	1400
CARTOSAT-2	INDIA	2003	Gob.	904	MAPSAT	1P	V+R	<1	N D/I D/A	D/A	296	5	10
ERS-2	U. EUROP.	1995	Gob-Com.	787	SAR	1SAR	5.7 cm (Banda C), VV	30	Lateral	Lateral			100
ENVISAT-1	U. EUROP.	1999	Gob.	787	ASAR	1SAR	(Banda C), HH, VV	30, 100	Lateral	Lateral			100
RADARSAT-1	CANADÁ	1995	Gob-Com.	798	SAR	1SAR	5.3 cm (Banda C), HH	10 a 100	Lateral D	Lateral	24	6	45-500
RADARSAT-2	CANADÁ	2001	Gob-Com.	798	SAR	1SAR	5.3 cm (Banda C), HH	3 a 100	Lateral D	Lateral	24	2-3	10-500
EOS AM-1	EE.UU.	1999	Gob.	705	ASTER	14M	V+R+IRc+IRm+IRt	15-30 y 90	N D/A	D/A	49	5	60
						36M	MODIS	250-1000	N	No	49	2	2330
QUICKBIRD-1	EE.UU.	1999	Com.	600		1P	V+R+IRc	1	N D/I D/A	D/A	148	2	20
						4M	A+V+R+IRc	4	N D/I D/A	D/A	148	2	20
QUICKBIRD-2	EE.UU.	2000	Com.	600		1P	V+R+IRc	1	N D/I D/A	D/A	148	2	20
						4M	A+V+R+IRc	4	N D/I D/A	D/A	148	2	20
IKONOS-2	EE.UU.	2000	Com.	680	SIS	1P	V+R	1	N D/I D/A	D/A	247	2	12
						4M	A+V+R+IRc	4	N D/I D/A	D/A	247	2	12

Continuación Cuadro 2

PROGRAMA/ SATELITE	PAIS	AÑO LAN- ZAM.	NAT. PROG.	ALT. ORB (KM)	SENSOR	No. BAN- DAS	TIPO ENERGIA ELECTROMAG.	RESOL. ESPAC. (m)	TIPO VISION	VISION ESTE- REA	FREC. PASAD (DIAS)	RESOL. TEMP. (DIAS)	ANCHO FAJA (KM)
ORBVIEW-3	EE.UU.	1999	Com.	470		1P	V+R+IRc	1	N D/I D/A	D/A	370-740	<3	8
						4M	A+V+R+IRc	4	N D/I D/A	D/A	370-740	<3	8
ORBVIEW-4	EE.UU.	2000	Com.	470		1P	V+R+IRc	1	N D/I D/A	D/A	370-740	<3	8
						4M	A+V+R+IRc	4	N D/I D/A	D/A	370-740	<3	8
						20011	V+IRc+IRm	8	N D/I	No	370-740	<3	5
EROS-A(1)	ISRAEL-EU	1999	Com.	480	CCD	1P	V+R	1.8	N C/D	D/A	7	1	12.5
EROS-A(2)	ISRAEL-EU	2000	Com.	480	CCD	1P	V+R	1.8	N C/D	D/A	7	1	12.5
EROS-B(1)	ISRAEL-EU	2001	Com.	600	CCD	1P	V+R	0.82	N C/D	D/A	7	1	12.5
SPIN-2	RUSIA	1996	Gob.	220	KVR1000	1P	V+R	2	N D/A	D/A	Variab.	Variable	40
						1P	V+R	10	N D/A	D/A	Variab.	Variable	200
ALMAZ.1B	RUSIA	1999	Gob.	397	1 SLR	1SLR	3.49 cm (Banda X)	1200, 2000	Lateral	Lateral			450
						3 SAR	3.49, 9.58 y 70 cm	5-40	Lateral	Lateral			20-170
						SCANNER		2.5	N D/A	D/A			20-170
						4M		4 y 10	N D/A	D/A			20-170
ALMAZ.1C	RUSIA	2001	Gob.	397					Sensores similares a los de ALMAZ.1B				
ALMAZ.2	RUSIA	2004	Gob.	397					Sensores similares a los de ALMAZ.1B				
RESOURCE 21 A, B, C y D	EE.UU.	2000- 2001	Com.	743		5M	A+V+R+IRc+IRm	10 y 20			4	4	200
CBERS-1	CHINA- BRASIL	1999	Gob.	778	WFI Cam. CCD	2M	R+IRc	260	N D/I	No	26	3-5	890
						1P	V+R	20	N D/I	?	26	3	120
						4M	A+V+R+IRc	20	N	?	26	3	120
						1P	V+IRc	80	N	No	26	26	120
						2M	IRm+IRI	80 y 160	N	No	26	26	120
CBERS-2	CHINA-BRA	2000	Gob.	778					Sensores similares a los de CBERS-1				
ALOS	JAPON	2002	Gob.	700	AVNIR-2	1P	V+R	2.5	N D/I D/A	D/A	45-90	2	35
						4M	A+V+R+IRc	10	N D/I D/A	D/A	45-90	2	70
						1SAR	25 cm (B. L) HI, VV	10 y 100	Lateral	D/I			70 y 250
ALOS-A1	JAPON	2004	Gob.	700	AVNIR-3	1P	V+R	2.5	N D/I D/A	D/A	45-90	2	35
						4M	A+V+R+IRc	10	N D/I	D/A	45-90	2	70
						1SAR	25 cm (B. L) HI, VV	10	Lateral	D/I			70
ARIES	AUSTRAL.,	2000	Com.	500	ARIES-1	1P	V+R	12	N D/I	No		7	15
						96H	A+V+R+IRc+IRm	12 y 30	N D/I	No		7	15

Abreviaturas: P: pancromático; M: multispectral; H: hiperspectral; LAR: radar de apertura real; SAR: radar de apertura real; A: azul; V: verde; R: rojo; IRc: infrarrojo cercano; IRm: infrarrojo medio; IRT: infrarrojo termal; N: nadiral; NN: no nadiral; D/I: derecha/izq.; D/A: delante/detrás; C/D: cualquier/dirección; Z/I: zona tropical; HI: polarización horizontal-horizontal; VV: polarización vertical-vertical.

óptico-electrónicos y radares de visión lateral para la evaluación de las características y condiciones de los mares, océanos y áreas continentales.

Las imágenes espaciales del cruce del siglo (pancromáticas, multiespectrales, hiperespectrales, monoscópicas y estereoscópicas) permiten la preparación de los documentos cartográficos más útiles para la evaluación de las áreas continentales. Mapas, ortoimágenes y ortofotomapas, planimétricos y planialtimétricos, así como documentos temáticos de los variados ambientes del globo y en diversas disciplinas son generados con las imágenes espaciales con el uso de los sistemas digitales de procesamiento de imágenes y los sistemas de información geográfica.

Capacidad multitemporal

Los sistemas espaciales recientes de percepción remota tienen resolución temporal muy alta, es decir, de uno o pocos días para tomar nuevamente una determinada área. Esta característica es menor en el ecuador y generalmente aumenta con la latitud. Esta capacidad es útil para la evaluación de cambios a nivel global o local, pero también ayuda a aumentar las posibilidades de adquirir imágenes libres de nubes, lo cual es significativo, sobre todo bajo las condiciones de alta nubosidad de las áreas tropicales.

Complementariedad con otras tecnologías de punta

Las imágenes de percepción remota actuales, y las que se esperan para los próximos años, se complementan favorablemente con las bondades proporcionadas con los sistemas de posicionamiento satelital (GPS y GLONAS, por ejemplo), con los sistemas de procesamiento digital de imágenes y los sistemas de información geográfica (SIG). El sistema GPS brinda exactitudes en la determinación planimétrica, desde 100 m hasta unos pocos centímetros. Este orden de exactitud es perfectamente compatible con las imágenes de percepción remota, incluso con las de resolución mayor del metro (píxeles menores de un metro), para las correcciones fotogramétricas rigurosas y en la generación de mapas aún a escalas mayores al 1:5.000, con curvas de nivel de intervalo en el orden de los 2-5 m.

Durante las dos últimas décadas ha habido un notable desarrollo en los sistemas (software) de procesamiento digital de imágenes, fotogrametría digital y de información geográfica. Los sistemas de fotogrametría digital permiten correcciones rigurosas, trazado automático de curvas de nivel y generación de modelos digitales del terreno (MDT) usando técnicas de autocorrelación en los pares estereoscópicos. Los sistemas de procesamiento digital de imágenes permiten mejorar el contraste y la definición de detalles, produciendo información básica y temática a través de variadas técnicas de análisis y metodologías de trabajo. En este ambiente son aplicadas las técnicas de filtraje, los índices multiespectrales (*índices de vegetación*, por ejemplo), el redimensionamiento de los datos multiespectrales (*componentes principales*, por ejemplo) y las clasificaciones multiespectrales supervisadas, no supervisadas y con numerosas variantes. El software de procesamiento digital de imágenes ya está siendo adaptado al ambiente hiperespectral emergente.

Asimismo, los productos cartográficos (analógicos y digitales), elaborados a partir de las imágenes de percepción remota, constituyen uno de los insumos más importantes para los sistemas de información geográfica (SIG). Estos sistemas han evolucionado notablemente siendo una valiosa herramienta, no sólo para la organización de los datos y la composición de productos cartográficos eficientes y de alta calidad visual, sino, más importante aún, para llevar a cabo complejos análisis que combinan altos volúmenes de información ambiental.

Reducción de precios

El aumento de los países cuyas agencias gubernamentales desarrollan programas de percepción remota y, sobre todo, la irrupción del sector comercial privado en este renglón ha promovido una gran diversidad de sistemas de percepción remota, los cuales han sido presentados en este artículo, de manera no exhaustiva. La consecuencia de esta diversidad de sistemas va a ser la fuerte competencia que está por establecerse en la comercialización de las imágenes y productos con valor agregado, la cual redundará beneficiosamente en la comunidad de usuarios en precios cada vez más bajos y mejores imágenes.

CONCLUSIONES

- Para los años de cruce de siglo (1998-2004) más de 30 satélites de percepción remota, dedicados a la evaluación del ambiente del planeta, están o van a estar operando, lo cual constituye una cantidad apreciable. Los sensores a bordo de estas plataformas brindan diversas posibilidades a los usuarios: resolución espacial desde 1 metro hasta varios kilómetros, resolución espectral desde una banda (pancromática) hasta 200 bandas hiperespectrales, rango de operación espectral comúnmente en el visible (azul, verde y rojo), infrarrojo (cercano, medio y termal) y microondas (radar), capacidad monoscópica y estreoscópica, resolución temporal desde 1-2 días (ecuador) hasta varias semanas, coberturas muy variadas, fajas desde unos pocos kilómetros hasta de varias centenas de Km de ancho.
- Para el año 2000 más de 20 de estos satélites estarán trabajando con 30 m de resolución espacial o mayor. De ellos, cerca de 15 portarán sensores con resolución mayor a los 10 m, y unos 10 satélites, sensores con resolución mayor a los 3 m. Cinco de ellos tendrán resolución en el orden del metro (Ikonos-2, Quickbird-1, Quickbird-2, Orbview-3 y Orbview-4).
- La mayoría de estos sistemas utilizarán sensores multiespectrales, acompañados de una banda pancromática de resolución espacial generalmente de dos a cuatro veces mayor a la de las bandas multiespectrales. La banda pancromática, procesada digitalmente junto con las bandas multiespectrales, permite mejorar la definición del conjunto multiespectral. Algunos satélites de resolución espacial en el orden del metro concentran sus capacidades en el registro del detalle solamente en el ámbito pancromático (Eros-A1, Eros-A2 y Eros-B1), obviando la obtención de imágenes multiespectrales.
- La variada oferta de imágenes que se está dando en estos años permite satisfacer un amplio espectro de aplicaciones en los estudios ambientales y actividades de desarrollo, que van desde la evaluación de los cambios climáticos globales hasta el diseño de un programa de fertilización de terrenos agrícolas.
- Es notorio el marcado interés de empresas comerciales en la explotación del mercado de las imágenes espaciales, que las ha llevado a

promover y financiar programas completos de percepción remota, desde la construcción de los satélites, su colocación en órbita y el control de su operación, hasta la adquisición, transmisión, preprocesamiento, archivo y comercialización de las imágenes originales y la preparación y comercialización de productos elaborados. Esta participación establecerá una competencia beneficiosa para los usuarios.

- Con los significativos cambios que están ocurriendo en el desarrollo de sistemas de percepción remota, es posible estimar que para el año 2000 una buena parte de la actividad cartográfica a nivel mundial estará alimentada por imágenes espaciales. Este pronóstico está soportado por las importantes bondades de los sensores espaciales (resolución espacial, espectral y temporal) y la ventaja económica (precio/ha) que se obtiene al adquirir estas imágenes, en comparación con la adquisición de imágenes aéreas recientes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. 1995. Land Satellite Information in the Next Decade. Proceedings of the ASPRS Conference. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, U.S.A.
- _____. 1997. Earth Observing Platforms and Sensors, in : The Manual of Remote Sensing, 3rd. ed. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, U.S.A.
- ARIES-1 Project Team. 1997. The Australian Resource Information and Environment Satellite [en línea]. The ARIES Project Office website, Mitchell, Australia [Consulta: 10 de mayo de 1999].
- CANADA CENTRE FOR REMOTE SENSING. 1998. ERS-1 COMSS y ERS-2 [en línea]. Canada Centre for Remote Sensing website [Consulta: 12 de mayo de 1999].
- DUCHOSSOIS, G. y ZOBL, R. 1995. ERS-2 continuation of the ERS-1 Success [en línea], ESA Bulletin No. 83. ESA-ESRIN, Fuchino, Italia.
- ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING CENTER. 1999. Future EO Missions [en línea]. Environmental Remote Sensing Center website [Consulta: 14 de mayo de 1999].

- ENVISAT-Team. 1997. The Envisat Payload [en linea]. German Remote Sensing Data Center website [Consulta: 15 de mayo de 1999].
- EOSAT. 1996. Indian Remote Sensing Data, EOSAT Notes, Vol. 11, No. 1.
- EUROPEAN SPACE AGENCY. 1992. ERS-1 System. ESA Publications Division, Noordwijk, The Netherlands.
- INPE, 1996. Satellite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres CBERS [en linea]. Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), Sao José Dos Campos [Consulta: 20 de marzo de 1999].
- JONSSON, H. 1999. EOS AM-1 (TERRA) [en linea]. Swedish Space Corporation, Remote Sensing Services, Kiruna [Consulta: 25 de mayo de 1999].
- LILLESAND, T. y KIEFER, R. 1994. Remote Sensing and Image Interpretation, 3a. ed. John Wiley and Sons, New York.
- OSAWA, Y. et al. 1995. Advanced Land Observing Satellite (ALOS). Mission Objectives and Payloads, Memorias del Congreso MOMS, Koeln, Alemania.
- RADARSAT INTERNATIONAL. 1994. RADARSAT, Canada's Earth Observation Satellite. Radarsat International, Richmond, British Columbia, Canada.
- SIZEMORE, B. y CARROLL, H. 1999. NOAA Satellites [en linea]. Canada Centre for Remote Sensing web site [Consulta: 12 de mayo de 1999].
- SKLARIS, W. 1999. Russian Imagery. Reporte de DBA Systems, Inc. Melbourne, Florida.
- STONEY, W. 1997. Land sensing satellites in the year 2000. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), Singapore.
- STONEY, W. y HUGHES, J. 1998. A new space race is on, GIS WORLD, Vol 11, No. 3.