

Avances en teledetección: instrumentos y aplicaciones

M. P. MARTÍN ISABEL (1) & M. GARCÍA ALONSO (2)
& F. J. MARTÍNEZ VEGA (1)

(1) Centro de Ciencias Humanas y Sociales. Consejo Superior de Investigaciones Científicas
(2) Departamento de Geografía. Universidad de Alcalá

RESUMEN: En las últimas décadas se ha producido un progreso significativo en el ámbito de las nuevas tecnologías de información geográfica (TIG) muy favorecido por el desarrollo de nuevas fuentes de información y análisis como la teledetección, que proporciona una perspectiva única para analizar eventos y procesos que tienen lugar sobre el territorio. La teledetección espacial ofrece una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas de observación de la Tierra, como la posibilidad de obtener una visión global de la superficie terrestre, su capacidad para captar información en regiones no visibles del espectro, así como la adquisición de datos a diversas escalas espaciales y con distinta frecuencia temporal. En este artículo se revisa la evolución y tendencias futuras de las principales misiones de teledetección, analizando las características más destacadas de los nuevos instrumentos de adquisición de información y sus aplicaciones, haciendo especial hincapié en los avances en teledetección hiperespectral y LiDAR. Se incluye, además, un repaso de las aplicaciones más recientes que demuestran la operatividad de la teledetección como herramienta de ordenación del territorio a diversas escalas.

DESCRIPTORES: Teledetección espacial. Hiperespectral. LiDAR. Ordenación del territorio.

1. Introducción

En las últimas décadas se ha producido un progreso significativo en la aplicación de nuevas tecnologías de información geográfica (TIG) en diversos ámbitos de la sociedad actual, desde el puramente científico, al educativo, de comunicación y gestión e incluso de ocio. Este progreso se ha visto muy favorecido por el desarrollo de nuevas fuentes de información y análisis como la teledetección que ha permitido generar información geoespacial de gran utilidad que sirve de orientación

sobre las directrices a seguir en la gestión de los recursos naturales, humanos o de cualquier otra índole. La teledetección proporciona una perspectiva única para analizar eventos y procesos que tienen lugar sobre el territorio. Su ámbito de análisis es muy amplio, tanto en lo que se refiere a su relación con las diversas disciplinas científicas, como a su escala espacial y temporal. Las nuevas tecnologías (plataformas, sensores, equipos de recepción y procesamiento) facilitan la adquisición de información espacial de forma precisa, detallada y rápida.

Recibido: 14.09.2010; Revisado: 28.09.2010
e-mail: mpilar.martin@cchs.csic.es;
mariano.garcia@uah.es; javier.martinez@cchs.csic.es

Los autores agradecen a los evaluadores anónimos sus comentarios para la mejora del presente trabajo.

La teledetección como fuente de información espacial ofrece una serie de ventajas indiscutibles en comparación con otros sistemas de observación de la Tierra como la fotografía aérea o incluso la observación directa sobre el terreno. Entre las principales ventajas se encuentran la posibilidad de obtener una visión global de la superficie terrestre, su capacidad para captar información en regiones no visibles del espectro, así como la adquisición de datos espaciales a diversas escalas y con distinta frecuencia.

La teledetección espacial nos ofrece una visión global de nuestro Planeta, inédita hace tan sólo unas décadas. Esta visión global permite analizar los complejos procesos que ocurren sobre la superficie terrestre, proporcionando la información necesaria para relacionarlos con sus causas y estimar sus consecuencias. Satélites de órbita geostacionaria como *Meteosat*, situados a unos 36.000 km de distancia de la superficie terrestre captan, en una sola imagen, información del disco completo de la Tierra. Su elevada frecuencia temporal (la tercera generación, cuyo lanzamiento está previsto en 2017, podrá adquirir una imagen cada 10 minutos) les hace idóneos para el seguimiento de fenómenos atmosféricos, aunque también son interesantes para otras aplicaciones ambientales de dimensión global. Otros sistemas de observación de la Tierra que operan a menor altitud siguiendo órbitas heliosíncronas, permiten obtener coberturas globales a diversas escalas espaciales y con distinta frecuencia temporal mediante la elaboración de mosaicos de imágenes. Numerosos proyectos internacionales promueven la creación de bases de datos globales a partir de imágenes de satélite. Un ejemplo interesante es el *Global Land Cover Facility* (<http://glcf.umiacs.umd.edu/index.shtml>) que impulsa el uso de la teledetección para generar información sobre la cobertura del suelo a escala global.

Además de su dimensión global, uno de los logros más importantes de la teledetección espacial respecto a otros sistemas de observación de la Tierra como la fotografía aérea, es su capacidad para obtener información en diversas regiones del espectro electromagnético. Los objetos presentan un comportamiento disimilar en distintas longitudes de onda por lo que la capacidad de obtener información en distintas regiones espectrales, no sólo en el visible e infrarrojo, sino también en el térmico y la región de las microondas, permite discriminarlos de otros objetos y analizar sus propiedades (composición química, estructura, etc.). Hasta hace muy poco la observación de un número eleva-

do de bandas espectrales, lo que se conoce como teledetección hiperespectral, se limitaba a sensores aerotransportados, pero en los últimos años, los avances tecnológicos han permitido el lanzamiento de misiones espaciales con capacidad hiperespectral como el sensor *Hyperion*, a bordo de la plataforma EO-1 (<http://eo1.gsfc.nasa.gov/new/general/firsts/hyperion.html>). Este sensor proporciona información en 220 bandas espectrales lo que resulta de enorme interés para un gran número de aplicaciones, ya que permite discriminar características de las distintas cubiertas que no serían espectralmente perceptibles con sensores convencionales de tipo multiespectral.

La creatividad tecnológica de las últimas décadas ha provocado una enorme evolución en el desarrollo de plataformas y sensores con características muy diversas, lo que ha incrementado de forma extraordinaria la cantidad y variedad de datos disponibles, desde los destinados a estudios de ámbito local, obtenidos a partir de instrumentos con resoluciones espaciales muy altas (inferiores a 1m²), hasta los de ámbito global con resoluciones bajas (de 1 a 5 km²), pasando por otros destinados a estudios de carácter regional con resoluciones medias (15 a 250 m²). Esta gran variedad de productos hace que sea posible obtener información sobre la misma zona de la superficie terrestre a muy diversas escalas espaciales y con distinta frecuencia temporal, lo que permite extrapolar espacialmente las observaciones así como analizar su evolución temporal, abordando estudios multiescalares de gran interés en el análisis de diversos fenómenos ambientales.

En sucesivos epígrafes tendremos la oportunidad de abordar con más detalle cuáles han sido los principales avances que la teledetección espacial ha experimentado en los últimos años. Presentaremos la evolución y tendencias futuras de las principales misiones de teledetección, analizando las características más destacadas de los nuevos instrumentos de adquisición de información. Revisaremos las nuevas técnicas de análisis de imágenes, como las desarrolladas específicamente para datos hiperespectrales y, finalmente, analizaremos las tendencias más destacadas en los principales ámbitos de aplicación de la teledetección y muy especialmente en la ordenación del territorio. Prestaremos especial atención a la tecnología LiDAR, acrónimo de *Light Detection and Ranging*, que en los últimos años ha experimentado un gran auge como herramienta de captura de información espacial en muy diversas temáticas, tales como la generación de modelos digitales del terreno y/o de super-

ficie (MDT/MDS), modelos urbanos tridimensionales, estimación de diversos parámetros forestales (alturas, volúmenes, biomasa, etcétera), cartografía de líneas eléctricas o estudios batimétricos (IRISH, 1998; MAAS, 1999; NÆSSET, 2004). Este auge viene motivado por algunas de las ventajas que ha mostrado frente a sensores pasivos comúnmente empleados en teledetección o incluso a otros sensores activos como el radar. Entre estas ventajas cabe destacar la capacidad del LiDAR para medir directamente parámetros estructurales de la vegetación (altura, distribución vertical de los componentes del dosel, volumen de copa) o la topografía subyacente así como la posibilidad de generar modelos urbanos tridimensionales de una forma rápida y precisa.

2. Misiones de teledetección: evolución y tendencias futuras

La historia de la teledetección, entendida como observación remota de la superficie terrestre, comienza oficialmente en el año 1858 con las primeras fotografías aéreas tomadas sobre París por Gaspard Félix Tournachon desde un globo situado a unos 80 metros de altitud. Un siglo después, a mediados de la década de los 60, se produjeron las primeras experiencias de teledetección desde plataformas espaciales. En plena era espacial, estas experiencias tuvieron su origen en las fotografías adquiridas por los tripulantes de misiones espaciales como Gemini y Apollo. Aunque estas misiones estaban destinadas a explorar el espacio exterior, la nueva visión de la superficie terrestre que proporcionaban las imágenes adquiridas por los astronautas, puso de manifiesto el interés científico de esta información y abrió el camino al desarrollo de misiones espaciales dedicadas al estudio de nuestro Planeta. Así, en el año 1966, el USGS (*United States Geological Survey*) anunció la puesta en marcha del primer proyecto civil de observación de la Tierra desde el espacio, conocido como EROS (*Earth Resources Observation Satellites*). El USGS encomendó entonces a la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) el diseño del *Earth Resources Technology Satellite* cuyo primer satélite, el ERTS-1, fue puesto en órbita el 23 de julio de 1972. Esta fecha es considerada un auténtico hito en la historia de la teledetección ya que constituyó el inicio de una larga y fructífera serie de satélites dedicados al estudio de la superficie terrestre, los famosos Landsat, que aún hoy continúan facilitando una valiosísima información para analizar los cambios que se han producido en nuestro Planeta en las cuatro últimas décadas. Desafortunada-

mente, su continuidad no está completamente garantizada más allá del lanzamiento del próximo satélite de la serie, previsto para 2012 (<http://ldcm.nasa.gov/>).

Podemos afirmar que nuestro Planeta ha sido “redescubierto” a través de la adquisición sistemática de una enorme cantidad de información durante más de medio siglo de observación espacial. Esta información ha sido utilizada en muy diversos campos de aplicación llegando a crear una dependencia de estos satélites de observación de la Tierra que hubiera sido inimaginable tan sólo unas décadas atrás (KRAMER, 2002).

El desarrollo de la teledetección ha estado ligado, desde sus inicios, a los avances tecnológicos, especialmente en lo que respecta a los instrumentos de adquisición de datos (plataformas y sensores) y de transmisión, almacenamiento y análisis de los mismos (sistemas de comunicación, hardware y software informático). Éstos han evolucionado de una forma extraordinariamente rápida en las últimas décadas dando lugar a una oferta cada vez mayor de información espacial con características muy diversas en lo que se refiere a su dimensión espacial, espectral y temporal. En la última edición de su libro *Observation of the Earth and its Environment*, KRAMER (2002) recoge, a lo largo de algo más de 1.500 páginas, una exhaustiva revisión de las principales misiones que se han desarrollado en el mundo desde los inicios de la teledetección hasta nuestros días.

Por lo que respecta a las plataformas espaciales, es decir, los satélites que llevan a bordo los distintos instrumentos de observación o sensores, su evolución ha estado ligada al desarrollo tecnológico en el campo de la aeronáutica, la electrónica y las comunicaciones así como a la propia evolución de los vehículos de lanzamiento. En los primeros años de la era espacial los satélites eran pequeños debido a la limitada capacidad de los vehículos de lanzamiento. Sin embargo, a medida que se produjeron avances en esta tecnología, especialmente entre los años setenta y ochenta del pasado siglo, los satélites se hicieron cada vez más grandes y más complejos. Esto tuvo como consecuencia un aumento significativo de los costes y, por tanto, una reducción en la frecuencia de lanzamiento de nuevas misiones. Sin embargo, en los años ochenta la empresa *Surrey Satellite Technology Ltd* (SSTL) (<http://www.sstl.co.uk>), pionera en el diseño de mini y microsatélites, planteó un cambio de tendencia hacia plataformas más pequeñas, sencillas y

modulares que permitan reducir costes lo que a su vez facilitó la proliferación de nuevas misiones financiadas por agencias estatales y/o empresas privadas. Esto permitió que países como Nigeria, Turquía o Argelia pudieran contar con su propio sistema de observación de la Tierra. En julio de 2009 la empresa *Deimos Imaging* puso en órbita el DEIMOS-1, primer satélite comercial español de observación de la Tierra, basado en el concepto Microsat-100 de la empresa SSLT. El DEIMOS-1 está concebido para obtener imágenes de la Tierra de una resolución suficientemente buena para el estudio de la cubierta vegetal terrestre (unos 20 m), pero con gran amplitud de campo visual para obtener dichas imágenes con alta resolución temporal y a costes reducidos. El satélite forma parte de la contribución española a la *Disaster Monitoring Constellation*, una constelación de satélites para el seguimiento de catástrofes que es coordinada por DMC International Imaging (<http://www.dmcii.com>). Esta constelación cuenta actualmente con 6 satélites (Beijing-1, AISat-1, NigeriaSat-1, UK-DMC-1, UK-DMC-2 y Deimos-1) al que se incorporará próximamente el NigerianSat-X que será lanzado a finales de 2010. Las imágenes DMC han sido utilizadas para la gestión de crisis por desastres naturales como el Huracán Katrina que afectó a la costa este de Estados Unidos en el año 2005 o el tsunami que arrasó Indonesia en diciembre de 2004. El éxito de estas misiones ha llevado a las grandes agencias espaciales como la estadounidense NASA o la europea ESA a replantear sus programas de observación de la Tierra, de tal forma que, aunque aún se mantienen grandes plataformas como Envisat, TERRA o AQUA, se tiende cada vez más hacia el diseño de misiones más pequeñas que resultan mucho más apropiadas a los ajustados presupuestos disponibles en los últimos años. Además de la citada DMC, existen otras constelaciones de pequeños satélites como por ejemplo RapidEye (<http://www.rapideye.de/>), desarrollada igualmente a partir de la tecnología de microsátélites, en este caso por una empresa alemana. Esta constelación permite la observación continua de la superficie terrestre llegando a captar 4 millones de km² de imágenes cada día. Los satélites RapidEye tienen una resolución espacial de 5 m y son los primeros satélites comerciales que ofrecen la capacidad de obtener información en la región espectral denominada Red-Edge (690 a 730 nanómetros), situada entre el visible y el infrarrojo cercano. Esta región es particularmente sensible a los cambios en contenido de clorofila y nitrógeno, lo que ofrece un amplio rango de posibles aplicaciones al estudio de la cubierta vegetal.

En los últimos años la Agencia Espacial Europea (ESA) ha centrado buena parte de su programa de observación de la Tierra en el desarrollo de pequeñas misiones diseñadas para el estudio de aspectos específicos de la atmósfera, biosfera, criosfera e hidrosfera terrestres. El objetivo de estas misiones, conocidas como *Earth Explorer*, es aprender más acerca de las interacciones entre estos componentes y el impacto que la actividad humana está teniendo en los procesos naturales. De los seis satélites previstos, tres ya han sido puestos en órbita: GOCE, SMOS y CryoSat-2. El satélite GOCE está destinado al estudio del campo gravitatorio de la Tierra, permitirá modelizar el geode con una elevadísima precisión y avanzar en el conocimiento de la circulación oceánica. La misión SMOS cuenta con una importante participación de investigadores españoles y tiene como objetivo la observación de la humedad del suelo y la salinidad de los océanos. Estas medidas son esenciales para los modelos climáticos e hidrológicos, entre otros. Los datos SMOS han sido utilizados para el seguimiento de inundaciones como las que afectaron a Pakistán este mismo verano. Por su parte, el CryoSat-2 se dedica a la observación de las masas de hielo. En los años 2011 a 2013 está previsto el lanzamiento de las plataformas Swarm, ADM-Aeolus y EarthCARE dedicadas, respectivamente, al estudio del campo magnético terrestre, de perfiles de viento a escala global y a la interacción entre nubes, aerosoles y radiación. Paralelamente, ESA desarrolla otras cinco nuevas misiones conocidas como *Sentinel* cuyo lanzamiento está previsto entre los años 2011 y 2019. Cada una de las misiones *Sentinel* estará formada por una constelación de 2 satélites y tienen como objetivo cubrir las necesidades de información de la iniciativa GMES (*Global Monitoring for Environment and Security*), dedicada al análisis y gestión medioambiental en Europa (<http://www.gmes.info/>).

Otro de los avances más recientes en el ámbito de las misiones de teledetección es el desarrollo de satélites comerciales de alta resolución espacial. Se trata de una nueva generación de satélites, habitualmente promovidos por empresas privadas, que ha permitido introducir la teledetección en mercados hasta el momento reservados a la fotografía aérea. Esto es así gracias a las características técnicas de estos equipos, cuya tecnología se basa en la desarrollada para satélites destinados a uso militar, que permite obtener imágenes con resoluciones espaciales muy altas, en muchos casos inferiores a 1 m². Una de las empresas más importantes en este sector de la alta resolución espacial es la estadounidense GeoEye, propie-

taria de las plataformas IKONOS y Geo-Eye. IKONOS fue puesto en órbita en diciembre de 1999 y se convirtió en el primer satélite comercial con resolución espacial sub-métrica ya que permitía captar imágenes con una resolución de 4 m en el modo multiespectral (bandas del visible e infrarrojo cercano) y de 0,8 m en la banda pancromática. Su sucesor, el Geo-Eye-1, lanzado en septiembre de 2008, es actualmente el satélite comercial con mayor resolución espacial pues permite adquirir imágenes con un tamaño de píxel de 1,65 m en modo multiespectral y 0,41 m en la banda pancromática. El Geo-Eye 2 se encuentra ya en fase de planificación aunque no existe fecha prevista de lanzamiento. Este nuevo satélite permitiría obtener imágenes con una resolución espacial de 0,25 m, si bien estas imágenes, en principio, sólo podrían ser utilizadas por usuarios del gobierno de Estados Unidos o aliados pues actualmente la mayor resolución espacial permitida en los satélites comerciales, según la regulación de este país, es de 0,5 m. En cualquier caso, las posibilidades que estas imágenes ofrecen para estudios de escala local son enormes, destacando, entre otras, las aplicaciones al estudio de la red urbana, compitiendo con la fotografía aérea como principal fuente de información. Las principales ventajas que ofrecen frente a la fotografía aérea los satélites de alta resolución son la mayor homogeneidad de las adquisiciones cuando se quiere cubrir un territorio relativamente extenso y su mayor resolución espectral (habitualmente proporcionan información en cuatro o cinco bandas espectrales en las regiones del visible e infrarrojo cercano). En cambio, entre las principales limitaciones se encuentra su elevado precio y la falta de adquisiciones sistemáticas de toda la superficie terrestre, lo que en ocasiones condiciona la disponibilidad de imágenes.

En el extremo opuesto desde el punto de vista de la escala espacial, es decir, en el ámbito de las aplicaciones globales de la teledetección, uno de los programas más ambiciosos desarrollados en las últimas décadas es el conocido como EOS (*Earth Observing System*) que incluye diez plataformas actualmente operativas, entre ellas el Landsat 7, y dos más en proyecto. Entre las primeras, destacan, por su enorme valor como fuente de información a escala global, las plataformas TERRA y AQUA que fueron puestas en órbita en 1999 y 2002, respectivamente. Aunque coordinadas por la NASA, se trata de misiones de colaboración internacional ya que llevan a bordo sensores desarrollados por otros países como Japón y Canadá. Estos satélites proporcionan medidas globales y estacionales del sistema terrestre.

El objetivo principal de estas misiones es estudiar cómo está cambiando nuestro Planeta y cuáles son las consecuencias que esos cambios pueden tener para la vida en la Tierra. Su éxito se debe en gran parte a la enorme facilidad de acceso a los datos, ya que la mayor parte son gratuitos y accesibles a través de Internet (<http://nasadaacs.eos.nasa.gov>).

Como ya hemos indicado, una de las principales ventajas de la teledetección frente a otros sistemas de observación de la Tierra es su capacidad para facilitar información en distintas regiones del espectro electromagnético. Desde sus inicios, las misiones espaciales de observación de la Tierra contaron con capacidad multiespectral, ya que permitían obtener información en varias bandas (habitualmente entre 3 y 7) localizadas fundamentalmente en las regiones espectrales del visible e infrarrojo cercano y, menos frecuentemente, en las del infrarrojo medio y térmico. Sin duda uno de los principales avances experimentados por la teledetección en los últimos años, es el creciente empleo de sensores hiperespectrales que permiten obtener información en un gran número de bandas (entre 20 y 250). Hasta hace tan sólo una década este tipo de teledetección hiperespectral estaba reducida a sensores aeroportados como el AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*), primer sensor capaz de obtener imágenes en más de 200 bandas en el rango espectral del visible al infrarrojo medio de onda corta (400 a 2.500 nanómetros). Actualmente existe un gran número de sensores hiperespectrales, como pueden ser el alemán DAIS (*Digital Airborne Imaging Spectrometer*) que opera desde el año 1995 o el australiano HyMap que ofrece información en 126 bandas espectrales. En España el Instituto Cartográfico de Cataluña adquirió en 1991 el sensor CASI (*Compact Airborne Spectrographic Imager*), que ofrece la posibilidad de selección de bandas hasta un máximo de 288 a escoger en el rango de 400 a 960 nanómetros (visible e infrarrojo cercano), en intervalos de 1,8 nanómetros. Desde el año 2004 el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) proporciona imágenes adquiridas por el sensor AHS (*Airborne Hyperspectral System*), que obtiene información en 80 bandas espectrales desde el visible al infrarrojo térmico. El rango de aplicaciones de este tipo de imágenes es muy amplio aunque destacan los estudios sobre características de la cubierta vegetal, así como los estudios geológicos y edafológicos. El principal problema de este tipo de imágenes es su elevado coste y su adquisición no sistemática que condiciona la disponibilidad de imágenes para aplicaciones operativas.

Debido al gran potencial que han demostrado las imágenes hiperespectrales aeroportadas, algunas de las grandes misiones espaciales como TERRA/AQUA y Envisat han incorporado sensores semi-hiperespectrales como MODIS y MERIS que adquieren información en 36 y 15 bandas respectivamente. Aunque estos sensores no realizan un registro continuo del espectro, constituyen un avance significativo respecto a los sensores multiespectrales al ofrecer un número considerablemente mayor de bandas, algunas localizadas en regiones espectrales de gran interés para el estudio de determinados fenómenos como la región denominada Red Edge situada entre el rojo y el infrarrojo cercano. En realidad el primer sensor hiperespectral espacial fue el FTHSI (*Fourier Transform HyperSpectral Imager*), lanzado en julio de 2000 a bordo del MigthySat II. Este sensor era capaz de obtener información en 256 bandas en el espectro visible e infrarrojo cercano. Sin embargo, el sensor hiperespectral espacial más conocido es, sin duda, el Hyperion lanzado tan sólo unos meses después del FTHSI, en noviembre de 2000, como parte de la carga útil de la plataforma Earth Observing-1 (EO-1). Hyperion obtiene imágenes en 220 bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros (<http://eo1.usgs.gov/hyperion.php>) abarcando en cada escena un área de $7,5 \times 100$ km. Como el resto de sensores a bordo de la plataforma EO-1, Hyperion se diseñó como un equipo experimental, lo que ha reducido mucho su difusión, ya que no ofrece una cobertura global sistemática. En esta misma línea de misiones experimentales la Agencia Espacial Europea lanzó en octubre de 2001 la plataforma Proba (*Project for On-Board Autonomy*) que incluía un sensor hiperespectral (CHRIS) cuyo objetivo era explorar las posibilidades de este tipo instrumentos a bordo de pequeñas plataformas espaciales. El sensor CHRIS tiene tan sólo 14 kg de peso y admite distintas configuraciones, pudiendo obtener información en 63 bandas espectrales del visible al infrarrojo cercano con una resolución espacial de 34 metros, aunque teóricamente es capaz de obtener información hasta en 156 bandas. Una de las características más interesantes de este instrumento es su capacidad para obtener información con distintos ángulos de observación lo que permite abordar análisis del BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*) para una mejor caracterización espectral de las cubiertas. Esta es, sin duda, una de las tendencias con mayor interés en el desarrollo de futuras plataformas.

Para finalizar este repaso a los principales avances y tendencias futuras de las misiones

de teledetección haremos referencia a las misiones dedicadas a obtener información de la superficie terrestre a partir de sensores activos, es decir, aquellos que disponen de su propia fuente de energía como los sensores radar y LiDAR. Aunque menos populares que los sensores pasivos, debido a la mayor complejidad de los procesos de corrección, tratamiento e interpretación de las imágenes que captan, este tipo de instrumentos han demostrado su interés en múltiples aplicaciones, debido fundamentalmente a su gran flexibilidad, ya que pueden trabajar con independencia de la iluminación solar (día o noche), en cualquier condición atmosférica (radar) o proporcionar medidas en 3D de manera directa (LiDAR).

El primer satélite en incorporar un equipo radar para adquisición de imágenes fue el Seasat, lanzado en 1978. La misión fue diseñada para el seguimiento de fenómenos oceanográficos y con el propósito de determinar los requisitos de un sistema operativo de control por satélite de los océanos. Aunque el Seasat estuvo operativo solamente durante 105 días, muchas misiones posteriores basadas en tecnología radar han sido posibles gracias a su legado. Desde sus inicios, los progresos en la tecnología radar se han dirigido a obtener equipos más versátiles, que mejoren la resolución espacial y ofrezcan observación multiangular, multifrecuencia y multipolarización (CHUVIECO, 2008). Entre las misiones radar más importantes se encuentran RADARSAT, de la agencia espacial canadiense y ERS y Envisat de la agencia espacial europea. El primer satélite de la serie RADARSAT fue lanzado en 1995. Utilizaba un radar de apertura sintética (SAR) para obtener imágenes con resoluciones espaciales entre 10 y 100 m (dependiendo del modo de operación del instrumento) con una frecuencia temporal de 24 días. Su sucesor, el RADARSAT-2, lanzado en 2007, ha mejorado las características técnicas de la primera misión al incorporar el SAR comercial (en banda C) más avanzado del mundo, con una resolución espacial máxima de 3 m y flexibilidad en la selección de la polarización. En cuanto a las plataformas radar europeas, el primer satélite de teledetección de la ESA, el ERS (*European Remote Sensing Satellite*), lanzado en 1991, fue precisamente un satélite radar pues su carga útil se componía básicamente de dos sensores radar y un sensor térmico. En 1995 se lanzó el ERS-2, muy similar al anterior pero que incorporaba un sensor (GOME) para el seguimiento global del ozono. Sin embargo, la misión más ambiciosa de la agencia europea es la plataforma Envisat lanzada en 2002. Con un peso de más de 8 toneladas, esta enorme

plataforma espacial ha permitido continuar y mejorar las observaciones radar iniciadas con la serie ERS al incorporar un radar de apertura sintética más avanzado, el ASAR, que presenta una resolución espacial de 30 metros y 5 modos de polarización. Pero Envisat incorpora, además, numerosos sensores dedicados a mediciones de la atmósfera y de la superficie terrestre, de gran interés para aplicaciones a escala regional y global, entre los que destaca el MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) que obtiene información en 15 bandas espectrales entre el visible y el infrarrojo cercano, proporcionando una cobertura global de la Tierra cada 3 días a una resolución espacial de 300 m.

Por lo que respecta a los sensores LiDAR, que analizaremos con más detalle en el siguiente epígrafe, la inmensa mayoría de los estudios se han basado en datos tomados con sensores aeroportados o sistemas terrestres. Hasta la fecha sólo ha habido una misión espacial que haya proporcionado datos LiDAR de manera global, la misión ICESat. Sin embargo, los prometedores resultados obtenidos han dado lugar a futuras misiones que incluirán sistemas LiDAR como son: ICESat-2, DESDynI y LIST. No obstante, estas misiones están todavía en fase de diseño y su lanzamiento no está asegurado (NELSON, 2010).

El sensor *Geoscience Laser Altimeter System* (GLAS), desarrollado por la NASA, *Earth Science Enterprise* (ESE) como parte del programa *Earth Observing System* (EOS), es el único sensor a bordo del satélite *Ice, Cloud and land Elevation Satellite* (ICESat) lanzado el 13 de enero de 2003. Este es el único sistema, hasta la fecha, que ha proporcionado datos LiDAR desde satélite de manera global, y fue diseñado para medir la topografía de las masas de hielo y los cambios experimentados por estas masas como consecuencia del calentamiento global, así como para medir importantes propiedades atmosféricas como distribución de aerosoles o la altura y espesor de las nubes. Además, dado el carácter global de sus observaciones, este sensor ha proporcionado datos que permiten caracterizar la vegetación y la topografía a escala global sin precedentes. Los resultados obtenidos por la misión ICESat, unidos a los cambios observados en las masas de hielo polar, han favorecido el desarrollo de una segunda misión ICESat-2 (ABDALATI & *al.*, 2010). Los principales objetivos de esta misión son medir los cambios de las masas de hielo polar y las masas de hielo marinas. A diferencia de la primera misión ICESat, la medida de la biomasa es

también un objetivo específico de esta segunda misión (ABDALATI, 2010).

La misión DESDynI se caracteriza por integrar un sensor radar y un sensor LiDAR, con el objetivo de estudiar riesgos naturales (deslizamientos, terremotos y erupciones volcánicas), los efectos del cambio climático en las masas de hielo y los efectos del cambio climático y cambios en el uso del suelo en distintos hábitat así como en el contenido de carbono (<http://desdyni.jpl.nasa.gov/>). El uso combinado de la tecnología radar y la tecnología LiDAR permite aprovechar las ventajas de ambas. Así, hará uso de la precisión proporcionada por los datos LiDAR para calibrar y validar las medidas radar, permitiendo obtener una cobertura completa a partir de este último sensor. Todavía no se ha decidido si ambos sensores irán montados sobre la misma plataforma o en plataformas separadas (<http://desdyni.jpl.nasa.gov/>). El lanzamiento de esta misión está previsto para 2017 (NELSON, 2010) con una vida útil de 5 años. Por último, la misión LIST, cuyo lanzamiento está previsto para 2017-2019, tiene como objetivo proporcionar datos topográficos globales con una resolución menor que los 30-90 m disponibles actualmente con la misión SRTM, y con una precisión de 10 cm, mucho mejor que los 10 m de los datos disponibles actualmente. Esta configuración permitirá cartografiar deslizamientos de tierras o encontrar fallas activas, permitiendo mejorar la evaluación del riesgo de terremotos y proporcionará datos globales sobre la estructura de las masas forestales (<http://cce.nasa.gov/pdfs/LIST.pdf>).

3. Nuevos sensores, nuevas técnicas: teledetección hiperspectral y LiDAR

El desarrollo experimentado por los sistemas de adquisición de datos ha implicado el desarrollo de nuevas técnicas que permiten extraer la máxima información posible de los mismos de una manera eficaz. En este epígrafe nos centraremos en los que consideramos, dos de los avances más significativos experimentados por la teledetección en los últimos años, la teledetección hiperspectral y LiDAR.

3.1. Teledetección hiperspectral

La espectroscopia lleva más de un siglo utilizándose en los laboratorios para la identificación de materiales y el análisis de sus características físico-químicas. Sin embargo, sólo en los últimos años los avances tecnológi-

cos han permitido aplicar la espectroscopia de imagen a la observación de la Tierra. Así surge, a mediados de los años ochenta, el concepto de teledetección hiperespectral. A pesar de ser una tecnología relativamente nueva, su enorme potencial ha permitido un rápido desarrollo, ampliando el rango inicial de aplicaciones geológicas, a estudios muy diversos, entre los que destacan los relacionados con el estado y características de la vegetación.

Las imágenes hiperespectrales cuentan con un elevado número de bandas (habitualmente entre 50 y 250) cuya anchura media oscila entre 1 y 15 nanómetros (en las imágenes multiespectrales el ancho de banda suele oscilar entre 50 y 120 nanómetros). Estas imágenes se representan habitualmente como un cubo de datos con la información espacial recogida en el plano XY y la información espectral representada en la dirección Z. Los datos hiperespectrales se representan como espectros o curvas espectrales que permiten caracterizar una cubierta u objeto. Pueden considerarse como puntos en un diagrama de dispersión n -dimensional. Cada punto representa la reflectividad de un píxel en el n -número de bandas que integran la imagen. La distribución de los datos hiperespectrales en ese espacio n -dimensional es utilizada para comprender las características espectrales de los materiales que componen cada espectro. Con esta información se elaboran las llamadas librerías espectrales que son bases de datos o bibliotecas de espectros en los que cada elemento está caracterizado por su comportamiento espectral en las longitudes de onda que registra el sensor.

La teledetección hiperespectral combina imagen y espectroscopia en un único sistema que a menudo implica manejar gran cantidad de información, lo que requiere técnicas de procesamiento distintas a las utilizadas con imágenes multiespectrales. Por lo que respecta a las técnicas de preprocesamiento, una de las mayores particularidades de las imágenes aeroportadas, habitualmente utilizadas en teledetección hiperespectral, frente a las adquiridas desde plataformas espaciales, es que muchas veces el estudio de una zona de escala local o regional comprende la adquisición de varias pasadas que alargan el tiempo de adquisición lo que hace que la variabilidad de las condiciones atmosféricas, pero sobre todo de iluminación, sea importante. Por esta razón los métodos de corrección basados en parámetros estándar no siempre funcionan adecuadamente en este tipo de imágenes. En muchas ocasiones, la calibración de imágenes hiperespectrales aeroportadas requiere la adquisición de información

espectral en terreno, simultánea a la toma de imágenes, para lo que se utilizan espectro-radiómetros con una resolución y rango espectral similar al del sensor aeroportado. En cuanto a las técnicas utilizadas para extraer información de la imagen, tienen especial interés aquellas que se basan en la caracterización de píxeles mezcla como el ALME (Análisis Lineal de Mezclas Espectrales); las que se dirigen a reducir la dimensionalidad de la imagen con objeto de solventar los problemas de almacenamiento de datos y redundancia de la información, como el MNF (*Minimum Noise Fraction*) y las relacionadas con el análisis de espectros, que permiten comparar la información que se deriva de las imágenes, con otra que puede considerarse de referencia obtenida a partir de mediciones de campo y/o laboratorio. Entre estas técnicas de análisis de espectros destacan los llamados clasificadores angulares, como el *Spectral Angle Mapper* (SAM), que permite identificar y/o clasificar elementos de la imagen determinando la similitud entre la información contenida en cada píxel y uno o varios espectros de referencia mediante el cálculo de la distancia angular que les separa.

La posibilidad que brinda la teledetección hiperespectral de obtener información en bandas muy estrechas hace que sea posible discriminar parámetros de la vegetación o los suelos que no serían perceptibles con sensores convencionales. En el ámbito de la agricultura las imágenes hiperespectrales se han utilizado, por ejemplo, para la estimación de parámetros relacionados con el crecimiento y productividad de los cultivos como el contenido en clorofila y la biomasa (PATEL, 2001) o para la detección y seguimiento de plagas (THENKABAIL, 2002). La teledetección hiperespectral ha sido también utilizada con éxito para estimar la calidad de las aguas a partir del análisis de parámetros como la turbidez y el contenido en clorofila (KOPONEN, 2002) e incluso para la cartografía de vegetación subacuática (WILLIAMS, 2003). También son frecuentes los trabajos sobre vegetación natural para la estimación de parámetros biofísicos como el contenido en clorofila (SAMPSON, 2003). Aunque, sin duda, las aplicaciones más numerosas se encuentran en el campo de la geología, donde las imágenes hiperespectrales se han utilizado profusamente para identificar y cartografiar minerales (HÖRING, 2001).

3.2. Sistemas LiDAR

Los sistemas LiDAR son sistemas activos que utilizan la emisión de un pulso láser para de-

terminar la distancia entre el sensor y los distintos objetos sobre los que incide el pulso en su trayectoria. El principio de medida se basa en la determinación muy exacta del tiempo transcurrido entre la emisión de un pulso láser y su retorno, tras reflejarse en la superficie que se observa. A partir de ese tiempo, se calcula la distancia entre el sensor y el objeto sobre el que incide el pulso. Puesto que el sistema mide el tiempo transcurrido desde la emisión del pulso hasta el registro del retorno, para determinar la distancia entre el sensor y el objeto es necesario dividir este tiempo por dos.

Los sistemas LiDAR están compuestos por las siguientes unidades: unidad de medida de distancias, escáner y unidad de control y procesamiento, la cual incluye un sistema GPS/IMU que permite determinar la posición y orientación del sensor (WEHR, 1999). La combinación de los datos proporcionados por estos subsistemas permite determinar la coordenadas (X, Y, Z) del punto donde se refleja el pulso emitido.

En cuanto al principio de medida de distancias, podemos distinguir dos métodos fundamentales. El primer método, más directo, consiste en medir el tiempo transcurrido desde la emisión de un pulso hasta su recepción mediante relojes ultra-precisos, y es empleado por la mayoría de los sistemas comerciales. El segundo se basa en determinar la diferencia de fase entre el pulso emitido y el recibido. En este caso el tiempo empleado por el pulso en recorrer la distancia sensor-objeto es directamente proporcional a la diferencia de fase observada. Además del método empleado en la determinación de la distancia sensor-objeto, podemos emplear otros criterios para clasificar los sistemas LiDAR, como por ejemplo:

1. El número de retornos que pueden almacenar: actualmente, los sistemas son capaces de almacenar uno o varios retornos correspondientes a las distintas superficies interceptadas por el pulso en su trayectoria. Estos sistemas suelen recibir el nombre de sistemas discretos. Algunos sistemas, también pueden almacenar la señal de retorno prácticamente de manera continua, en pequeños intervalos de tiempo (por ejemplo cada 1 ns), lo que permite generar una huella completa de la onda emitida y reflejada.
2. Tamaño de la huella: podemos distinguir dos tipos de sistemas de huella pequeña (varios centímetros) o de huella grande (varios metros). Debido a la gran cantidad de información que es necesario almacenar cuando se registra la huella completa,

estos sistemas emplean tamaños de huella grande, mientras que los sistemas que registran pulsos discretos emplean tamaños de huella de pocos centímetros. La ventaja de almacenar toda la huella, junto a los continuos avances en los sistemas LiDAR y capacidad de almacenamiento, ha dado lugar al desarrollo de sistemas de huella completa con tamaños de huella pequeña.

3. Plataforma: como ya hemos mencionado, la mayoría de los sistemas LiDAR están montados sobre aviones, si bien en los últimos años se están extendiendo los sistemas terrestres. Estos últimos consisten en un sistema LiDAR que se coloca sobre un trípode y realiza un escaneo de un área próxima (con alcances de unos 300 m aproximadamente). Un tercer grupo, atendiendo a este criterio, son los sistemas espaciales, aunque como se dijo en el apartado anterior, hasta la fecha el único sistema LiDAR a bordo de una plataforma espacial ha sido ICESat.

En el tratamiento de datos LiDAR, el primer paso a realizar, una vez generada la nube de puntos que caracterizará la superficie terrestre que ha sido observada, es el filtrado o clasificación de los mismos. Mediante este proceso se pretende separar aquellos puntos que corresponden a retornos ocurridos sobre el terreno, de aquellos que corresponden a retornos ocurridos sobre los distintos objetos situados sobre la superficie terrestre (árboles, edificios, etc.). Este es un proceso crítico ya que los resultados que se obtengan en posteriores aplicaciones dependerá de la calidad de este proceso de filtrado. Una vez que se han separados los puntos terreno de los puntos no-terreno, es posible generar superficies continuas a partir de estos datos mediante distintas técnicas de interpolación.

La capacidad de los sistemas LiDAR para muestrear la superficie terrestre mediante una densa nube de puntos ha supuesto un gran avance en la generación de modelos digitales del terreno (MDT) con precisiones superiores a otros métodos. Sin embargo, uno de los campos donde mayor auge está experimentando la tecnología LiDAR es en el ámbito forestal. Son numerosos los estudios que han mostrado el potencial de esta tecnología debido a su capacidad para proporcionar información sobre la estructura vertical de la vegetación, la cual tiene que ser inferida cuando se trabaja con sensores pasivos. Entre las variables que se pueden obtener a partir de datos LiDAR se encuentran la altura de los árboles (HOLMGREN,

2004), la fracción de cabida cubierta (HOPKINSON, 2009), la altura de la base de las copas (RIAÑO, 2003), el índice de área foliar (ZHAO, 2009), la biomasa aérea o la clasificación de especies (BRANDTBERG, 2007) por citar sólo algunas. Algunas de estas variables se pueden obtener de manera directa, como por ejemplo la altura, sin embargo otras variables como la biomasa son inferidas a partir de modelos estadísticos que relacionan la variable de interés con variables derivadas a partir de datos LiDAR.

Otra característica importante de los estudios realizados empleando datos LiDAR es la escala. Así, es posible estimar diversas propiedades para una parcela o bien para todo un rodal, y en aquellos casos en los que la cantidad de puntos por metro cuadrado (densidad) es lo suficientemente alta, es posible estimar propiedades a nivel de árbol individual. En este caso es necesario identificar los puntos correspondientes a cada árbol para posteriormente poder estimar sus propiedades. Se han desarrollado diversos algoritmos capaces de detectar árboles, sin embargo, estos algoritmos no son capaces de detectar aquellos árboles cuya copa queda oculta por la de los árboles dominantes del dosel. Recientemente se ha publicado el primer mapa global que detalla la altura de los bosques. Este mapa, con una resolución de 5 km, se ha realizado en la Universidad Estatal de Colorado a partir de datos ICESat y datos MODIS (<http://www.nasa.gov/topics/earth/features/forest-height-map.html>).

Los modelos de planificación urbana también se han visto beneficiados por el desarrollo de la tecnología LiDAR. A partir de datos LiDAR es posible generar modelos 3D de las ciudades, los cuales son esenciales para muchas aplicaciones como gestión de emergencias en casos de desastres (por ejemplo inundaciones), cartografía de edificios y sus alturas, actualización catastral, detección de cambios, instalación de antenas de telefonía o incluso generación de escenarios virtuales. Puesto que la digitalización manual y la reconstrucción de superficies conllevan mucho tiempo y son muy costosas, el desarrollo de algoritmos automáticos o semiautomáticos para la extracción de elementos es de gran importancia por lo que se han convertido en una importante área de investigación. Un método para clasificar los edificios de manera casi automática fue propuesto por You (2003). Consiste en generar en primer lugar un modelo digital de superficie y filtrar aquellos puntos que tenga una altura superior a un umbral determinado. Es evidente que los puntos más altos de-

ben corresponder a edificaciones o vegetación. Posteriormente esta clasificación es refinada mediante el ajuste de los potenciales edificios a diversas figuras geométricas (primitivas) que pueden ser definidas matemáticamente. Estas primitivas formas (planos, esferas, cubos, cilindros, etc.) pueden combinarse para dar lugar a figuras complejas que forman algunos edificios.

4. La teledetección como herramienta de ordenación territorial

La teledetección es una técnica de gran interés en todas aquellas aplicaciones vinculadas, directa o indirectamente, con la ordenación del territorio. Algunas de las cualidades de la teledetección más apreciadas por los gestores del territorio son la versatilidad de las observaciones de acuerdo a la resolución espacial de los instrumentos, lo que permite aproximaciones multiescalares, y la repetitividad de las mismas. Esta última capacidad permite a los planificadores disponer de un gran volumen de información sobre los territorios que tienen que gestionar, de manera que pueden realizar seguimientos multitemporales de diversos fenómenos, recursos o sistemas (sistema urbano, agua, recursos naturales, incendios forestales, contaminación, etc.), que inciden, positiva o negativamente, sobre el equilibrio de los territorios. A partir del análisis pormenorizado de la información derivada de las imágenes espaciales, los gestores toman decisiones, legislan y planifican el territorio de una forma más eficiente.

A continuación, haremos un breve repaso de las aplicaciones más recientes que demuestran la operatividad de la teledetección como herramienta de ordenación del territorio, desde el nivel local al global. En esta breve revisión, citaremos no sólo los trabajos vinculados con la ordenación territorial, entendida de una forma global, sino que también presentaremos algunos estudios relacionados con planificaciones sectoriales. En las últimas décadas, existe una tendencia generalizada a realizar planes sectoriales (forestales, paisajísticos, hidrológicos, de conservación de la naturaleza, urbanísticos, etc.) con un enfoque más holístico o integrado, es decir, más conectados con las directrices generales de ordenación del territorio y con el resto de planes sectoriales con los que pueden estar imbricados cada uno de ellos.

A nivel local, la aplicación más repetida de la teledetección es el planeamiento urbanístico. Buena parte de las autoridades municipales utilizan mosaicos de ortoimágenes de alta re-

solución espacial para realizar un seguimiento espacio-temporal del crecimiento de las zonas urbanas y compararlo con las zonas definidas en los planes generales de ordenación urbana y con su calificación y clasificación correspondientes, con objeto de tomar decisiones, en caso de incumplimiento del planeamiento, o de reajustar éste a las nuevas circunstancias. La teledetección espacial también aporta información de gran interés en trabajos arqueológicos y urbanísticos. COLOSI (2009) utiliza imágenes QuickBird para estudiar el complejo arqueológico Chan-Chan (Perú), una de las ciudades precolombinas más grandes de América. Propone la creación de un parque arqueológico para proteger el yacimiento de la desordenada e incontrolada expansión urbana de la colindante ciudad de Trujillo.

En la planificación de áreas protegidas, MARTÍNEZ (2010) emplea imágenes Landsat multitemporales para monitorizar la pérdida de biodiversidad en la Reserva de las Tierras del Miño, midiendo los cambios producidos en el territorio mediante indicadores de ecología del paisaje. La gestión de la biodiversidad es un campo prioritario en Europa para asegurar la conservación de los hábitats más valiosos y de la naturaleza, en general.

En el contexto de la planificación hidrológica, la proliferación de los cultivos bajo plástico en las últimas décadas está generando grandes problemas ambientales en zonas áridas particularmente vulnerables. La sobreexplotación de acuíferos subterráneos, la intrusión de agua marina y las afecciones sobre otras reservas naturales próximas son el centro de atención de los planificadores que deben regular y ordenar el aprovechamiento de los escasos recursos hídricos disponibles en la cuenca. En este sentido, AGÜERA (2009) propone la identificación y delimitación automática de los invernaderos mediante imágenes de muy alta resolución espacial (*Ikonos* y *QuickBird*) en el campo de Níjar, Almería. La teledetección espacial demuestra su potencial en el inventario, cartografía y seguimiento de estas infraestructuras agrarias.

En los últimos años, los responsables de la ordenación del territorio prestan especial atención a las zonas costeras y litorales mediante enfoques de gestión integrada, considerando que se trata de zonas complejas y vulnerables donde interaccionan y se superponen procesos típicos de ecosistemas terrestres y marinos. GANGAI (2010) cuantifica los cambios de usos del suelo en la costa de Tuticorin (India), mediante imágenes Landsat TM e IRS. Adicionalmente, comparan los usos actuales con los

usos permitidos por las leyes, evidenciando una disparidad entre ellos.

En España, a escala regional, la mayor parte de las Comunidades Autónomas utilizan las imágenes de satélite, de forma operativa y habitual, para generar y actualizar la cartografía de ocupación y usos del suelo de sus territorios correspondientes a escalas comprendidas, normalmente, entre 1:25.000 y 1:200.000. Son muchos los trabajos que se pueden referenciar en esta línea. A modo de ejemplo, citaremos algunos realizados en Cataluña (BURRIEL, 2004), Castilla y León (TAPIADOR, 2001) y en la Región de Murcia (PÉREZ CUTILLAS, 2004). Esta cartografía temática es básica en las tareas relacionadas con la ordenación del territorio y con la planificación estratégica. Por su carácter multitemporal, es idónea para realizar un seguimiento de las principales tendencias de los usos, de manera que se puede realizar una ordenación adaptativa para reforzar o corregir esas tendencias, en el contexto de un desarrollo sostenible.

Además de esta aplicación generalizada, algunas autoridades regionales utilizan las imágenes de satélite para otros fines relacionados con la planificación territorial o sectorial. Así por ejemplo, la Comunidad de Madrid, en el contexto de la Política Agraria Común, emplea la teledetección para realizar controles, obligatorios para el acceso a las ayudas directas de superficie, verificando el cumplimiento de las limitaciones agroambientales en las parcelas afectadas.

Por otra parte, el Instituto Geológico y Minero de España empleará imágenes radar de ERS-1, ERS-2, Envisat y Terrasar-X sobre las Islas Baleares con objeto de delimitar las zonas con mayores riesgos de deslizamientos de ladera y prevenir problemas ambientales y socioeconómicos en caso de intensas lluvias como las que ocurrieron en 2009.

En Galicia, las imágenes de satélite han sido fuentes principales de información para la elaboración de los Planes de Desarrollo Comarcal en los que, bajo una misma estrategia de ordenación del territorio, la comarca era considerada la unidad básica para el desarrollo integral de la región (GALLEGO, 1998).

En Castilla-La Mancha, BEA (2009) y MARTÍNEZ-VEGA (2008), mediante imágenes *Landsat-TM*, han realizado un seguimiento temporal del incremento de la superficie regada, evidenciando los problemas ambientales (sobreexplotación del acuífero de La Mancha Occidental,

deseccación de los humedales relacionados con Las Tablas de Daimiel, combustión espontánea de turberas, etc.) ocasionados por este insostenible modelo de desarrollo.

En Andalucía, entre otras aplicaciones de la teledetección, queremos resaltar el seguimiento de sequías mediante satélite, en el contexto de la Red de Información Ambiental de Andalucía. Utilizando imágenes de muy alta resolución espacial se pretende realizar un seguimiento del estado de piscinas, jardines y campos de golf en el sector occidental de la Costa del Sol y en el área metropolitana de Málaga, con objeto de estimar los recursos hídricos gastados en estos usos y ayudar en la gestión del agua en esta zona vulnerable.

Además de estos trabajos institucionales, en su mayor parte, a continuación citaremos algunos trabajos recientes relacionados con la planificación sectorial, a escala regional.

En el ámbito de la planificación forestal, los mapas de ocupación y uso del suelo, derivados de las imágenes de satélite, son fundamentales para la identificación de áreas prioritarias para la restauración forestal (ORSI, 2010) y para hacer un seguimiento de los procesos de deforestación que afectan a extensas áreas, de gran valor ecológico, en las selvas ecuatoriales y tropicales (ZELEDON, 2009).

Otros trabajos modelan el riesgo de incendios forestales a escala regional en España, desde un enfoque integrado (CHUVIECO, 2010). Entre otros componentes del modelo, se presta especial atención a la humedad del combustible vivo, estimado a partir de compuestos de 8 días con imágenes de satélite. La cartografía de riesgo de incendio, actualizada cada 8 días, es puesta a disposición de los responsables de la gestión forestal a través de servicios *web-mapping* para facilitar su toma de decisiones sobre el terreno.

En los últimos años, los gestores del territorio prestan mucha atención a la planificación del paisaje, entendiendo que el mantenimiento de la actual biodiversidad de las áreas protegidas depende de la calidad del paisaje de las zonas que rodean a aquéllas. SVANCARA (2009) evalúa el riesgo de conversión/conservación de las áreas que envuelven a los espacios protegidos de Estados Unidos, considerando, entre otros, datos socioeconómicos y de satélite. En la misma línea, PINO (2000) utiliza imágenes *Landsat-TM* para estudiar el papel complementario de las áreas rurales, situadas entre parques naturales, en la conservación de la riqueza de especies de aves.

También, las imágenes de satélite son usadas para crear modelos de hábitats potenciales de determinadas especies protegidas de fauna (RUBINO, 2003) y flora, a escala regional. Debido a la diversidad de plataformas y sensores, la teledetección es una tecnología idónea para el seguimiento de los hábitats singulares a diversas escalas, desde la local hasta la paneuropea (WEIERS, 2004).

Con el propósito de implementar los principios de la Directiva marco del Agua y de integrar la planificación hidrológica y la planificación regional, GRINDLAY (2010) utiliza una serie temporal de imágenes Landsat para evaluar la expansión del regadío en la semiárida cuenca del Segura. Pretenden sensibilizar a los responsables de la gestión del agua de la cuenca, por una parte, y a los responsables municipales, por otra, para que definan planes urbanísticos acordes a la disponibilidad de agua, aplicando principios de sostenibilidad.

En el ámbito de la planificación estratégica del territorio y, en concreto, de la planificación energética, hay distintos trabajos que muestran el interés de las imágenes de satélite y de los datos derivados (mapas de ocupación y usos del suelo, mapas de temperaturas de superficie, de rugosidad del terreno, radiación solar, etc.) para evaluar el potencial de las energías renovables, en general (BELMONTE, 2009), ya sea solar, eólica o la hidroeléctrica, y de alguna energía renovable particular como la biomasa agrícola y forestal (BECCALI, 2009; FROMBO, 2009).

Como mencionamos anteriormente, la teledetección es una técnica idónea por el recubrimiento global de los satélites. En este nivel, hemos mencionado antes algunos proyectos, de alcance e interés global, relacionados con la cobertura de ocupación y usos del suelo (*Global Land Cover Facility* y proyecto *LUCC, Land Use and Cover Change*, <http://www.ihdp.uni-bonn.de/html/projects/i-lucc.html>), en los que las imágenes de satélite son protagonistas. Sin embargo, su aplicación en la ordenación del territorio, a escala global, se encuentra un tanto limitada, ya que las competencias en esta materia las ostentan las autoridades locales, regionales y nacionales. Los organismos internacionales (Naciones Unidas, por ejemplo) recomiendan pero sus decisiones, en materia de ordenación territorial, no tienen un carácter vinculante. Tan sólo la Unión Europea tiene un estatus supranacional y sus directivas tienen un carácter vinculante para los estados miembros,

obligados a transponer aquéllas a sus ordenamientos jurídicos. Las directivas marco sobre agua y aire tienen capacidad para reorientar políticas sectoriales o integradas con repercusiones sobre la ordenación del territorio. En el ámbito geográfico de la Unión, el mapa *CORINE-Land Cover* (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>), generado y actualizado a partir de imágenes de satélite, es una herramienta básica para las políticas europeas y también lo es para la toma de decisiones de los gestores regionales y nacionales.

Otros trabajos recientes poseen un objetivo global. El proyecto *FIREGLOBE* (<http://www.fireglobe.es/>) está aplicando la metodología de CHUVIECO (2010) a escala nacional, en España, y global. Como ya vimos, el estado hídrico del combustible es calculado a partir de compuestos de imágenes de satélite.

En resumen, este repaso evidencia la operatividad y el interés de la teledetección en el contexto de la ordenación territorial desde un punto de vista integrado y sectorial y desde una perspectiva multiescalar.

5. Bibliografía

- ABDALATI, W. & H. J. ZWALLY & R. BINDSCHADLER & B. CSATHO & S. L. FARREL & H. A. FRICKER & D. HARDING & R. KWOK & M. LEFSKY & T. MARKUS & A. MARSHAK & T. NEUMANN & S. PALM & R. SCHUTZ & B. SMITH & J. SPINHIRNE & C. WEBB (2010): "The ICESat-2 Laser Altimetry Mission", *Proceedings of the IEEE*, 98: 735-751.
- AGÜERA, F. & J. G. LIU (2009): "Automatic greenhouse delineation from QuickBird and Ikonos satellite images", *Computers and Electronics in Agriculture*, 66: 191-200.
- BEA, M. & S. MONTESINOS & C. MORUGÁN & S. MORALEDA (2009): "Análisis comparativo de las superficies regadas en los acuíferos del Campo de Montiel y La Mancha Occidental en el periodo 2004-2008", en *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso Nacional de la Asociación Española de Teledetección*, Calatayud: 141-144. <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal36.pdf>
- BECCALI, M. & P. COLUMBA & V. D'ALBERTI & V. FRANZITTA (2009): "Assessment of bioenergy potential in Sicily: a GIS-based support methodology", *Biomass & Bioenergy*, 33: 79-87.
- BELMONTE, S. & V. NÚÑEZ & J.G. VIRAMONTE & J. FRANCO (2009): "Potential renewable energy resources of the Lerma valley, Salta, Argentina for its strategic territorial planning", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13: 1475-1484.
- BRANDTBERG, T. (2007): "Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne LiDAR", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 61: 325-340.
- BURRIEL J. A. & J. J. IBÁÑEZ, (2004): "Actualización del mapa de cubiertas del suelo de Cataluña: aportaciones a la cartografía detallada del territorio catalán", en *El empleo de los SIG y la teledetección en planificación territorial*, 333-342, AGE-Universidad de Murcia, Murcia.
- CHUVIECO, E. (2008): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*, Ariel, Barcelona.
- CHUVIECO, E. & I. AGUADO & M. YEBRA & H. NIETO & J. SALAS & M. P. MARTÍN & L. VILAR & J. MARTÍNEZ-VEGA & S. MARTÍN & P. IBARRA & J. DE LA RIVA & J. BAEZA & F. RODRÍGUEZ & J. R. MOLINA & M. A. HERRERA & R. ZAMORA (2010): "Development of a framework for fire danger assessment using Remote Sensing and Geographic Information System technologies", *Ecological Modelling*, 221: 46-58.
- COLOSI, F. & G. FANGI & R. GABRIELLI & R. ORAZI & A. ANGELINI & C. A. BOZZI (2009): "Planning the Archaeological Park of Chan Chan (Peru) by means of satellite images, GIS and photogrammetry", *Journal of Cultural Heritage*, 10S: e27-e34.
- FROMBO, F. & R. MINCIARDI & M. ROBBA & F. ROSSO & R. SACILE (2009): "Planning woody biomass logistics for energy production: a strategic decision model", *Biomass & Bioenergy*, 33: 372-383.
- GALLEGO, M. & F. FANEGO & F. GARCÍA PAZOS (1998): "Intergraph-SITGA: El Sistema de Información Territorial de Galicia", *Mapping*, 49. http://www.mappinginteractivo.com/plantilla-ante.asp?id_articulo=493
- GANGAI, I. P. D. & S. RAMACHANDRAN (2010): "The role of spatial planning in coastal management. A case study of Tuticorin coast (India)", *Land Use Policy*, 27: 518-534.
- GRINDLAY, A. L. & M. ZAMORANO & M. I. RODRÍGUEZ & E. MOLERO & M. A. URREA (2010): "Implementation of the European Water Framework Directive: integration of hidrological and regional planning at the Segura river basin, southeast Spain", *Land Use Policy*, doi: 10.1016/j.landusepol.2010.06.005
- HOLMGREN, J. (2004): "Prediction of Tree Height, Basal Area and Stem Volume in Forest Stands Using Airborne Laser Scanning", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 543-553.
- HOPKINSON, C. & F. L. CHASMER (2009): "Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones", *Remote Sensing of Environment*, 113: 275-288.
- HÖRING, B. & F. KÜHN & F. OSCHÜTZ & F. LEHMANN (2001): "HyMap hyperspectral remote sensing to detect hydrocarbons", *International Journal of Remote Sensing*, 22: 1413-1422.
- IRISH, J. L. & T. E. WHITE (1998): "Coastal engineering applications of high-resolution LiDAR bathymetry", *Coastal Engineering*, 35: 47-71.
- KOPONEN, S. & J. PULLIAINEN & K. KALLIO & M. HALLIKAINEN (2002): "Lake water quality classifica-

- tion with airborne hyperspectral spectrometer and simulated MERIS data", *Remote Sensing of Environment*, 79: 51-59.
- KRAMER, H. J. (2002): *Observation of the Earth and its environment. Survey of missions and sensors*, Springer, Nueva York.
- MARTÍNEZ, S. & P. RAMIL & E. CHUVIECO (2010): "Monitoring loss and biodiversity in cultural landscapes. New methodology based on satellite data", *Landscape and Urban Planning*, 94: 127-140.
- MARTÍNEZ VEGA, J. & P. ECHAVARRÍA (2008): "Detección de cambios en la ocupación del suelo y sus impactos ambientales sobre los ecosistemas acuáticos: el caso de La Mancha Occidental (España Central)", en *España y el Mediterráneo: una reflexión desde la Geografía española. Aportación Española al 31.º Congreso Internacional de la Unión Geográfica Internacional*, Real Sociedad Geográfica-AGE-Instituto Geográfico Nacional, Madrid, 25 pp.
- MAAS, H. G. & G. VOSSELMAN (1999): "Two algorithms for extracting buildings models from raw laser altimetry data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 153-163.
- NÆSSET, E. & T. GOBAKKEN & J. HOLMGREN & H. HYYPPÄ & J. M. M. HYYPPÄ & M. NILSSON & H. OLSSON & A. PERSSON & U. SÖDERMAN (2004): "Laser scanning of forest resources: The Nordic experience", *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19: 482-499.
- NELSON, R. (2010): "Model effects on GLAS-based regional estimates of forest biomass and carbon", *International Journal of Remote Sensing*, 31: 1359-1372.
- ORSI, F. & D. GENELETTI (2010): "Identifying priority areas for forest landscape restoration in Chiapas (Mexico): an operational approach combining ecological and socioeconomic criteria", *Landscape and Urban Planning*, 94: 20-30.
- PATEL, N. K. & C. PATNAIK & S. DUTTA & A. M. SHEKH & A. J. DAVE (2001): "Study of crop growth parameters using airborne imaging spectrometer data", *International Journal of Remote Sensing*, 22: 2401-2411.
- PÉREZ CUTILLAS, P. & J. C. GONZÁLEZ ROJAS & J. A. PALAZÓN (2004): "La teledetección en la planificación territorial. Aplicación de técnicas de clasificación para la elaboración de cartografía de los usos del suelo", en *El empleo de los SIG y la teledetección en planificación territorial*, AGE-Universidad de Murcia, Murcia, 2004: 27-41.
- PINO, J. & R. RODÀ & J. RIBAS & X. PONS (2000): "Landscape structure and bird species richness: implications for conservation in rural areas between natural parks", *Landscape and Urban Planning*, 49: 35-48.
- RIAÑO, D. & E. MEIER & B. ALLGOWER & E. CHUVIECO & S. L. USTIN (2003): "Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling", *Remote Sensing of Environment*, 86: 177-186.
- RUBINO, M. J. & G. R. HESS (2003): "Planning open spaces for wildlife 2: modelling and verifying focal species habitat", *Landscape and Urban Planning*, 64: 89-104.
- SAMPSON, P. H. & P. J. ZARCO-TEJADA & G. H. MOHAMMED & J. R. MILLER & T. L. NOLAND (2003): "Hyperspectral remote sensing of forest condition: estimating chlorophyll content in tolerant hardwoods", *Forest Science*, 49: 381-391.
- SVANCARA, L. K. & J. M. SCOTT & T. R. LOVELAND & A. B. PIDGORNA (2009): "Assessing the landscape context and conversion risk of protected areas using satellite data products", *Remote Sensing of Environment*, 113: 1357-1369.
- TAPIADOR, F. J. & J. L. CASANOVA (2001): "Aplicaciones de la fusión de datos en la ordenación territorial", en *IX Congreso Nacional de Teledetección: Teledetección, Medio Ambiente y Cambio Global*, Asociación Española de Teledetección, Lleida: 508-511. <http://www.aet.org.es/congresos/ix/Lleida111.pdf>
- THENKABAIL, P. & R. SMITH & E. DEPAUW (2002): "Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization", *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 68: 607-621.
- WEHR, A. & U. LOHR (1999): "Airborne laser scanning: an introduction and overview", *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 54: 68-82.
- WEIERS, S. & M. BOCK & M. WISSEN & G. ROSSNER (2004): "Mapping and indicator approaches for the assessment of habitats at different scales using remote sensing and GIS methods", *Landscape and Urban Planning*, 67: 43-65.
- WILLIAMS, D. J. & N. B. RYBICKI & A. V. LOMBANA & T. M. O'BRIEN & R. B. GÓMEZ (2003): "Preliminary investigation of submerged aquatic vegetation mapping using hyperspectral remote sensing", *Environmental Monitoring and Assessment*, 81: 383-392.
- YOU, S. & J. HU & U. NEUMANN & P. FOX (2003): "Urban Site Modeling From LiDAR", *Second International Workshop on Computer Graphics and Geometric Modeling CGGM'2003*, Montreal, Canada.
- ZHAO, K. & S. POPESCU (2009): "LiDAR-based mapping of leaf area index and its use for validating GLOBCARBON satellite LAI product in a temperate forest of the southern USA", *Remote Sensing of Environment*, 113: 1628-1645.
- ZELEDON, E. & N. M. KELLY (2009): "Understanding large-scale deforestation in southern Jinotega, Nicaragua from 1978 to 1999 through the examination of changes in land use and land cover", *Journal of Environmental Management*, 90: 2866-2872.