

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN EN DEGRADACIÓN DE SUELOS*

M^a Eugenia Pérez González

M^a Pilar García Rodríguez

Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. Universidad Complutense de Madrid.

meperez@ghis.ucm.es

RESUMEN

El procesado de datos e imágenes de satélite es una herramienta útil para el estudio de la degradación de suelos. En este trabajo se han seleccionado imágenes de diferentes sensores para analizar algunos casos de erosión y pérdida de calidad del suelo: contaminación, pérdida de materia orgánica (incendios, deforestación), salinización, sellado, erosión e hidromorfismo. Los sensores más utilizados para este tipo de estudio son los de resolución espacial y espectral media (embarcados en los satélites Landsat, Spot, Aster, EO, etc.), los de alta resolución temporal (embarcados en los satélites Modis, NOAA, etc.) y los sensores con radar (embarcados en los satélites Envisat, ERS, etc.).

Palabras clave: teledetección, suelos, degradación.

ABSTRACT

Data processing and satellite images are a useful tool for the study of land degradation. We have selected images from different sensors to analyze some cases of erosion and loss of soil quality: pollution, loss of organic matter (fire, deforestation), salinization, sealing, erosion and hydromorphic process. The sensors used for this type of study are the average spectral and spatial resolution (embarked in Landsat, Spot, Aster, EO, etc. satellites), high temporal resolution (embarked in MODIS, NOAA, etc. satellites) and radar satellites (embarked in Envisat, ERS, etc. satellites).

Key words: remote sensing, soils, degradation.

Fecha de recepción: junio 2011.

Fecha de aceptación: diciembre 2012.

* Proyecto I+D+i CSO2012-34785.

I. INTRODUCCIÓN

Desde la década de los ochenta del pasado siglo en el que se lanzaron varios satélites aplicados a estudios de recursos naturales se ha visto que estos resultan de gran utilidad para hacer un seguimiento de problemas de degradación y erosión en suelos. En los últimos años el acceso a imágenes de diferentes sensores caracterizados por altas resoluciones espectrales, espaciales y/o temporales permite analizar estos problemas desde distintos enfoques.

La degradación de suelos representa un grave problema medio ambiental y debe ser abordado mediante información espacial actualizada. Por degradación se entiende la pérdida total o parcial de la productividad, cuantitativa o cualitativamente, como consecuencia de procesos de erosión, contaminación, agotamiento de nutrientes, etc. (FAO, 1984).

Cuadro 1
SATÉLITES, CARACTERÍSTICAS DE LOS SENSORES Y PRINCIPALES APLICACIONES EN EDAFOLOGÍA

SATÉLITE	SENSOR	TIPO DE SENSOR	RESOLUCIÓN ESPACIAL	RESOLUCIÓN ESPECTRAL	RESOLUCIÓN TEMPORAL	APLICACIÓN PRINCIPAL
LANDSAT	TM ETM	Óptico	Media	Media	Media	Sellado, salinización, erosión, hidromorfía
SPOT	HRVIR	Óptico	Media	Media	Baja	Sellado, salinización
TERRA	ASTER	Óptico	Media	Media	Media	Sellado, salinización, erosión, hidromorfía
IRS	LISS	Óptico	Media	Media	Media	Sellado, erosión hidromorfía
IKONOS	SIS	Óptico	Alta	Media	Alta	Salinización, sellado, erosión
QUICK BIRD	MS, PAN	Óptico	Alta	Media	Alta	Salinización, sellado, erosión
ORBVUEW	SeaWiFS	Óptico	Alta	Media	Alta	Sellado, erosión
NOAA	AVHRR	Óptico	Baja	Media	Alta	Erosión, incendios, pérdida de vegetación
TERRA, AQUA	MODIS	Óptico	Baja	Media	Alta	Cambios en vegetación, erosión
ENVISAT	A S A R , MERIS	Radar Óptico	Variable	Media	Alta	Humedad, salinización, contaminación
ERS	ATSR	Radar	Media	Media	Baja	Humedad, contaminación
SPACE SHUTTLE ENDEAVOR	SRTM	Radar	Media	Baja	Baja	Modelo digital del terreno
JERS	SAR	Radar	Media	Media	Baja	Humedad, contaminación
Earth Observing (EO)	ALI	Óptico	Media	Media	Media	Contaminación, salinización, sellado, hidromorfía, erosión

Fuente: elaboración propia

En este artículo se sintetizan algunas de las aplicaciones, en el campo de la edafología, de los sistemas de teledetección dedicados a recursos naturales. Aunque la diversidad de sensores embarcados en satélites medioambientales es cada vez mayor, los más utilizados en estudios de degradación se recogen en el cuadro 1 y se especifican las características de cada uno de ellos.

Al seleccionar imágenes para un determinado estudio es muy importante considerar la resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica de cada sensor. Así, los sistemas con alta resolución temporal (Modis, NOAA, Ikonos, Quick bird, Oberview, etc.) permiten hacer un seguimiento continuado de los distintos procesos que afectan al suelo: erosión, áreas afectadas por incendios, deforestación, regeneración de la vegetación, etc. lo que facilita el rápido desarrollo de planes de actuación que minimicen el impacto en el suelo. Estos sistemas suelen tener una baja resolución espacial, por lo que se emplean para estudio a escala regional o global.

Los sistemas con media y alta resolución espectral son útiles en estudios de contaminación, hidromorfía y salinización, ya que las bandas infrarrojas discriminan la humedad del suelo y las sales en superficie. Cuando los canales espectrales son estrechos y numerosos se puede detectar la presencia de contaminantes químicos. Además, algunos de estos sensores (embarcados en los satélites Landsat, Aster, NOAA o Envisat) tienen bandas en el espectro del infrarrojo térmico que son también muy útiles en el seguimiento de incendios, estrés hídrico del suelo y microclima. Estos satélites se utilizan en estudios a escala regional y local.

Los sistemas con alta resolución espacial (Spot, Ikonos, Quickbird, etc.) permiten un buen análisis del sellado, de la salinización, erosión y cambios de uso en el suelo. Se emplean en escalas locales, para estudios de detalle, ya que en algunos casos el alto coste de las imágenes hace difícil su adquisición en investigaciones de áreas extensas.

II. OBJETIVO

El objetivo del estudio es mostrar cómo, actualmente, la teledetección espacial es una técnica imprescindible para el estudio y seguimiento de algunos de los principales problemas de degradación de suelos. Para ello se han seleccionado algunas áreas afectadas por estos problemas, la mayor parte situadas en la Península Ibérica, aunque también se han seleccionado otras de diversas partes del mundo debido a su interés en temas de contaminación y pérdida de vegetación.

Se han analizado aquellos procesos de degradación en los que las imágenes de satélite pueden ofrecer mayor información: contaminación, pérdida de materia orgánica (incendios, deforestación, cambios de uso), salinización, erosión, sellado y movimientos de agua (hidromorfismo, inundaciones).

Quiere destacarse también la ventaja de la teledetección para ofrecer resultados cartográficos elaborados a partir de la captación de amplias regiones del espectro electromagnético (canales visibles, infrarrojos medios y térmicos), aunque su visualización impresa en escala de grises menoscaba su resultado. Así la cartografía temática obtenida mediante teledetección resulta complementaria a otras tecnologías de la información geográfica, pero es la única que permite detectar algunos procesos ambientales que escapan a las fotografías aéreas convencionales o imágenes elaboradas con el espectro visible.

III. MATERIAL Y MÉTODOS

El trabajo se ha realizado principalmente a partir de imágenes de satélite de resolución espacial y espectral media (Landsat y Spot). La disponibilidad de datos de estos satélites y la accesibilidad, para la adecuada selección de imágenes y fechas que permitan analizar diferentes problemas de la degradación de suelos, ha sido posible gracias al Plan Nacional de Teledetección del Instituto Geográfico Nacional.

Las imágenes seleccionadas en el presente trabajo se resumen en el cuadro 2, que ha sido ordenado por áreas geográficas:

Cuadro 2
IMÁGENES SELECCIONADAS. FUENTE NASA, 2003, USGS, 2004 E IGN, 2011

SATÉLITE	SENSOR	ESCENA	SITUACIÓN	FECHA
EO 1	ALI	189-27	HUNGRIA	09-10-2010
LANDSAT 5	TM	200-33	LA MANCHA	26-08-1995
LANDSAT 5	TM	200-33	LA MANCHA	20-02-1997
LANDSAT 5	TM	200-33	LA MANCHA	16-08-2009
SPOT 5	HRVIR	268/33	MADRID	28-06-2005
SPOT 5	HRVIR	269/35	MADRID	24-07-2005
SPOT 5	HRVIR	269/35	MADRID	06-06-2010
SPOT 5	HRVIR	268-33	MADRID (EL PARDO)	04-10-2005
SPOT 5	HRVIR	268-34	MADRID (PATONES)	25-09-2009
SPACE SHUTTLE ENDEAVOR	SRTM	n04w004	MADRID	2000
SPACE SHUTTLE ENDEAVOR	SRTM	n04w003	GUADALAJARA	2000
LANDSAT 5	TM	200-32	GUADALAJARA	18-06-2005
LANDSAT 5	TM	200-32	GUADALAJARA	24-10-2005
LANDSAT 5	TM	200-32	GUADALAJARA	18-07-2010
LANDSAT 5	TM	002-67	BRASIL	22-08-1986
LANDSAT 7	ETM+	002-67	BRASIL	04-07-2006

El software utilizado para el tratamiento de estas imágenes es ERDAS Imagine 2010. Todas las imágenes se han georreferido a coordenadas UTM y se ha sometido a diversos tratamientos espaciales (filtros de convolución: depuración de datos, sumatorio 3 x 3, reducción de ruido), radiométricos (ecualización del histograma) y espectrales (combinaciones de bandas, obtención de índices de vegetación, componentes principales, índices hidrotermales, etc.). Estos reales permiten una mejor visualización de las imágenes.

Entre los tratamientos espaciales el que ha resultado más útil para estudios de degradación de suelos es el filtro de convolución de paso alto que se obtiene multiplicando el valor de los píxeles por una matriz. La que mejor visualización ha dado es la matriz 3x3. Se ha empleado especialmente para destacar los efectos de la erosión en cárcavas. Los filtros son también útiles para resaltar estructuras lineales, como la erosión en rueros, suelos sellados

por infraestructuras viarias, etc. También la erosión queda resaltada con la mejora radiométrica efectuada mediante la ecualización del histograma. En este caso el proceso permite obtener una nueva imagen en la que los valores digitales se han modificado mediante un realce equilibrado que permite una mejor distribución de datos (Chuvieco, 2000).

Entre las mejoras espectrales las que mejor resultado han dado en los estudios de suelos son las combinaciones de bandas, índices de vegetación y componentes principales. En las combinaciones de bandas se han seleccionado aquellas imágenes que mejor resaltan los distintos procesos de degradación, resultando más apropiadas las que combinan canales del espectro visible con infrarrojos próximos. Aunque la impresión del trabajo es en blanco y negro se seleccionan combinaciones de bandas en color porque resaltan mejor, incluso en gama de grises, los procesos analizados, que la selección de una sola banda. Entre los índices de vegetación el que ofrece mejor resultado, para los sensores TM y ETM+ del Landsat, es el Índice de Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) en el que se relacionan los canales rojo e infrarrojo próximo mediante el algoritmo $NDVI = (B4 - B3) / (B4 + B3)$. La nueva imagen resalta la áreas de vegetación en tonos muy claros debido a los valores positivos del NDVI, tanto más claros cuanto mayor es la actividad clorofílica. Por el contrario, las áreas sin vegetación, zonas quemadas, etc., tienen valores muy bajos y, por tanto, tonos oscuros. Por esta razón se ha empleado para ver pérdida de vegetación por deforestación, incendios, etc.

El análisis factorial mediante componentes principales se ha empleado para discriminar suelos salinos y áreas inundadas. Resulta muy útil ya que permite sintetizar la información de todas las bandas en una sola imagen. Se han obtenido imágenes con distinto número de componentes, seleccionando aquellas en las que se consigue una mejor visualización de las áreas degradadas; si bien los primeros componentes son los que absorben la mayor parte de la varianza, son los últimos los que permiten una mejor discriminación de los suelos afectados por salinización o hidromorfismo.

Para analizar variaciones multitemporales se ha utilizado también el proceso de detección de cambios mediante la diferencia entre imágenes. Este proceso consiste en restar los valores entre dos fechas de forma que se obtiene una nueva imagen en la que se resaltan las diferencias entre ambas. Resultan muy útiles para analizar aquellos procesos que han producido modificaciones muy acusadas en las cubiertas del suelo.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se estudian los principales problemas de degradación de suelos (contaminación, pérdida de materia orgánica, salinización, sellado, erosión e hidromorfía), seleccionando imágenes de distintos satélites y sensores. Asimismo, se destacan las ventajas y límites de la teledetección en cada problema edáfico

1. Contaminación

Las actividades mineras provocan generalmente fuertes impactos ambientales, con destrucción de los suelos naturales y creación de nuevos suelos (antrosolos) que presentan importantes limitaciones físicas, químicas y biológicas, que en ocasiones dificultan la

regeneración de la vegetación original. Pero además, en algunas ocasiones se han producido accidentes que provocan una alta contaminación en los suelos de áreas circundantes. Los sistemas de teledetección espacial permiten detectar las áreas afectadas por contaminación química, siempre que ésta sea importante, como en el caso de los vertidos acaecidos en las provincias de Sevilla y Huelva (1996) debido a la rotura de una balsa con residuos de explotaciones piríticas (Antón-Pacheco *et al.* 1999), o el acaecido en Hungría (2010) con vertidos de lodos ricos en aluminio.

Dadas las repercusiones socio económicas de este último accidente, para el presente estudio se han seleccionado imágenes que permitan comprobar la utilidad de la teledetección para realizar la cartografía de los vertidos y evaluar la extensión de las zonas afectadas. Sería deseable que las administraciones públicas dispusieran de accesibilidad a imágenes de satélite y capacidad de análisis de las mismas para el seguimiento de catástrofes naturales o antrópicas, que faciliten las rápidas actuaciones que requieren cualquiera de ellas (vertidos, inundaciones, incendios, etc.). Al menos las administraciones deberían acceder con rapidez a organismos o instituciones que sí pudiesen facilitar dicha información, a partir de la cual se actuaría de forma más precisa y acertada.

El primer caso de este estudio se muestra en la figura 1, donde aparece el sector más afectado por el vertido tóxico junto a las localidades húngaras de Kolontar y Deveoser.

Figura 1
IMAGEN EO-1 ALI (BANDAS 3-2-1) DE HUNGRÍA, 9 DE OCTUBRE DE 2010 DE EURIMAGE



Fuente: Elaboración propia.

La imagen tomada por el sistema Earth Observing-1 ALI (EO-1), en fecha posterior al vertido, permite detectar con precisión la superficie dañada por la expansión de los lodos contaminados y conocer su trayectoria, pues los lodos se desplazan con rapidez por un cauce tributario del Danubio (Fig. 1). La cartografía del área contaminada por el vertido puede hacerse mediante un simple análisis visual, aunque la combinación de distintas bandas per-

mite resaltar mejor el vertido y cuantificar mejor su superficie. Para este análisis los sensores con resolución espectral y espacial media como los de la NASA, Landsat, Terra (Aster), EO, etc. resultan muy apropiados.

Las mejores combinaciones de bandas para detectar estos vertidos son aquellas que utilizan canales del espectro visible con los infrarrojos próximos y medios. Si la contaminación afecta a la vegetación también es posible establecer, mediante los sistemas de teledetección espacial tradicionales, una cartografía de las formaciones afectadas. Sin embargo, si la contaminación química es debida a un determinado elemento tóxico no observable visualmente en el terreno, sólo es posible detectarlo mediante sensores hiperespectrales transportados en aviones, ya que éstos tienen algunas bandas del espectro que muestran marcados picos de absorción de la radiación debidos a altos contenidos en contaminantes (Pb, Cu, As, etc.). En todo caso, la mayor parte de los estudios sobre contaminación puntual de un elemento químico en suelos se realizan en la actualidad mediante radiómetros de campo (Kooistra *et al.* 2003; Clevers *et al.* 2004).

2. Pérdida de materia orgánica

La pérdida de materia orgánica acelera la degradación de los suelos, ya que conduce a la desaparición de complejos húmico-arcillosos que conllevan una pérdida de estructura y por tanto debilitan la estabilidad del suelo. Esta pérdida provoca además cambios en el régimen hídrico de los perfiles y empobrecimiento en la biodiversidad de fauna y microorganismos, lo que afecta también a la estabilidad de los materiales. La ausencia de vegetación deja al suelo indefenso frente a la erosión hídrica y eólica provocando su rápida desaparición. Por tanto, es un grave problema que afecta especialmente a las áreas mediterráneas y a las zonas con climas áridos y semiáridos.

La pérdida de materia orgánica es debida fundamentalmente a tres causas: incendios, deforestación y cambios de uso en el suelo.

2.1. Incendios

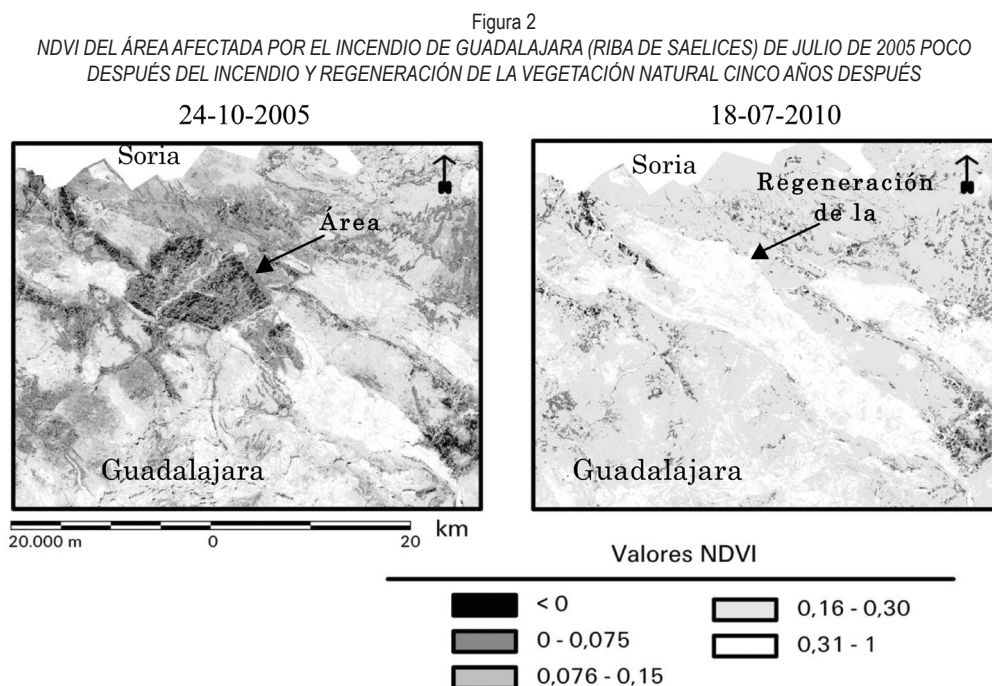
Los incendios forestales afectan más a la vegetación que al suelo, aunque éste puede también verse afectado de forma indirecta por la pérdida de la masa vegetal. Se ha discutido mucho sobre los posibles beneficios y/o perjuicios que un incendio provoca en el suelo. Evidentemente esto depende del tipo de incendio, temperatura que alcance y tiempo del mismo. Cuando el incendio afecta a los estratos vegetales más bajos, suele afectar también al suelo. Hasta una temperatura de unos 300° C el incendio beneficia químicamente al suelo, ya que le aporta nutrientes (fundamentalmente potasio), pero a partir de un umbral el incendio siempre perjudica al suelo, tanto por el deterioro de sus propiedades físicas, como por la pérdida de elementos asimilables y por una mayor posibilidad de erosión hídrica. Por eso la teledetección resultan muy útiles para hacer un seguimiento de los incendios, aunque es evidente que el interés principal está centrado en la protección civil. Las bandas térmicas nos dan información sobre la temperatura real del suelo y las bandas visibles e infrarrojas próximas y medias nos permiten evaluar el área afectada. También permiten hacer un seguimiento de las formaciones secundarias que colonizan el suelo después del incendio. Sistemas de teledetección

con alta resolución temporal como Modis y NOAA permiten un seguimiento continuado, de gran utilidad tanto para prevenir las áreas de riesgo de incendios por estrés hídrico del suelo y la vegetación, como para conocer su inmediata evolución una vez iniciado. Sistemas con resolución espectral y espacial media, como Landsat TM y ETM+ o Spot HRVIR, permiten cartografiar el área afectada.

Numerosos autores realizan trabajos sobre la importancia de los incendios en la evolución de los suelos y sobre su seguimiento mediante teledetección (Hudak y Brockett, 2004; Soja *et al.*, 2004; Miettinen y Liew, 2005; Oldford *et al.* 2006; Escuin *et al.* 2007; Miettinen, 2007; Chuvieco 2002; Chuvieco *et al.* 2008; Huesca *et al.*, 2009; Bisquert *et al.*, 2010; Segal *et al.* 2010; Bastarrika *et al.*, 2011).

Para mostrar alguna de las aplicaciones de la teledetección en incendios forestales se han seleccionado imágenes del sensor TM del satélite Landsat en un área afectada por un grave incendio en julio de 2005 en la provincia de Guadalajara (Cuadro 2). En la combinación de las bandas infrarrojas y visibles se observa que en la fecha anterior al incendio la masa forestal era muy densa. Por el contrario, tres meses después del incendio se puede ver el área quemada en tonos negros y, cinco años después, se observa como se ha recuperado gran parte de la vegetación, si bien los diferentes patrones espectrales nos indican que ésta es fundamentalmente herbácea y arbustiva frente a las anteriores masas arbóreas.

Tras el análisis digital se ha obtenido el Índice de la Vegetación de la Diferencia Normalizada (NDVI) en una fecha poco después del incendio (24-10-2005) y otra de cinco años después (18-07-2010).



Fuente: IGN, PNT y elaboración propia.

La obtención del NDVI resalta las áreas afectadas por el incendio, con valores muy bajos en toda el área quemada: los valores del NDVI en el área incendiada son negativos, oscilando entre -0.01 y -0.05 (tonos muy oscuros). Además este índice es muy eficaz para analizar la regeneración de las áreas quemadas. Así en la imagen obtenida en 2010, se puede observar la rápida recuperación de los estratos vegetales más bajos con tonos muy claros (Figura 2).

Un mes antes del incendio, en junio, los valores del NDVI estaban entre 0,2 y 0,3 y, cinco años después del incendio, en el mes de julio, la mayor parte de los valores están entre 0,3 y 0,4, alcanzando algunos puntos hasta 0,6. Esto confirma una rápida regeneración de los estratos herbáceos que son los que muestran valores más altos debido a su elevada actividad clorofílica. Los valores del NDVI de la imagen más reciente son superiores a los anteriores al incendio, por la menor presencia de estrato arbóreo frente al herbáceo y, porque en el mes de julio el desarrollo fenológico en este sector tan frío es mayor que en junio. Los índices de vegetación sirven también para analizar el riesgo de incendio en una determinada área y tomar medidas preventivas, ya que muestra todas las superficies con vegetación susceptibles de arder en caso de que se produzca el fuego y los lugares en los que sería más factible establecer contrafuegos.

La visión de la imagen en relieve, gracias a la superposición del modelo digital del terreno, muestra la difícil accesibilidad del área incendiada, dado su carácter montañoso, a lo que se añade la escasez de carreteras y caminos. Sin embargo, la débil presión demográfica de ésta ha facilitado la rápida regeneración de la vegetación natural.

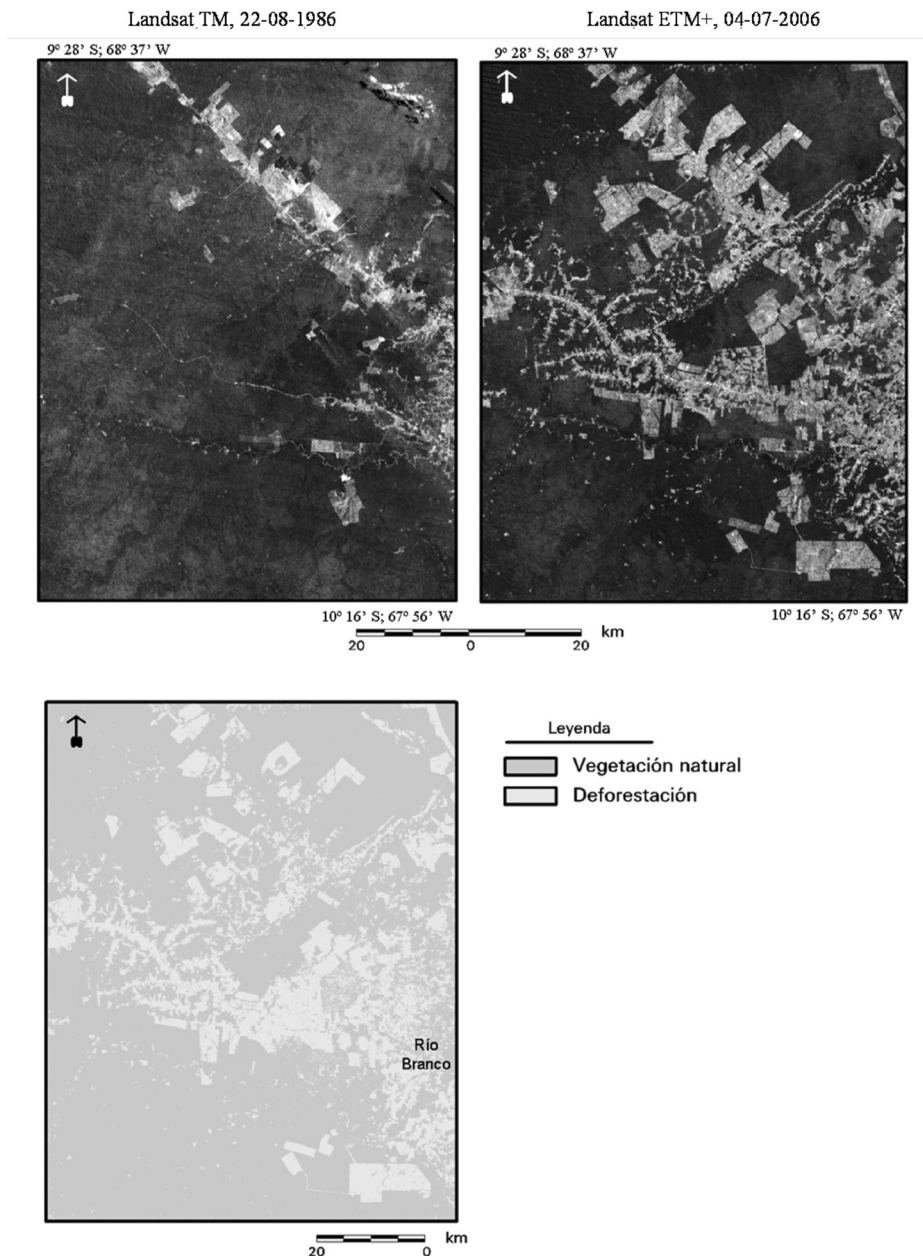
2.2. Deforestación y cambios en la vegetación

En todo el mundo amplias formaciones forestales han sido roturadas o quemadas con el fin de dejar tierras libres para cultivo y/o pastos. Para estudiar la deforestación de grandes masas vegetales es conveniente utilizar sistemas de teledetección que tengan una alta resolución temporal y una baja resolución espacial, lo que permite hacer un seguimiento continuado de amplias áreas. Las deforestaciones más significativas corresponden a las pluviisilvas ecuatoriales y tropicales (en especial las regiones amazónicas y las selvas de Borneo) y también a las grandes masas de coníferas de latitudes frías. En ambos casos los satélites de la agencia oceanográfica NOAA y los satélites Modis resultan muy útiles, en particular empleando los índices de vegetación calculados a partir de sus imágenes. La presencia continuada de nubes en dichas latitudes impide en muchas ocasiones obtener datos, por lo que en estas áreas es aconsejable también utilizar imágenes captadas por radar como las de los satélites ERS y Envisat (Czaplewski, 2003; Ichii *et al.*, 2003; Espírito-Santo *et al.*, 2005; Ingram y Dawson, 2005; Ferreira *et al.* 2007, etc.).

Para el presente trabajo hemos seleccionados un área de la pluviisilva tropical en Sudamérica con el fin de comparar las diferentes pérdidas de vegetación. La figura 3 muestra dos imágenes Landsat TM y ETM+ en escala de grises del color natural (bandas 3-2-1, R-V-A) de 1986 y 2006 en la cuenca amazónica del oeste de Brasil, en las proximidades del municipio de Rio Branco, cerca de la frontera con Bolivia. Esta combinación, aún impresa en escala de grises, resalta mejor la deforestación, incluso que la imagen del NDVI. Comparando ambas imágenes se observa como en el corto intervalo de 20 años la pérdida de masa forestal ha sido muy grande, debido a la construcción de infraestructuras viarias, ampliación

Figura 3

IMÁGENES LANDSAT. EN ELLAS SE OBSERVA LA DEFORESTACIÓN DEL BOSQUE TROPICAL, EN BRASIL, CERCA DE LA FRONTERA CON BOLIVIA Y PERÚ. LA IMAGEN DE LOS CAMBIOS ENTRE AMBAS FECHAS (BANDA 5) PERMITE CONOCER LA SUPERFICIE DEFORESTADA



Fuente: GLCF y elaboración propia.

de áreas urbanas y a que parte de la antigua selva se ha roturado y/o quemado (de hecho en la imagen de 1986 se observan penachos de humo) para poder cultivar en pequeñas parcelas. Así, aparecen en tonos oscuros y formas disimétricas las masas forestales, en tonos claros y formas geométricas las parcelas con cultivos y en tonos muy oscuros, casi negros, las áreas selladas por edificios o infraestructuras viarias. La tercera imagen de esta figura se ha obtenido mediante el algoritmo de detección de cambios entre ambas fechas: se calcula restando los valores digitales de las imágenes de la banda 5 en las dos fechas. En la nueva imagen quedan claramente dibujadas las superficies que han cambiado de uso, en este caso las áreas deforestadas aparecen en tonos muy claros. Si se mide el área de estudio resulta que, en una superficie de 725.201,1 hectáreas, en estos veinte años se han deforestado 173.417,4 hectáreas lo que representa un 23,9 % del territorio analizado. Sirva este sector brasileño de muestra del grave problema de la deforestación de bosques ecuatoriales, especialmente en áreas fronterizas; aunque las imágenes de satélite también permiten evaluar el estado de los sectores más inaccesibles del interior brasileño sin apenas pérdida de masa vegetal.

Los satélites de recursos naturales no sólo permiten medir la deforestación de grandes superficies, sino que también es posible detectar cambios más pequeños a partir del tratamiento digital de las imágenes. Para conocer los problemas de deforestación en superficies menores es preferible realizar en las imágenes el NDVI. Los valores muy bajos de NDVI (áreas sin vegetación) destacan siempre en las imágenes con tonos muy oscuros, por lo que la pérdida de masa forestal puede localizarse y cuantificarse en cualquier territorio.

Frente a la deforestación acaecida habitualmente en latitudes altas y bajas, en latitudes medias nos encontramos con frecuencia el proceso contrario. En países desarrollados muchas de las tierras dedicadas a cultivos o pastos para la ganadería han sido abandonados debido a la despoblación rural. Estas tierras son de nuevo conquistadas por formaciones vegetales arbustivas y, con el tiempo, arbóreas. Este proceso de sucesión secundaria es posible seguirlo paso a paso en la actualidad mediante la utilización de imágenes multitemporales. A diferencia de las grandes deforestaciones, estos procesos de colonización se producen sobre todo a escala local, por lo que es aconsejable utilizar sistemas de teledetección que tengan una mayor resolución espacial, como los sensores de Landsat o Spot, ambos embarcados en satélites desde los años 80 y vigentes en la actualidad, por lo que disponemos de imágenes de más de 30 años, que permiten hacer estudios detallados de todo el proceso de sucesión y cuantificar las áreas regeneradas, así como determinar el tipo de formaciones que colonizan las diferentes superficies y el tiempo que tardan en ocupar estos espacios.

3. Salinización

El uso de imágenes de satélite para cartografiar y analizar los suelos salinos resulta complicado, ya que las sales no siempre se reflejan en superficie y tienen gran diversidad en cuanto a su naturaleza y forma de presentarse en ella. Aún así, numerosos autores las emplean para estudiar este tipo de suelos. Entre ellos destacan los trabajos de Hick y Russell (1990), Rao y Venkataratnam (1991), Mougenot (1993), Dwivedi (1996), Kalra y Kalra (1996), Metternicht y Zinck (1997 y 2003), Peng (1998) Dwivedi *et al.* (1999), Goossens *et al.*, 1999, Schmid (2004), Pérez y García (2005), Pérez *et al.* (2006), García *et al.* (2007), Kienast-Brown *et al.* (2007), García y Pérez (2010), etc.

Los satélites de resolución espacial media, como el Landsat, permiten detectar, en algunas fechas, las eflorescencias salinas, que en la mayor parte de los casos corresponden a suelos salinos (solonchaks y/o solonetz). Esto resulta muy útil para discriminar áreas susceptibles de sufrir salinización, lo que reduce el trabajo de campo. No obstante se requieren datos analíticos de los perfiles de suelos que confirmen los datos de las imágenes.

El análisis multitemporal de imágenes de satélite permite estudiar los cambios que han sufrido los suelos salinos, tanto en su uso como en su calidad. Al comparar imágenes de distinta época se observa que muchos de los suelos afectados por salinización se han dejado de cultivar. En los climas áridos y semiáridos (como el mediterráneo) es la época estival la idónea para analizar los suelos salinos, pues las sales alcanzan la máxima extensión en superficie y apenas existe vegetación que interfiera en su discriminación.

Las firmas espectrales de los suelos salinos muestran valores digitales muy altos, lo que permite diferenciarlos de otros tipos de suelos y cubiertas superficiales. Entre los suelos salinos los valores espectrales más altos corresponden a los que tienen eflorescencias salinas en superficie y los más bajos a los suelos afectados por hidromorfismo. El satélite Landsat resulta muy útil para hacer estudios sobre salinización debido a que tiene siete u ocho bandas espectrales (sensores TM y ETM+ respectivamente). Diferentes combinaciones de estas bandas permiten resaltar los suelos ricos en sales, siempre que las eflorescencias aparezcan en superficie. De todas ellas para separar los suelos con alto contenido en sales destacan las combinaciones 5-3-1, 2-1-7, 4-3-2 y, sobre todo, 3-1-7, utilizando siempre algunos canales del visible y el infrarrojo medio. Como bandas individuales las que mejor permiten discriminar los suelos salinos son las bandas correspondientes a los canales del visible azul y verde, bandas 1 y 2. De todas las operaciones y mejoras efectuadas en las imágenes con el fin de obtener una buena cartografía de los suelos salinos, la que mejor los discrimina ha sido la mejora espectral mediante componentes principales (García y Pérez, 2010).

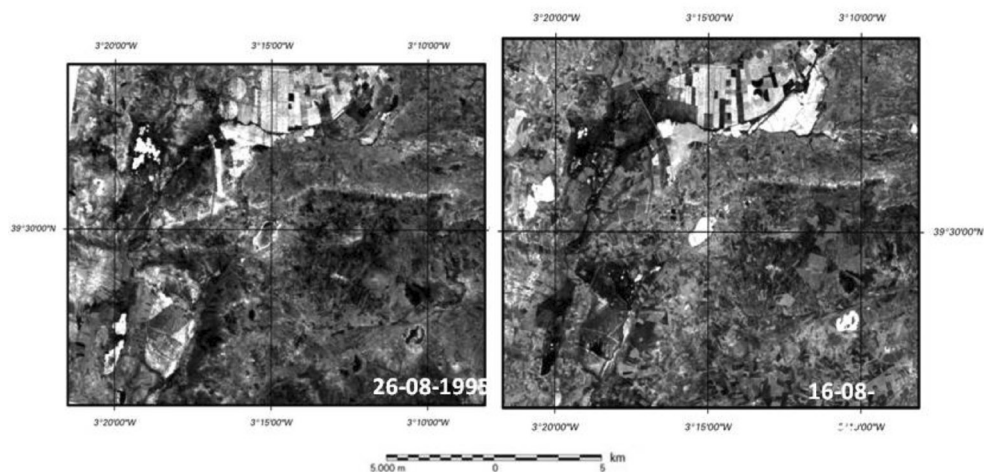
Para estudiar este problema se ha seleccionado un área de Castilla La Mancha con numerosas lagunas salinas y suelos afectados por salinización. Aunque los suelos salinos aparecen puntualmente por toda la Comunidad, adquieren su máxima extensión e importancia en la Cuenca Alta del río Guadiana, especialmente en el área comprendida entre los ríos Riánsares, Cigüela y Záncara, por lo que se ha escogido este sector como área piloto. Las áreas de regadío de Castilla La Mancha corren un alto riesgo de desertificación, ya que la extracción de agua mediante bombas es superior a la capacidad que tienen los acuíferos de recargarse, lo que en muchos sectores conduce a la formación de suelos salinos.

Las variaciones naturales y antrópicas en los niveles de agua, así como el manejo de los suelos, en un clima semiárido con intensa evaporación, arrastran en ocasiones las sales a superficie. La presencia de eflorescencias superficiales en los meses de verano y la vegetación halófila permiten distinguir, a partir de las imágenes de satélite, las áreas afectadas por salinización, si bien existen numerosos problemas para detectarlas cuando las sales retienen mucha humedad.

En la figura 4 se muestran dos imágenes Landsat de un área salina en la comarca de La Mancha (Toledo) en un año de gran sequía (1995) y en un año húmedo (2009), ambas correspondientes al mes de agosto. Si se comparan las dos imágenes se observa que las lagunas de aguas dulces (de origen básicamente fluvial) aparecen en tonos blancos en el año 95, de intensa sequía, debido al estrés hídrico del suelo y a la presencia de yesos u otras sales en

Figura 4

IMÁGENES LANDSAT TM, BANDA 1. EN EL VERANO DE 1995, TRAS UNA INTENSA SEQUÍA, LAS LAGUNAS MUY CLARAS, CON ALTOS VALORES DIGITALES SÓLO REFLEJAN UN SUELO MUY SECO, SIMILAR AL DE LAS PARCELAS DE CULTIVO O ESCARPES; MIENTRAS QUE, EN LAS LAGUNAS HIPERSALINAS SE PRODUCEN CRISTALES SALINOS MUY GRANDES, HIGROSCÓPICOS, QUE OFRECEN TONOS OSCUROS EN LAS IMÁGENES DE SATELITE (HUMEDAD). POR EL CONTRARIO, EN EL VERANO DE 2009, AÑO HÚMEDO, LAS LAGUNAS DULCES CON AGUA REFLEJAN TONOS MUY OSCUROS Y LA MAYOR PARTE DE LAS LAGUNAS HIPERSALINAS MUESTRAN TONOS MUY CLAROS, PUES LA FORMACIÓN DE CRISTALES MÁS PEQUEÑOS, APENAS RETIENEN HUMEDAD. TAMBIÉN, NUMEROSAS PARCELAS DE CULTIVO LOCALIZADAS EN LLANURAS DE INUNDACIÓN TIENEN VALORES DIGITALES MUY ELEVADOS, CARACTERÍSTICOS DE SUELOS SECOS.



Fuente: INTA, IGN-PNT y elaboración propia.

superficie; mientras que en el año hidrológicamente húmedo (2009) se observan estas lagunas en tonos oscuros debido a la presencia de agua y vegetación hidrófila.

Por el contrario y frente a lo que cabría esperar, las lagunas con mayor salinidad (Tirez, Peña Hueca y Quero en Toledo) reflejan tonos oscuros en años secos (1995) y blancos en los húmedos (2009). Para la correcta interpretación de los suelos salinos mediante teledetección debe analizarse también los valores espectrales, pues las imágenes visibles pueden conducir a interpretaciones erróneas. Los números digitales de los humedales salinos en un verano húmedo son altos en las bandas 1 a 4 y bajos en las 5 y 7, lo que indica sales en superficie, pero también un alto contenido de humedad subsuperficial. Por tanto, el carácter higroscópico de los cristales juega un papel importante en la interpretación visual.

El problema en la interpretación se presenta porque no todas las lagunas hipersalinas se reflejan igual, pues su aspecto varía en función del tamaño y tipo de los cristales salinos, presencia de aguas subterráneas o subsuperficiales, de materia orgánica en descomposición (sapropel), etc.

Al comparar la respuesta espectral de los humedales salinos con algunas parcelas de cultivo (sin cereal en esa fecha) puede afirmarse que muestran valores muy similares, por lo que cabe esperar unas condiciones de humedad-aridez y presencia de sales similar. Gran parte de

la amplia llanura de inundación del Cigüela está formada por fluvisoles, gypsisoles y solonchacks, por lo que los regadíos aceleran con frecuencia la presencia de sales en superficie.

Debe destacarse que algunos los humedales hipersalinos están muy manejados por el hombre, con sustracciones de su lámina de agua para acelerar la cristalización de las sales y su posterior aprovechamiento. Las variaciones naturales y las antrópicas deben conocerse para la correcta interpretación y/o extrapolación de resultados, por lo que el trabajo de campo en estos ámbitos resulta imprescindible.

4. Sellado

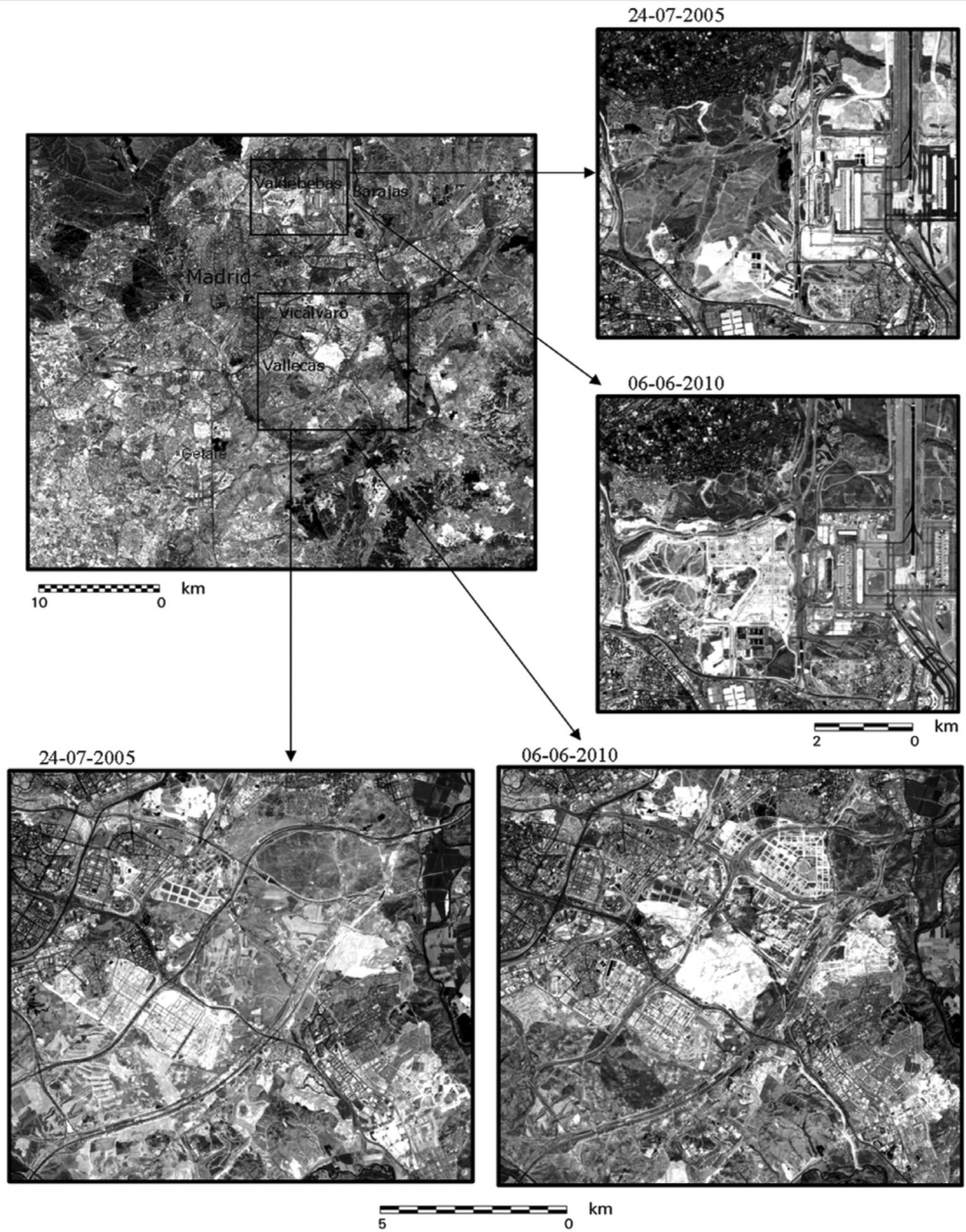
El auge de la construcción en las últimas décadas del pasado siglo y primeros años del actual ha conducido a un gran incremento del sellado de los suelos en las proximidades de las grandes ciudades y en las zonas costeras. El desarrollo urbanístico que implica la construcción de numerosas viviendas, edificios de oficinas, industrias e infraestructuras viarias es el responsable de que el sellado sea la mayor causa de degradación de suelos en España. El sellado es un problema prácticamente irreversible ya que, una vez que se han sellado, estos suelos pierden toda su capacidad como elemento del ecosistema que juega un papel importante en los ciclos de la vida. Además, afecta con más frecuencia a los suelos más fértiles, ya que históricamente muchas poblaciones se asentaron en los valles de los ríos, edificando en sus llanuras de inundación, también ocupadas por las vías de comunicación a favor de los suelos con menor pendiente. Aunque la Unión Europea se ha sensibilizado con este problema señalando la necesidad de establecer políticas de protección de suelos que limiten el sellado, en los últimos años la desaparición de estos suelos se ha acelerado a espaldas de la normativa existente, pese a los altos riesgos antrópicos y medioambientales que esto produce.

Numerosos autores han realizado investigaciones sobre el sellado del suelo en las proximidades de grandes ciudades (Effland y Pouyat, 1997; Nizeyimana *et al.*, 2001; Castillo *et al.*, 2004; Van-Camp *et al.*, 2004; Biasioli *et al.*, 2006; Bouma, 2006; Naredo y García, 2008; García y Pérez, 2007 y Scalenghe y Ajmone-marsan, 2009) y los efectos que esto conlleva, tanto por modificaciones en los diferentes elementos de los ecosistemas, como por costes sociales o estableciendo modelos de desarrollo urbano en relación a la capacidad potencial de uso agrícola de los suelos, el grado de urbanización de los distintos municipios y su clasificación urbanística (García Alvarado, 1997 y 2000).

La teledetección es una gran herramienta para analizar la evolución del sellado y cuantificar su extensión. Para áreas muy concretas se pueden emplear satélites de alta resolución espacial, como Quick bird o Ikonos. Pero para hacer estudios a escala municipal o regional son más adecuados los satélites de resolución espacial media como Irs, Spot o Landsat. Para detectar los suelos sellados es conveniente utilizar combinaciones de bandas que incluyan canales visibles e infrarrojos próximos o medios. Así, si se utilizan imágenes de los satélites Landsat las combinaciones de bandas que discriminan mejor los suelos sellados son la mezcla 5-3-1, 5-3-2, y 7-5-1. Si se utilizan imágenes del satélite Spot la mejor combinación es la 4-3-2.

En la figura 5 se muestran imágenes Spot del área metropolitana de Madrid en los años 2005 y 2010. Resaltan con formas geométricas y tonos grises los suelos sellados con construcciones y en tonos muy blancos aquellos suelos removidos en los que aún no ha comen-

Figura 5
IMÁGENES SPOT 5, BANDAS 4-3-2 (R-V-A). LOCALIZACIÓN Y DETALLE DE LOS SUELOS SELLADOS



Fuente: IGN, PNT y elaboración propia.

zado la edificación. Comparando ambas fechas se puede ver la rápida evolución del sellado en las proximidades de Barajas y de Vallecas debido a la construcción de nuevos barrios durante estos años.

5. Erosión

Un problema importante en el área mediterránea es la erosión del suelo debido a diversos factores, entre ellos, el tipo de precipitaciones que ocasionan lluvias torrenciales en cortos periodos de tiempo que afectan a los suelos poco protegidos por la vegetación y situados en fuertes pendientes. Así la escorrentía superficial puede provocar importantes procesos de acarreamiento en materiales fácilmente deleznable como arenas y arcillas. La erosión laminar es más importante en las áreas cultivadas, mientras que en los sectores en pendiente, como bordes de las superficies de páramo y rañas, domina la erosión en regueros. La teledetección, resulta especialmente útil para el estudio de la erosión en zonas semiáridas donde hay poco recubrimiento vegetal.

Numerosos autores han trabajado en ello, tanto desde el punto de vista de la edafología como de otras ciencias de la tierra afines (Dwivedi *et al.* 1997; Mathieu *et al.* 1997; Haboudane *et al.* 2002; King *et al.* 2005; Begueira, 2006; Carpintero-Salvo *et al.* 2007; Mathieu *et al.* 2007; Liberti *et al.* 2009, etc.).

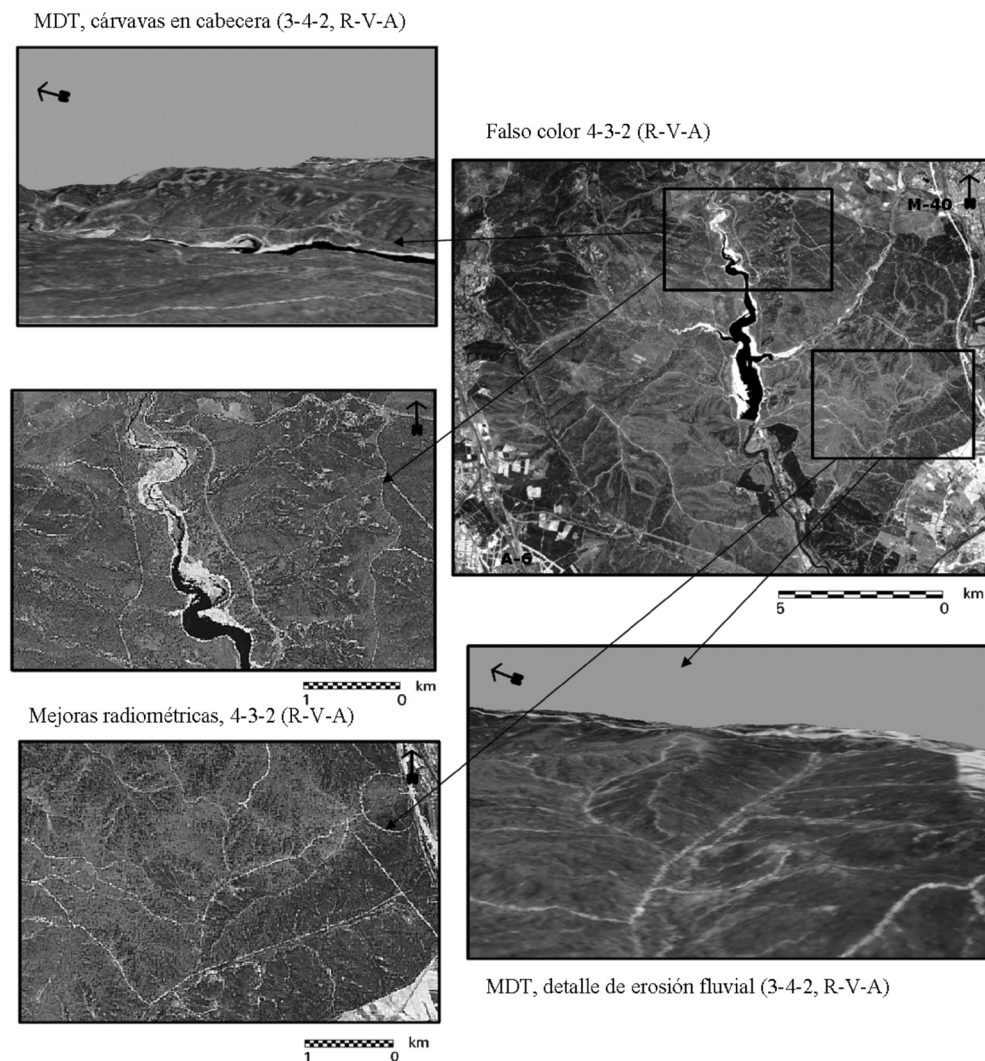
Se han seleccionado dos áreas para estudiar este fenómeno: la primera en las formaciones arenosas terciarias de la cuenca del Tajo y otra en los piedemontes de la sierra madrileña. En los dos sectores madrileños se ha superpuesto el modelo digital del terreno, para destacar mejor las pendientes acarreadas.

En la figura 6 se observa la formación de cárcavas en los arenosoles del monte de El Pardo (Madrid). Este monte posee un bosque mediterráneo de gran valor ecológico, con numerosas especies animales y vegetales, bajo un estrato de encinas que, en algunos puntos, alcanzan gran espesor. Pertenecen al Parque Regional de la Cuenca Alta del Manzanares, por lo que goza de protección legal. Además es zona de Protección Especial de las Aves (Zepa) y su gestión corresponde al Patrimonio Nacional. Aún estando en la actualidad en su mayor parte vallado y con acceso al tráfico rodado prohibido (y en parte también a pie) se pueden observar importantes procesos erosivos en aquellos sectores en los que los estratos vegetales apenas recubren los suelos, entre los pies de las encinas, pues el sustrato formado principalmente por arcosas es fácilmente alterable. Una vez iniciado el proceso erosivo los delgados suelos existentes son rápidamente erosionados. Estos procesos, más señalados en las cabecezas de los pequeños arroyos, lavan los materiales finos provocando la formación de cárcavas.

Un sistema de teledetección muy apropiado para estudiar estos procesos es el Spot, ya que su resolución espacial de 10 m lo hace muy adecuado para la observación de estos fenómenos. Para detectar las cárcavas es aconsejable utilizar mejoras espaciales como filtros que permiten resaltar las áreas erosionadas. De estos filtros los que han resultado más útiles en este caso son los filtros de convolución.

En la figura 6 se muestran varias imágenes sobre un modelo digital del terreno, mejoradas por estos filtros de convolución y con una mejora radiométrica mediante la eualización del histograma. En ellas, se observa claramente en tonos más oscuros las áreas con vegetación bien desarrollada, mientras que en tonos claros (grises o blancos) aparecen los suelos afecta-

Figura 6
IMÁGENES SPOT 5 DEL MONTE DEL PARDO, MADRID DEL 4-10-2005

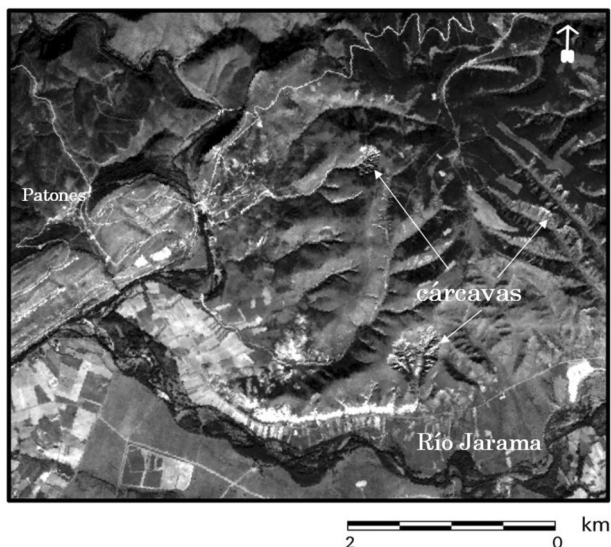


Fuente: IGN, PNT y elaboración propia.

dos por erosión, mostrando patrones espaciales irregulares, muy vinculados al desarrollo de las redes fluviales, de tipo dendrítico poco denso característico de las arcosas.

La incidencia de la erosión fluvial se puede observar también la figura 7 en un área situada en el Norte de Madrid, al este del municipio de Patones en la vertiente sur del Sistema Central (Somosierra). Los sectores más expuestos a la erosión se sitúan en el piedemonte de

Figura 7
IMÁGENES SPOT 5 DEL NORTE DE MADRID, BANDAS 3-4-2 (R-V-A), 25-09-2009



Fuente: IGN, PNT y elaboración propia.

la sierra, en los conos aluviales, y en las laderas de la raña y, se identifican visualmente por su patrón espacial, con redes pinnadas.

En este caso se ha seleccionado una imagen del satélite Spot 5 con la combinación de bandas 3-4-2 y se ha recortado el área más afectada por la erosión, obteniendo una imagen mejorada espacialmente mediante un filtro sumatorio 3x3.

En la figura 7 se observa el contraste entre las áreas acarcavadas, en tonos muy claros y aquellas que tiene un buen sustrato vegetal que frena la erosión, en tonos oscuros.

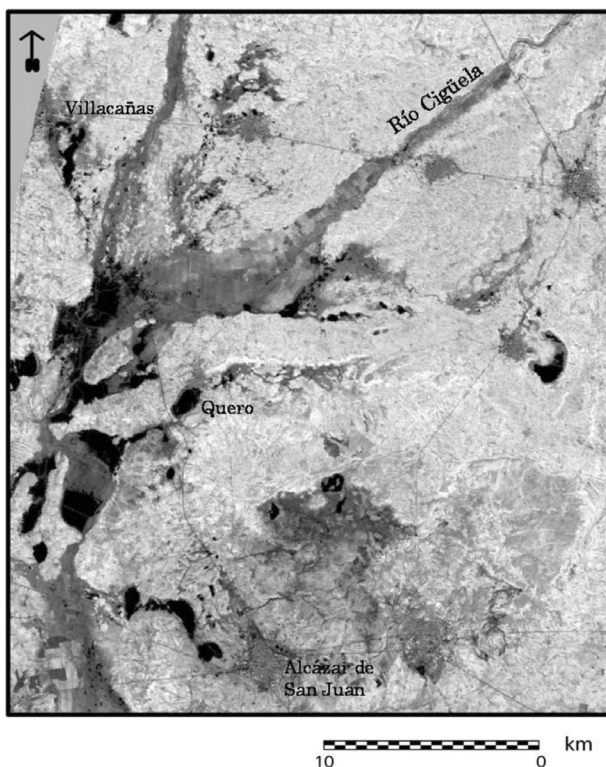
6. Hidromorfía

Otra aplicación importante de la teledetección es la relacionada con contenido y movimiento del agua en el suelo. Los satélites con rádar y aquellos que tienen canales en el infrarrojo térmico obtienen datos sobre contenido en humedad y procesos de hidromorfismo. Los sistemas ópticos con canales visibles e infrarrojos son adecuados para delimitar áreas susceptibles de ser inundadas y aquellas que ya han sido afectadas por proceso de inundación.

En el presente estudio se ha seleccionado el sector de la confluencia de los ríos Rián-sares y Cigüela para localizar áreas inundables. Estas áreas son difíciles de cartografiar por métodos tradicionales debido a la planitud de las tierras que atraviesan y escasa fuerza erosiva de estos ríos (García y Pérez, 2003). La adecuada selección de fechas permite delimitar con precisión las áreas más afectadas por inundación, originadas por ocasionales pero intensas precipitaciones horarias, características de los climas mediterráneos. En la comarca de La Mancha, varios han sido los episodios de inundaciones importantes (30-jun-1989,

Figura 8

IMAGEN LANDSAT DEL 20/02/1997 DEL SEXTO COMPONENTE PRINCIPAL. DESTACAN LAS LÁMINAS DE AGUA SUPERFICIALES EN NEGRO Y LAS ÁREAS INUNDABLES EN GRIS OSCURO. EXISTEN AMPLIOS SECTORES DE LA RED FERROVIARIA Y NÚCLEOS RURALES ASENTADOS EN SUELOS CON ALTO RIESGO DE INUNDACIÓN



Fuente: IGN, PNT y elaboración propia.

20-25/may/2007 o 16/jun-2009), alguno de ellos con graves consecuencias para la población, (<http://inundacionesenalcazar.wordpress.com/>).

De los tratamientos digitales a los que se ha sometido la imagen se ha seleccionado la mejora espectral mediante componentes principales, por ser la que mejor discrimina la superficie inundable en tonos muy oscuros (lagunas, llanura de inundación y otros sectores inundables). Esta comarca manchega de igual planitud que otras próximas presenta más riesgo de inundación por la presencia de depósitos arcillosos de gran potencia y, por tanto, de muy baja permeabilidad.

En la actualidad se dispone de numerosas imágenes de satélite que han cartografiado importantes inundaciones (tanto de sensores ópticos como de radar) y que procesan las imágenes casi en tiempo real, pero sería deseable que los organismos públicos utilizaran los datos de los satélites para una óptima ordenación del territorio impidiendo asentamientos en áreas de riesgo y, evitando así, las graves consecuencias que estas catástrofes acarrearán.

V. CONCLUSIONES

Los datos de los sistemas de teledetección embarcados en satélite y las imágenes que de ellos se obtienen son un instrumento muy útil en los estudios de degradación de suelos.

Los procesos que mejor se pueden estudiar con estas imágenes son: contaminación, pérdida de materia orgánica (incendios y deforestación), salinización, sellado, erosión e hidromorfismo.

Los distintos tipos de resolución (espacial, espectral y temporal) son fundamentales para realizar los diferentes estudios edafológicos y, la elección de uno u otro depende de la escala de trabajo y variables a analizar.

Los sistemas de teledetección más empleados en la actualidad para estudios regionales y locales son los de resolución espacial y espectral media. Con ellos, los problemas de degradación de suelos que mejor pueden analizarse son: el sellado, la contaminación, la erosión y el hidromorfismo.

Los sensores de alta resolución temporal se utilizan para estudios a escala global y análisis de procesos muy dinámicos, entre los que destacan incendios e inundaciones.

Los satélites con alta resolución espacial, aunque útiles, resultan en general bastante caros, de forma que con frecuencia no compensa el gasto para este tipo de estudios.

Es fundamental emplear sensores que tengan tanto en el espectro visible como en los infrarrojos. El desarrollo de nuevos sensores hiperespectrales facilitará los estudios de contaminación y pérdida de calidad de suelo. Cada vez se emplean más los satélites con radar, ya que son independientes de las condiciones atmosféricas.

El uso de la teledetección debe ir acompañado, siempre que sea posible, de estudios de campo y laboratorio.

Aunque la investigación en teledetección está bastante desarrollada, —con múltiples aplicaciones territoriales e idónea para la detección, evaluación y seguimiento de amplios problemas ambientales—, todavía está lejos de ser utilizada ampliamente en la gestión del territorio. Por ello, queda la ardua tarea de familiarizar a las administraciones públicas con las diversas tecnologías de la información geográfica, hecho que se produce en España de forma muy desigual.

VI. AGRADECIMIENTOS

Algunas de las imágenes Spot y Landsat utilizadas en este trabajo han sido facilitadas por el Instituto Geográfico Nacional, dentro del Plan Nacional de Teledetección.

Este trabajo ha sido realizado dentro del Proyecto nº 82, UCM, 2011-2012.

VII. BIBLIOGRAFÍA

ANTÓN PACHECO, C.; GUMIEI, J.C.; DE MIGUEL, E.; LÓPEZ, E.; GÓMEZ, J.A.; JIMÉNEZ, M.; REJAS, J.G.; GUTIÉRREZ, O.; BARETTINO, D. y ORTIZ, G. (1999): «Cartografía del vertido de lodos de la mina de Aznalcóllar mediante imágenes Daedalus ATM». *Revista de Teledetección*, 12,1-6.

- BASTARRIKA, A.; CHUVIECO, E.; MARTÍN, M.P. (2011): «Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors». *Remote Sensing of Environment*, on line, doi:10.1016/j.rse.2010.12.005.
- BEGUEIRA, S. (2006): «Identifying erosion areas at basin scale using remote sensing data and GIS, a case study in a geologically complex mountain basin in the Spanish Pyrenees». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 27, 4585-4598.
- BISQUERT, M.; SÁNCHEZ, J.M.; CASELLES, V.; PAZ M.I. y LEGIDO J.L. (2010): «Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor TERRA_MODIS». *Revista de Teledetección*, 33, 80-91.
- BIASIOLI, M.; BARBERIS R. AND AJMONE F. (2006): «The influence of a large city on some soil properties and metals content». *Sci. Total Environ.* 356, 154-164.
- BOUMA, J. Soil functions and land use. En CERTINI, G. and SCALENGHE R. (Edit.). (2006): *Soils Basic Concepts and Future Challenge*, Cambridge. Cambridge University Press, 211-221.
- CARPINTERO-SALVO, I.; CHICA OLMO, M.; RIGOL SÁNCHEZ, J.P.; PARDO IGUZQUIZA, E. y RODRÍGUEZ GALIANO, V. (2007): «Aplicación de imágenes ASTER y ETM+ para el estudio de la susceptibilidad a la erosión en una zona semiárida (SE España)». *Revista de Teledetección*, 28, 13-23.
- CASTILLO, V.; VANDEKERCKHOVE, L.; JARMAN, R. (2004): *Working Group on Soil Erosion Introduction. Final report*. European Commission, 23 pp.
- CHUVIECO, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial*. Rialp. Madrid. 568 pp.
- CHUVIECO, E. (2002). *Teledetección ambiental: La Observación de la Tierra desde el espacio*. Ed. Ariel.
- CHUVIECO, E.; ENGLEFIELD, P.; TRIKHENKO, A.P. y LUO. (2008): «Generation of long time series of burn area maps of the boreal forest from NOAA-AVHRR composite data». *Remote Sensing of Environment*, 112, 2381-2396.
- CLEVERS, J.G.P.W.; KOOISTRA, L. y SALAS, E.A.L. (2004): «Study of heavy metal contamination in river floodplains using the red-edge position in spectroscopic data». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 25, 19, 3883-3895.
- CZAPLEWSKI, R.L. (2003): «Can a sample of Landsat sensor scenes reliably estimate the global extent of tropical deforestation?». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 24, 6, 1409-1412.
- DWIVEDI, R.S. (1996): «Monitoring of Salt-affected soils of Indo-Gangetic alluvial plains using principal component analysis». *Int. Journal of Remote Sensing*, 17, 1907-1914.
- DWIVEDI, R.S.; KUMAR, A.B. y TEWARI, K.N. (1997): «The utility of multisensory data for zapping eroded lands». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 18, 2303-2318.
- DWIVEDI, R. SREENIVAS, K and RAMANA, K.V. (1999): «Inventory of salt-affected soils and waterlogged area: a remote sensing approach». *Int. Journal of Remote Sensing*, 20, 1589-1599.
- EFFLAND, W.R. y POUYAT, R.V. (1997): «The genesis, classification, and mapping of soils in urban areas». *Urban Ecosyst.*, 1, 217-228.
- ESCUIN, S.; NAVARRO, R. y FERNÁNDEZ, P. (2007): «Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from Landsat TM/ETM images». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 29, 4, 1053-1073.

- ESPÍRITO SANTO, F.D.B.; SHIMABUKURO, Y.E. y KUPLICH, T.M. (2005): «Mapping forest successional stages following deforestation in Brazilian Amazonia using multi-temporal Landsat images». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 26, 3, 635-642.
- F.A.O. (1984): *Directrices para el control de la degradación de los suelos* FAO, Roma, 38 p.
- FERREIRA, N.C.; FERREIRA, L.G.; HUETE, A.R. y FERREIRA, M.E. (2007): «An operational deforestation zapping system using MODIS data and spatial context análisis». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 28,1, 47-62.
- GARCÍA ALVARADO, J.M. (1997): «Propuesta teórico-metodológica para la valoración de la calidad urbano ambiental». *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 17, 11-25.
- GARCÍA ALVARADO, J.M. (2000): «Capacidad potencial de uso agrario y urbanización: contribución a la geografía de la sostenibilidad de la región de Madrid». *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 419-436.
- GARCÍA, M.P. y PÉREZ, M.E. (2003): «Evolución del paisaje en la Cuenca baja del río Jarama». *Observatorio Medioambiental*, 6, 177-193.
- GARCÍA, M.P. y PÉREZ, M.E. (2007): «Changes in soil sealing in Guadalajara: Cartography with Landsat images». *Science of the Total Environment*, 378, 209-213.
- GARCÍA, M.P. y PÉREZ, M.E. (2010): «Cartografía mediante imágenes Landsat de suelos salinos en la «Tierra de Medina» (Valladolid)». *Estudios Geográficos*, LXXI, 161-176.
- GARCÍA RODRÍGUEZ, M. P. PEREZ GONZÁLEZ, M.E. y GUERRA ZABALLOS, A. (2007): «Mapping of salt-affected soils using TM images». *International Journal of Remote Sensing*, 18, 12, 2713-2722.
- GOOSSENS, R., ALAVI, S.K., DE DAPPER, M. and KISSYAR, O. (1999): «The use of thermal band of Landsat TM for the study of soil salinity in Iran (Ardakan area) and Egypt (Ismailia province)». *Proceed. Internt. Conf. On Geoinformatics for Natural Resource Assessment, Monitoring and management. Ind. Ins. of Remote Sensing*, 454-459.
- HABOUDANE, D.; BONN, F.; ROYER, A.; SOMMER, S. Y MEHL, W. (2002): «Land degradation and erosion risk mapping by fusion of spectrally based information and digital geomorphometric attributes». *Intern Journal of Remote Sensing*, 23, 3795-3820.
- HICK, P.T. y RUSSELL, W.G.R. (1990): «Some spectral considerations for remote sensing of soil salinity». *Australian Journal of Soil Research*, 28, 417-431.
- HUDAK, A.T. y BROCKETT, B.H. (2004): «Mapping fire scars in a southern African savannah using Landsat imagery». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 25,16, 3231-3243.
- HUESCA, M.; GONZÁLEZ-ALONSO, F.; CUEVAS, J.M. y MERINO-DE-MIGUEL, S. (2009): «Comparación de dos algoritmos para la estimación de áreas quemadas a partir de imágenes MODIS. Aplicación a los incendios de Canarias de Julio 2007». *Revista de Teledetección*, 31, 23-34.
- ICHII, K.; MARUYAMA, M. y YAMAGUCHI, Y. (2003): «Multi-temporal analysis of deforestation in Rondônia state in Brazil using Landsat MSS, TM, ETM+ and NOAA AVHRRR imagery and its relationship to changes in the local hydrological». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 24, 22, 4467-4479.
- IGN Plan Nacional de Teledetección 2011 PNT_landsat-5_TM y spot-5_HRVIR.

- INGRAM, J.C. y DAWSON, T.P. (2005): «Technical Note: Inter-annual analysis of deforestation hotspots in Madagascar from high temporal resolution satellite observations». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 26, 7, 1447-1461.
- KALRA, N.K. y KALRA, D.C. (1996): «Potentiality of Landsat, Spot and IRS satellite imageries for recognition of salt affected soils in Indian arid zone». *Intern. Journal of Remote Sensing* 17, 3001-3014.
- KIENAST BROWN, S. and BOETTINGER, J.L. (2007): «Land-cover classification from Landsat imagery for mapping dynamic wet and saline soils». In LAGACHERIE, P., Mcbratney, A.B. y VOLTZ, M. (Edit.). *Development in Soil Science*. Amsterdam Elsevier, vol. 31, 235-244.
- KING, C.; BAGHDADI, N.; LECOMTE, V.; CERDAN, O. (2005): «The application of remote sensing data to monitoring and modelling of soil erosion». *Catena*, 62, 79-93.
- KOOISTRA, L.; LEUVEN, R.S.E.W.; WEHRENS, R.; NIENHUIS, P.H. y BUYDENS, L.M.C. (2003): «A comparison of methods to relate grass reflectance to soil metal contamination». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 24, 24, 4995-5010.
- LIBERTI, M.; SIMONIELLE, T.; CARONE, M.T.; COPPOLA, R.; D'EMILIO, M. y MACCHIATO, M. (2009): «Mapping badland areas using LANDSAT TM/ETM satellite imagery and morphological data». *Geomorphology*, 106, 3-4, 333-343.
- MATHIEU, R.; KING, C. Y BISSONNAIS, Y.L. (1997): «Contribution of multi-temporal SPOT data to the mapping of a soil erosion index, the case of the loamy plateaux of northern France». *Soil Technology*, 10, 99-110.
- MATHIEU, R.; CERVELLE, B.; RÉMY, D. y POUGET, M. (2007): «Field based and spectral indicators for soil erosion mapping in semi-arid Mediterranean environments (Coastal Cordillera of Central Chile)». *Earth Surface Processes and Landforms*, 32, 13-31.
- METTERNICHT, G. y ZINCK J.A. (1997). «Spatial discrimination of salt and sodium affected soil surfaces». *Int. Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, 2571-2586.
- METTERNICHT, G. y ZINCK, J.A. (2003): «Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints». *Remote Sensing of Environment*, vol. 85, 1-20.
- MIETTINEN, J. (2007): «Variability of fire-induced changes in MODIS surface reflectance by land-cover type in Borneo». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 28, 22, 4967-4984.
- MIETTINEN, J. y LIEW, S.C. (2005): «Connection between fire and land cover change in Southeast Asia: a remote sensing case study in Riau, Sumatra». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 26, 6, 1109-1126.
- MOUGENOT, B. (1993): «Effets des sels sur la réflectance et télédétection des sols salés». *Cahiers ORSTOM, Serie Pedologie*, 28, 45-54.
- NAREDO, J.M. y GARCÍA, R. (2008): *Estudio sobre la ocupación de suelo por usos urbano-industriales, aplicado a la Comunidad de Madrid*. Informe Final. Documentos [http:// habitat.aq.upm.es/oscaml/](http://habitat.aq.upm.es/oscaml/).
- NASA Landsat Program (2003) Landsat TM scene L5_002067_19860822.
- NASA Landsat Program (2003) Landsat TM scene L5_007063_19990821.
- NASA Landsat Program (2003) Landsat ETM+ scene L7_189027_20000802.
- NASA Landsat Program (2003) Landsat ETM+ scene L7_002067_20060704.

- NIZEYIMANA, E.L.; PETERSEN, G.W.; IMHOFF, M.L.; SINCLAIR JR.; WALTMAN, S.W.; REED MARGETAN, D.S.; LEVINE, E.R. y RUSSO, J.M. (2001): «Assessing the impact of land conversion to urban use on soils with different productivity levels in the USA», *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65, 391-402.
- OLDFORD, S.; LEBLON, B.; MACLEAN, D. y FLANNIGAN, M. (2006): «Predicting slow-drying fire weather index fuel moisture codes with NOAA-AVHRR images in Canada's northern boreal forest». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 27, 18, 3881-3902.
- PENG, W. (1998): «Synthetic analysis for extracting information on soil salinity using remote sensing and GIS: a case study of Yanggao basin in China». *Environmental Management*, 22, 153-159.
- PÉREZ GONZÁLEZ, M.E. y GARCÍA RODRÍGUEZ, M.P. (2005): «Discriminación visual y digital de suelos de baja calidad agrícola a partir de imágenes Landsat». *Geographicalia*, 46, 99-115.
- PEREZ GONZÁLEZ, M.E.; GARCÍA RODRÍGUEZ, M.P.; GONZÁLEZ QUIÑONES, V. y JIMÉNEZ BALLESTA, R. (2006): «Spatial variability of soil quality in the surroundings of a saline lake environment. *Environmental Geology*, 51, 1, 143-150.
- RAO, B. y VENKATARATNAM, L. (1991): «Monitoring of salts affected soils; a study using aerial photographs, Salyut-7 space photographs and Landsat TM data». *Geocarto Int.*, 6, 5-11.
- SCALENGHE, R. y AJMONE-MARSAN, F. (2009): «The anthropogenic sealing of soils in urban areas». *Landscape and Urban Planning*, 9, 1-2, 1-10.
- SCHMID, T.F. (2004): *Integrated Remote Sensing approach to detect changes in semi-arid wetland areas in Central Spain*. Tesis Doctoral. Univ. Autónoma de Madrid, 193 pp.
- SEGA, H.; TANI, H. e HIRANO, T. (2010): «Detection of FIRE impact and vegetation recovery over tropical peat swamp forest by satellite data and ground-based NDVI instrument». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 31, 20, 5297-5314.
- SOJA, A.J.; SUKHININ, A.I.; CAHOON, D.R.; SHUGART, H.H.; STACKHOUSE, P.W. (2004): «AVHRR-derived FIRE frequency, distribution and area burned in Siberia». *Intern. Journal of Remote Sensing*, 25, 10, 1939-1960.
- VAN CAMP, L.; BUJARRABAL, B.; GENTILE, A.R.; JONES, R; MONTANARELLA, L.; OLAZÁBAL, C. y SELVARADJON, S.K. (2004): *Reports of the technical working groups. Established under the thematic strategy for soil protection. EUR 21319 EN/6 872*. Office for Official Publ. Of the European Communities. Vo. VI. Luxembourg.
- USGS (2004): «Shuttle Radar Topography Mission, 3 Arc Second scene SRTM_u03_n008e004, Unfilled Unfinished 2.0», *Global Land Cover Facility*, University of Maryland, College Park, Maryland, February 2000.

<http://inundacionesenalcazar.wordpress.com>