

Expansión urbana del Área Metropolitana de Valencia en el periodo 1984-2011 a partir de imágenes Landsat TM y ETM+

Fernández-Gimeno, L.^{1*}, López-García, M.J.²

¹ *Departamento de Física de la Tierra y Termodinámica, Universitat de València, Calle Dr. Moliner 50. 46100 Burjassot, España.*

² *Departamento de Geografía, Universitat de València, Avda. Blasco Ibáñez, 28, 46010 València, España.*

Resumen: La expansión urbana acelerada producida en décadas recientes en las grandes áreas metropolitanas como Valencia conlleva importantes impactos ambientales, entre ellos la impermeabilización o “sellado antropogénico” del suelo y la pérdida de espacios naturales de gran valor paisajístico. Este trabajo analiza la evolución de la cobertura artificial en el Área Metropolitana de Valencia (AMV) en el periodo 1984-2011 a partir de imágenes Landsat TM y ETM+, validadas a partir de datos SIOSE de mayor resolución espacial. Los resultados muestran, con una precisión del 71%, un aumento de la superficie artificial en el AMV de 8000 ha en dicho periodo, lo que supone un incremento del 10% del suelo sellado que representa globalmente el 34% del AMV.

Palabras clave: urbanización, cobertura artificial, Área Metropolitana de Valencia, Landsat, clasificación digital, cambios usos del suelo, SIOSE.

Urban expansion of the Valencia Metropolitan Area during the period 1984-2011 from Landsat TM and ETM+ imagery

Abstract: The accelerated urban expansion produced in large metropolitan areas such as Valencia Metropolitan Area in recent decades has important environmental impacts including “soil sealing” and the loss of valuable natural areas. The aim of this paper is to analyze the evolution of artificial soil in the Metropolitan Area of Valencia (AMV) between 1984-2011 using Landsat TM and ETM+ images, that have been validated from SIOSE data with larger spatial resolution. Results point out, with an accuracy of 71%, that artificial surface raised in 8000 ha which represents an increase of 10% for sealing soil and 34% of the whole land covers of the AMV.

Key words: urbanization, artificial soil, Valencia Metropolitan Area, Landsat, digital classification, land use change, SIOSE.

1. Introducción

El incremento demográfico y la expansión urbana acelerada producidos en décadas recientes constituyen elementos clave para entender el cambio global en nuestro planeta. Pese a que las zonas urbanas ocupan una reducida extensión de la superficie de la Tierra, en la actualidad, más de la mitad de la población mundial (54%) vive en áreas urbanas, porcentaje que alcanza el 73% en

Europa y 80% en España (United Nations, 2014). Este crecimiento urbano acelerado ha tenido importantes consecuencias socioeconómicas y también impactos medioambientales que se manifiestan a escala local, regional y global (Berry, 1990). Entre los impactos ambientales destacan la pérdida de terrenos agrícolas o de vegetación natural, el incremento de la congestión por tráfico, la degradación de la calidad del aire y del agua y los cambios en el clima urbano. La urbanización

* Autor para la correspondencia: luifergim@hotmail.com

conlleva la extensión de las superficies artificiales sobre el terreno, proceso que se conoce como “soil sealing” o sellado antropogénico del suelo con superficies duras e impermeables (Scalenghe y Ajmone-Marsan, 2009; Valera, 2011), que provoca otras consecuencias como el aumento del riesgo de inundaciones y un descenso en la efectividad de absorción de las aguas por parte del terreno y los acuíferos, entre otros.

En España, el proceso urbanizador que tuvo lugar en el último cuarto del siglo XX ligado al expansionismo económico y demográfico, se ha intensificado en las dos últimas décadas dando lugar a un sistema urbano donde destaca, especialmente en las regiones mediterráneas, el protagonismo de las grandes metrópolis. Se han acentuado los procesos de difusión urbana en el territorio tanto residencial como de actividades económicas dando lugar a estructuras metropolitanas policéntricas (Valenzuela y Salom, 2008). La expansión de la ciudad de Valencia se ha producido siguiendo sobre todo los grandes ejes de comunicación y alcanza a las comarcas limítrofes formando un espacio urbano que se extiende en ocasiones, hasta más de 20 kilómetros desde el centro urbano (Rosselló *et al.*, 1988; Boira, 1999). El crecimiento urbano reciente está provocando la pérdida de un espacio agrícola intensivo tradicional (*L’Horta*), de especial valor ambiental, paisajístico, económico y cultural (Romero y Francés, 2012).

La gestión y planificación del territorio requiere una correcta caracterización de los espacios urbanos y los cambios que en ellos se producen. La cartografía dinámica de usos del suelo es, por ello, necesaria y los datos proporcionados por satélites proporcionan información precisa y actualizada que se utiliza cada vez más para monitorizar las dinámicas urbanas. Desde los años 80 son muchos los trabajos que han utilizado imágenes de satélite para la cartografía de usos del suelo, destacando en Europa su utilización en el Proyecto CORINE-Land Cover (CLC) que ha proporcionado a los estados miembros una base de datos de usos y coberturas (CLC 1990, CLC 2000 y CLC 2006) integrada en un Sistema de Información Geográfica, a partir de imágenes Landsat 5 de 30 m de resolución y una escala de referencia 1/100.000 (EEA, 2015). El uso de imágenes para el análisis específico de la expansión

urbana ha cobrado importancia en la última década, quizás debido a la disponibilidad de series largas de imágenes Landsat así como al desarrollo de sensores multiespectrales de muy alta resolución espacial. Entre los trabajos que utilizan imágenes Landsat destacamos, entre otros, los referidos a Twin Cities (Minnesota) (Yuan *et al.*, 2005), a Tokio (Hasi y Yoshiki, 2012), Kampala (Vermeiren *et al.*, 2012), Washington (Sexton *et al.*, 2012) y el trabajo de Hasi y Yoshiki (2014) sobre 50 ciudades del mundo.

En España, la mayor parte de trabajos que analizan el crecimiento urbano y la dinámica de cambios en los usos del suelo han utilizado mapas de ocupación del suelo pre-existentes y cartografía elaborada a partir del análisis de fotografías aéreas y ortofotos. Así, Catalán *et al.* (2007) analizan los patrones de crecimiento en el área metropolitana de Barcelona a partir de datos de población y la cartografía de usos realizada por fotointerpretación. En la Comunidad Valenciana destacan los trabajos de Pascual (2004) para el Área Metropolitana de Valencia (AMV en adelante) durante el periodo 1956-1998; Año *et al.* (2005) que analizan el sellado antropogénico en la franja litoral de la provincia de Castellón; Valera (2011) que estudia varias zonas metropolitanas de la Comunidad Valenciana y Valera *et al.* (2011) que analizan la degradación de suelos por sellado antropogénico en el municipio de Valencia durante el periodo 1956-2006. Todos ellos utilizan una cartografía propia elaborada por fotointerpretación de fotogramas aéreos, un trabajo exhaustivo y minucioso que permiten mayor precisión que las imágenes de satélite.

En la actualidad, con la liberalización del archivo histórico de imágenes Landsat del *United States Geological Survey* (USGS), el uso de imágenes multiespectrales de satélite y las técnicas de tratamiento digital constituyen, cada vez más, una alternativa sencilla y económica frente a las técnicas de fotointerpretación de fotogramas y ortofotos. Las imágenes Landsat, si bien no proporcionan cartografías a escala tan detallada como las fotografías aéreas, permiten la evaluación rápida de las dinámicas urbanas, proporcionando una herramienta útil para su gestión. Recientemente, García *et al.* (2013) han utilizado imágenes Landsat para detectar el proceso de

sellado antropogénico en el área metropolitana de Madrid durante el período 1989-2011.

Este trabajo plantea un doble objetivo: por un lado, comprobar la viabilidad de las imágenes Landsat TM y ETM+ para la detección y evaluación rápida de los cambios urbanos en el Área Metropolitana de Valencia y, por otro, analizar la dinámica espacio-temporal de los cambios ocurridos en el espacio urbano durante el período 1984-2011. Para cumplir con el primer objetivo se han aplicado técnicas estándar de clasificación digital supervisada a fin de obtener un mapa de usos del suelo que se ha validado mediante la cartografía de usos del suelo del proyecto SIOSE (Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España). Una vez establecido el nivel de error, la metodología utilizada se ha extrapolado a una selección de imágenes Landsat del período, lo que ha permitido cuantificar y evaluar la dinámica de la expansión urbana en las tres últimas décadas.

2. Zona de estudio

El área metropolitana de Valencia (AMV), definida dentro de las Grandes Áreas Urbanas (GAU) españolas por el Ministerio de Fomento, es la tercera más importante del país con una población – según el padrón de 2011– de 1.554.021

habitantes, distribuidos en una extensión de 628,9 km² y con una densidad de población cercana a los 2500 hab/km². (Explotación estadística del Padrón 2011. <http://www.ine.es>).

Como límites del AMV se han empleado los definidos por el departamento de estadística del Ayuntamiento de Valencia (<http://www.valencia.es/ayuntamiento/estadistica.nsf>) que comprende los 43 municipios integrados en las actuales comarcas de l’Horta Nord, l’Horta Oest y l’Horta Sud, junto a la propia ciudad de Valencia y el municipio de San Antonio de Benagéber. (Figura 1).

La población del AMV experimentó un importante crecimiento durante la segunda mitad del siglo XX, pasando de una población censal de 763.124 habitantes en 1960 a 1.545.463 habitantes en 2011. La figura 2 muestra la evolución demográfica según los datos censales en los últimos 50 años. Tras un crecimiento sostenido entre 1960 y 1981, se pueden distinguir dos etapas durante el período que abarca este estudio: la primera, entre 1981 y 2001 se caracteriza por crecimiento de la población muy moderado (3%) mientras que entre 2001 y 2011 se observa una intensificación del crecimiento demográfico, con un incremento del 14%.

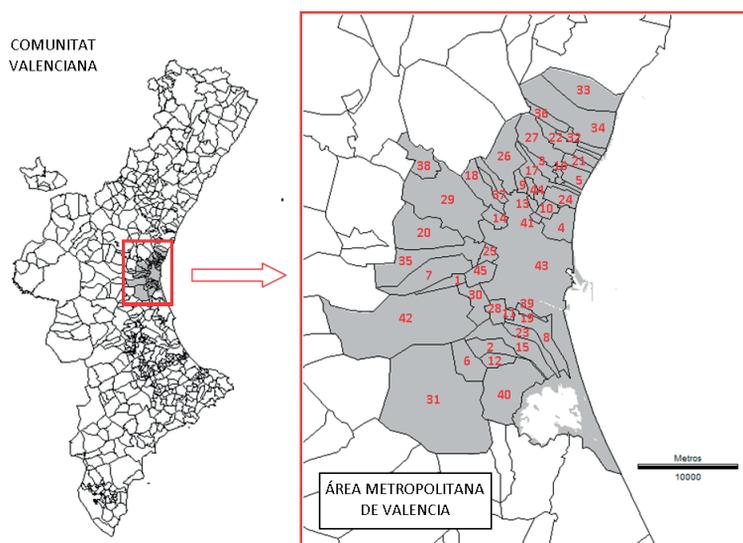


Figura 1. Localización del AMV en la Comunitat Valenciana y los 45 municipios que la componen.

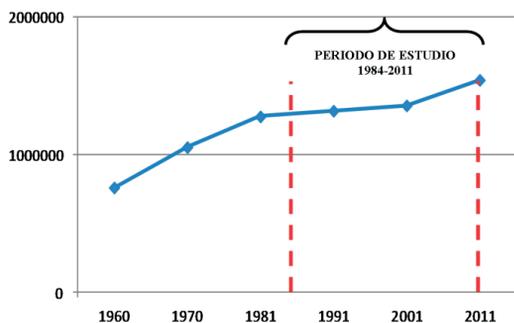


Figura 2. Evolución de la población censal en el AMV 1960-2011. Elaboración propia a partir de datos del INE.

3. Datos

Para la realización de este estudio se han utilizado imágenes de los sensores TM y ETM+ a bordo de los satélites Landsat 4, 5 y 7 correspondientes al período 1984-2011 obtenidas a través del servidor del USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Se han seleccionado imágenes de 6 fechas (Tabla 1) abarcando periodos de entre 5 y 10 años en función de la disponibilidad, en la misma época del año (entre julio y septiembre, para minimizar el riesgo de existencia de nubes) y con fechas próximas entre sí para evitar cambios de iluminación. Las imágenes corresponden a la escena path 198/row033 y están corregidas geoméricamente en el sistema UTM (huso 31).

Tabla 1. Características de las imágenes Landsat utilizadas en el estudio.

Satélite	Sensor	Año	Día del año (DOY)
Landsat 5	TM	1984	274
Landsat 4	TM	1990	218
Landsat 7	ETM+	2000	230
Landsat 5	TM	2003	214
Landsat 5	TM	2007	225
Landsat 5	TM	2011	252

La validación de los datos de satélite se ha realizado a partir de la cartografía de usos del suelo procedente del Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo en España (SIOSE, <http://www.siose.es>). Este proyecto, desarrollado por el Ministerio de Fomento a través del IGN y el CNIG, constituye la base de datos de ocupación y usos del suelo de referencia en España. La escala, 1:25.000 y su alto grado de detalle lo convierten en una herramienta muy útil en la toma de

decisiones de cara a una óptima ocupación del suelo a nivel local y comarcal (Membrado, 2011). Como información base para su desarrollo se han utilizado imágenes SPOT-5, Landsat5 y ortofotos PNOA, tomando información de apoyo del Mapa de Cultivos y Aprovechamientos, del Mapa Forestal de España y del SIGPAC, entre otros. En la Tabla 2 se muestra la clasificación de las coberturas que utiliza el proyecto SIOSE (SIOSE, 2011).

Tabla 2. Clasificación de las coberturas en el SIOSE.

Coberturas Simples	Artificiales	Edificación Zona Verde y Arbolado Urbano Lámina de Agua artificial Vial, aparcamiento o zona peatonal Suelo no edificado Otras Construcciones Zonas de extracción o vertido
	Zonas Agrícolas, forestales Y naturales	Arbolado forestal Matorral Pastizal Terrenos sin vegetación Coberturas húmedas Coberturas de agua Cultivos
Coberturas Compuestas	Dehesa Huerto Familiar Asentamiento agrícola residencial Olivar/Viñedo Artificial compuesto	

Los datos se han obtenido en el geoportal Terrasit de la Generalitat Valenciana (<http://terrasit.gva.es/>), por municipio y en formato *shape*, siendo el sistema geodésico de referencia de dichos datos el ETRS89 y el sistema cartográfico de representación UTM huso 30.

A su vez, la capa con la delimitación geométrica de la división administrativa de los municipios de la Comunitat Valenciana se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística (<http://www.ine.es/inebmenu/indice.htm>) con una escala aproximada de 1:50.000.

4. Metodología

La metodología seguida en el estudio se esquematiza en la Figura 3. En primer lugar se han realizado las operaciones de procesado, clasificación y

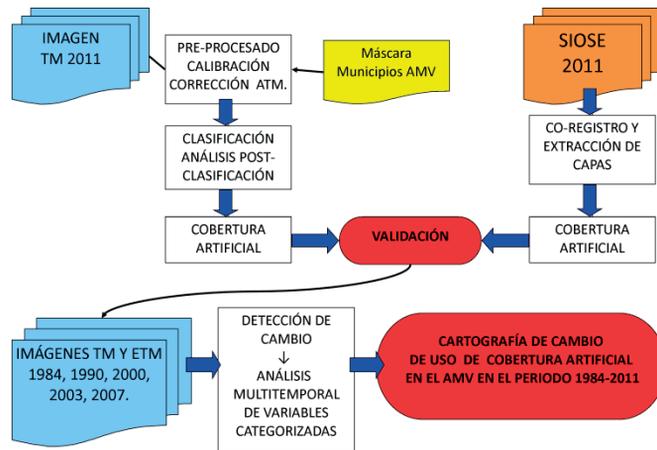


Figura 3. Esquema metodológico del estudio.

análisis sobre la imagen TM del año 2011. El mapa de usos obtenido será posteriormente validado utilizando la cartografía SIOSE de la misma fecha. Una vez establecido el clasificador de mayor precisión, se ha aplicado al resto de imágenes Landsat para poder elaborar la cartografía de cambios. Para todos estos procesos se han empleado varios software comerciales, Idrisi Taiga, ArcGis10 de Esri y ENVI 4.8 de ITTVIS.

4.1. Pre-procesado y correcciones de la imagen

El pre-procesado de la imagen consiste en el recorte de la escena inicial y su re-proyección para unificar todos los sistemas de proyección de las imágenes tomando como referencia la proyección UTM, huso 30, utilizada en la cartografía SIOSE y en el archivo vectorial de los municipios.

Todas las imágenes han sido también corregidas radiométrica y atmosféricamente, para lo cual se han utilizado los coeficientes de calibrado radiométrico propuestos por Chander *et al.* (2009) para los sensores TM y ETM, y el método del punto oscuro o método Chávez (Chávez, 1996) respectivamente. Finalmente, se ha aplicado una máscara para extraer la superficie perteneciente al Área Metropolitana de Valencia (AMV).

4.2. Clasificación de las imágenes Landsat

A continuación se describe el proceso seguido para obtener el mapa de coberturas urbanas a partir de la imagen Landsat de 2011. Se ha realizado una clasificación supervisada que consta de las siguientes fases:

a) **Definición de la leyenda.** Con objeto de poder validar el mapa de cobertura urbana utilizando la cartografía SIOSE, es necesario definir una leyenda que sea capaz de integrar las clases de cobertura artificial definidas por SIOSE con las clases informacionales definidas por el productor. Para ello hemos diseñado una leyenda jerárquica de 3 niveles que nos permita organizar y gestionar los distintos tipos de clases, tanto informacionales como espectrales, existentes en la escena. (Ver Tabla 3).

El nivel 1 está formado por las dos clases genéricas, cobertura artificial y cobertura no artificial, en las que se engloban el resto de subclases. El objetivo del proceso de clasificación será llegar a discriminar en la imagen estas dos clases con el menor error posible. El nivel 3 lo forman las 8 clases informacionales definidas a partir de la fotointerpretación de la escena, a las cuales hemos añadido la clase “nube” con la intención de detectar los píxeles correspondientes a dicha clase y proceder a su enmascaramiento para evitar confusiones con otras clases de similares características. Las

Tabla 3. Estructura de la leyenda de coberturas del suelo jerarquizada en tres niveles.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
1. Cobertura no artificial	0. Nubes	0. Nubes
	1.1. Agua oceánica	1.1.1. Superficies de agua oceánica
	1.2. Agua continental	1.2.1. Superficies de agua continental 1.2.2. Superficies de agua litorales
	1.3. Cobertura vegetal	1.3.1. Zonas agrícolas y de vegetación
	1.4. Suelos desnudos	1.4.1. Zonas con escasa vegetación
2. Cobertura artificial	2.1. Zonas urbanas	2.1.1. Superficie urbana de baja densidad
		2.1.2. Superficie urbana de alta densidad
		2.1.3. Zonas industriales

clases del nivel 2 han sido definidas a partir del estudio de las características espectrales de las clases del nivel 3, de las firmas espectrales de píxeles representativos y su dispersión en el triángulo de reflectividades, y representan el compromiso entre clase temática y clase espectral (Fernández, 2014). Por tanto, serán las clases del nivel 2 las que se consideren en los siguientes pasos de la clasificación.

- b) Selección de las muestras de entrenamiento.** Se ha utilizado el método de entrenamiento-testeo mediante el cual se seleccionaron un conjunto de muestras representativas de las distintas clases que se quieren discriminar. Dos tercios de dichas muestras se utilizaron para el entrenamiento del clasificador y el resto para su posterior validación. Mediante regiones de interés o ROI se seleccionan las muestras de cada una de las seis clases definidas en el nivel 2.
- c) Selección del clasificador.** Se han aplicado 3 métodos paramétricos de clasificación supervisada implementados en ENVI 4.8: Mínima distancia (MD), Distancia de Mahalanobis (MAHA) y Máxima Verosimilitud (MV). Las métricas usadas para evaluar la precisión de los distintos clasificadores han sido la Precisión Global (*Overall Accuracy OA%*), que nos muestra el ratio de píxeles correctamente clasificados frente a los píxeles atribuidos a una clase errónea y el Índice Kappa (*Kappa Coeficient*), el cual mide la diferencia entre el acuerdo (mapa de clasificación-realidad) y el

que cabría esperar mediante una asignación puramente al azar (Camps-Valls *et al.* 2011). En la Figura 4 se presentan los mapas de clasificación obtenidos por cada uno de los algoritmos utilizados así como los valores de precisión (OA) e Índice Kappa. El algoritmo que mejor precisión alcanza y por lo tanto el seleccionado para la clasificación del mapa de usos, es el de máxima verosimilitud.

- d) Evaluación del modelo de predicción.** El intervalo de fiabilidad del clasificador y la matriz de confusión son indicadores cuantitativos de la calidad de los resultados a partir de los cuales podemos evaluar la fiabilidad del mapa de clasificación. Así pues, para un nivel de significación del 95% se ha obtenido un intervalo de fiabilidad del clasificador de (0,966-0,969).

Con la matriz de confusión confrontamos los valores reales o verdad terreno con los resultados de la clasificación. Las estimaciones obtenidas en la matriz son aceptables para todas las clases, excepto para la clase suelo desnudo, que presenta los peores resultados. Esto es debido a los problemas que encuentra el clasificador a la hora de discriminar píxeles entre esta clase y la clase “nube”, causado en gran medida por la mala separabilidad espectral y a la gran confusión que existe entre ellas (píxeles brillantes). Este hecho, unido a un muestreo escaso por la poca cantidad de píxeles existentes de dichas clases y una mala distribución, explica su mala estimación.

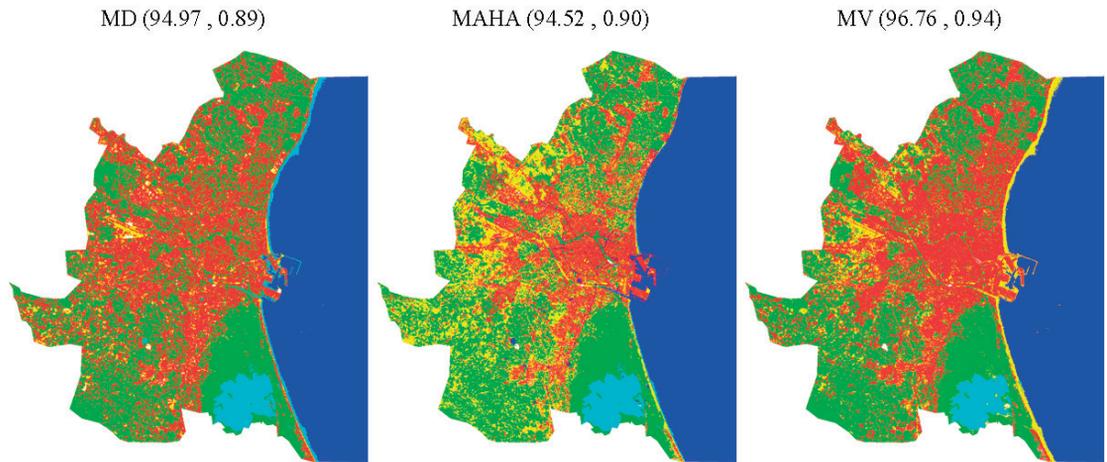


Figura 4. Mapas de clasificación obtenidos y valoración de la precisión (*Overall Accuracy (%)*, *Kappa Coeficient*).

Teniendo en cuenta también que, para evitar píxeles no clasificados, se han clasificado incluso los píxeles más dudosos, se ha realizado un análisis de curvas ROC, lo cual nos ha permitido mejorar las prestaciones del clasificador y minimizar dichas fuentes de error. Para ello se aplicó un umbral de corte óptimo, obtenido del análisis ROC, para cada clase en las funciones discriminantes, intentando maximizar el porcentaje de detecciones sin aumentar en exceso las falsas alarmas.

e) Aplicación de técnicas post-clasificación. Se ha aplicado un filtrado de mayoría o moda para

eliminar el ruido y mejorar la homogeneidad de la imagen. Se utilizó una ventana móvil o kernel de 3×3 píxeles con un peso del píxel central 4 veces superior al resto para evitar la pérdida de estructuras lineales como son las infraestructuras de comunicación vial y ferroviaria. Finalmente se realizó una combinación de clases, agrupando en una sola categoría aquellas que pertenecen a la cobertura no artificial, obteniendo como resultado una imagen con las dos clases definidas en el nivel 1 de la leyenda: cobertura artificial y cobertura no artificial. En la Figura 5 se muestra el resultado final de la misma.

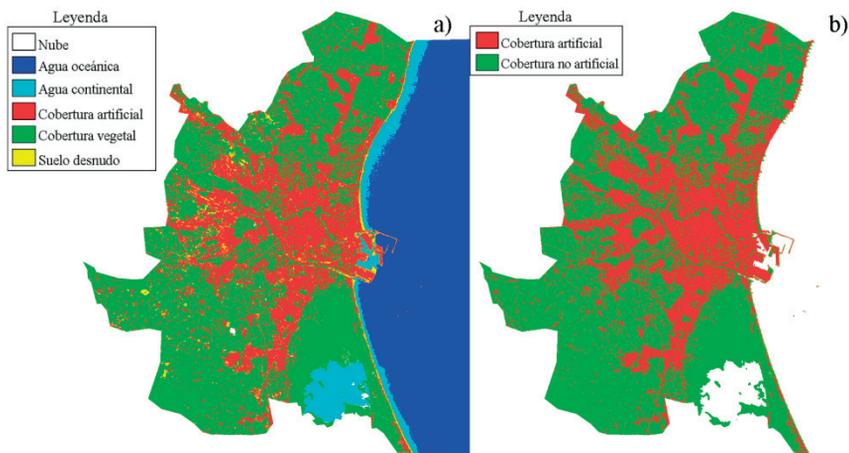


Figura 5. a) Mapas de usos del suelo con las 6 clases definidas (izquierda) y b) con la combinación en 2 clases (derecha) obtenidos a partir de la imagen Landsat TM 2011.

4.3. Procesado de los datos SIOSE

Para comparar el mapa de clasificación de coberturas artificiales obtenido a partir de la imagen Landsat TM 2011 con la cartografía SIOSE, es necesario reajustar la leyenda del mapa para que sea equiparable a la utilizada en la clasificación de la imagen. De todas las coberturas que identifica la cartografía SIOSE se ha tomado el nivel de desagregación 1 dentro de las Coberturas Simples, que identifica las “Coberturas Artificiales” incluyendo: edificación, zona verde y arbolado urbano, lámina de agua artificial, vial, aparcamiento o zona peatonal, suelo no edificado, otras construcciones y zonas de extracción o vertido (Tabla 2).

El archivo vectorial de cobertura artificial obtenido se ha transformado a formato ráster con una resolución de 30×30 m para hacerlo coincidir con la resolución de las imágenes Landsat. A pesar que la coincidencia geométrica entre ambas imágenes era prácticamente perfecta, se ha asegurado la concordancia registrando ambas imágenes usando el método de puntos de control, obteniendo un error RMS de 1,28 m. El resultado final es un mapa que muestra la cobertura artificial del AMV, con valores 0 (no clasificado) y 1 (cobertura artificial) con una resolución de píxel 30×30 y perfectamente georreferenciada (Figura 6).

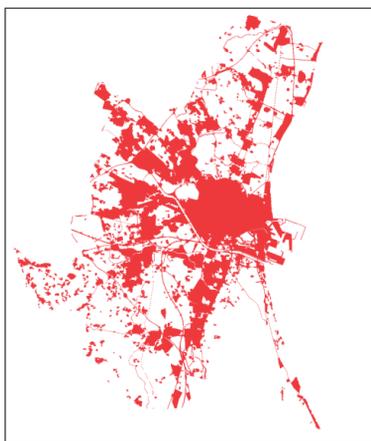


Figura 6. Mapa de coberturas artificiales derivado de datos SIOSE 2011.

5. Resultados

5.1. Validación del mapa de clasificación

La comparación del mapa de clasificación de coberturas artificiales del AMV obtenido a partir de la imagen Landsat 5 TM 2011 (Figura 5b) con el mapa de coberturas artificiales extraído de SIOSE (Figura 6) nos ha permitido estimar el nivel de similitud y las discrepancias entre ambos métodos. En cifras globales, la superficie artificial obtenida a partir de la imagen clasificada es de 21495 ha, ligeramente superior a la cifra obtenida a partir del mapa SIOSE, 20728 ha (Tabla 4). Teniendo en cuenta que la superficie total del AMV es de 62881 ha, la superficie artificial representa, según la imagen Landsat, un 34,2% del total, mientras que, según el mapa SIOSE representa un 33%.

Tabla 4. Superficie y porcentaje de cobertura artificial respecto al total del AMV obtenidos a partir del mapa de clasificación 2011 y del mapa SIOSE.

Mapa	Cobertura artificial	
	Superficie (ha)	Porcentaje AMV (%)
Clasificación 2011	21494,7	34,2
SIOSE 2011	20728,1	33,0

Para valorar mejor la precisión obtenida por la imagen clasificada, se ha calculado la matriz de confusión utilizando el mapa SIOSE como verdad terreno (Tabla 5). La tabla expresa en ha el nivel de coincidencia entre ambos documentos. Si bien el error global obtenido en la clasificación es del 20%, la cifra es algo superior para las zonas urbanizadas. Del total de superficie etiquetada como cobertura artificial en el mapa SIOSE (20728 ha), el 71% (14711 ha) corresponde con la superficie artificial en la imagen clasificada, ya que el 29% (6017 ha) se ha clasificado como coberturas no artificiales (error de omisión). Por otra parte, del total de la superficie artificial clasificada en la imagen (21495 ha), el 32 % (6784 ha) representa superficies no artificiales en el mapa SIOSE (error de comisión). Los errores de omisión y comisión

Tabla 5. Matriz de confusión entre el mapa SIOSE y el mapa obtenido a partir de la imagen Landsat clasificada.

Clase		Mapa usos SIOSE (ha)			
		Cobertura no artificial	Cobertura artificial	Total	Error comisión (%)
Clasificación Landsat 2011 (ha)	Cobertura no artificial	35369	6017	41386	14,5
	Cobertura artificial	6784	14711	21495	31,6
	Total	42153	20728	62881	
	Error omisión (%)	16,1	29,0		20,4

expresan las confusiones existentes entre ambos documentos, si bien el total obtenido en la superficie urbanizada es prácticamente idéntica.

La discrepancia existente entre el nivel de error obtenido cuando se calcula la superficie de cobertura artificial global entre ambas imágenes y cuando consideramos los píxeles que se corresponden a dicha superficie en las dos imágenes se explica analizando en detalle ambas cartografías. Este análisis nos ha permitido detectar 2 fuentes de error principales:

a) Zonas donde el clasificador subestima o sobreestima la clase cobertura artificial con respecto a la considerada por SIOSE. Estas situaciones se dan en gran medida en las zonas denominadas urbanas de baja densidad (UBD), es decir, urbanizaciones (donde el clasificador subestima la clase cobertura artificial) y zonas de viviendas aisladas (el clasificador sobreestima la clase cobertura artificial), donde los píxeles de características espectrales muy diferentes se entremezclan en poco espacio generando píxeles dudosos difíciles de clasificar. Esto, unido al criterio de SIOSE de considerar toda una urbanización como suelo artificial a pesar de contener un gran porcentaje de suelo vegetal, hace que parte del error se concentre en estas zonas. La Figura 7 muestra un ejemplo seleccionado de subestimación de la zona urbana por el clasificador.

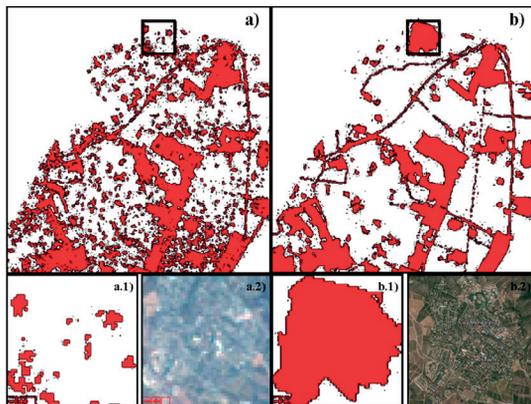


Figura 7. Ejemplo de zona de cobertura artificial sub-estimada en un área urbana de baja densidad (urbanización Alfinach-Monasterios, El Puig). a) Localización del sector en la imagen clasificada, a.1) Zoom de la zona en la imagen clasificada y a.2) Zoom de la zona en la imagen Landsat 5TM 2011. b) Localización del sector en el mapa SIOSE, b.1) Zoom de la zona en el mapa SIOSE y b.2) Zoom de la zona en una imagen de Google Earth.

b) Zonas con distinto criterio de cobertura artificial. Estas zonas se corresponden con superficies clasificadas dentro de un grupo determinado con un criterio informacional y espectral que no ha sido considerado de igual manera por el mapa de referencia SIOSE. El ejemplo más claro de esta fuente de error lo representan las superficies ocupadas por campos de golf (Figura 8) que, tanto espectralmente como informacionalmente, han sido clasificados como cobertura vegetal, teniendo en cuenta además que no son suelos que se puedan considerar de ninguna manera como suelos sellados. Sin embargo, en el criterio de SIOSE, estas superficies han sido alteradas por la mano del hombre y por lo tanto son consideradas como superficies artificiales.

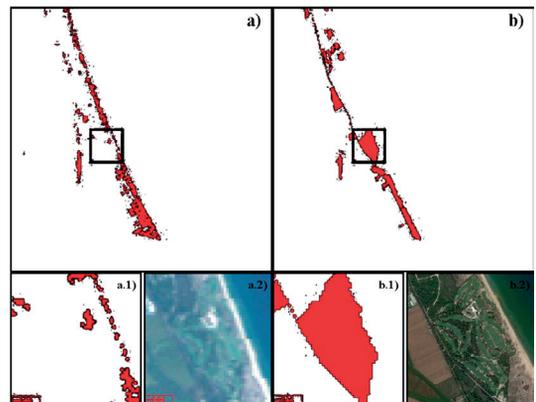


Figura 8. Ejemplo de zona con distinto criterio de cobertura artificial (campo de golf de El Saler, Valencia). a) Localización del sector en la imagen clasificada, a.1) Zoom de la zona en la imagen clasificada y a.2) Zoom de la zona en la imagen Landsat 5TM 2011. b) Localización del sector en el mapa SIOSE, b.1) Zoom de la zona en el mapa SIOSE y b.2) Zoom de la zona en una imagen de Google Earth.

Cabe destacar pues, que a pesar de la presencia de errores y disparidad de criterio en cuanto al etiquetado de superficies en ambos documentos (Mapa de Clasificación y Mapa SIOSE), los totales obtenidos nos hacen ser optimistas en cuanto a la validez del método.

5.2. Cartografía de cambio de uso del suelo

La Figura 9 muestra los mapas de coberturas del suelo obtenidos para cada uno de los años objeto de estudio a partir de las imágenes Landsat. Aplicando

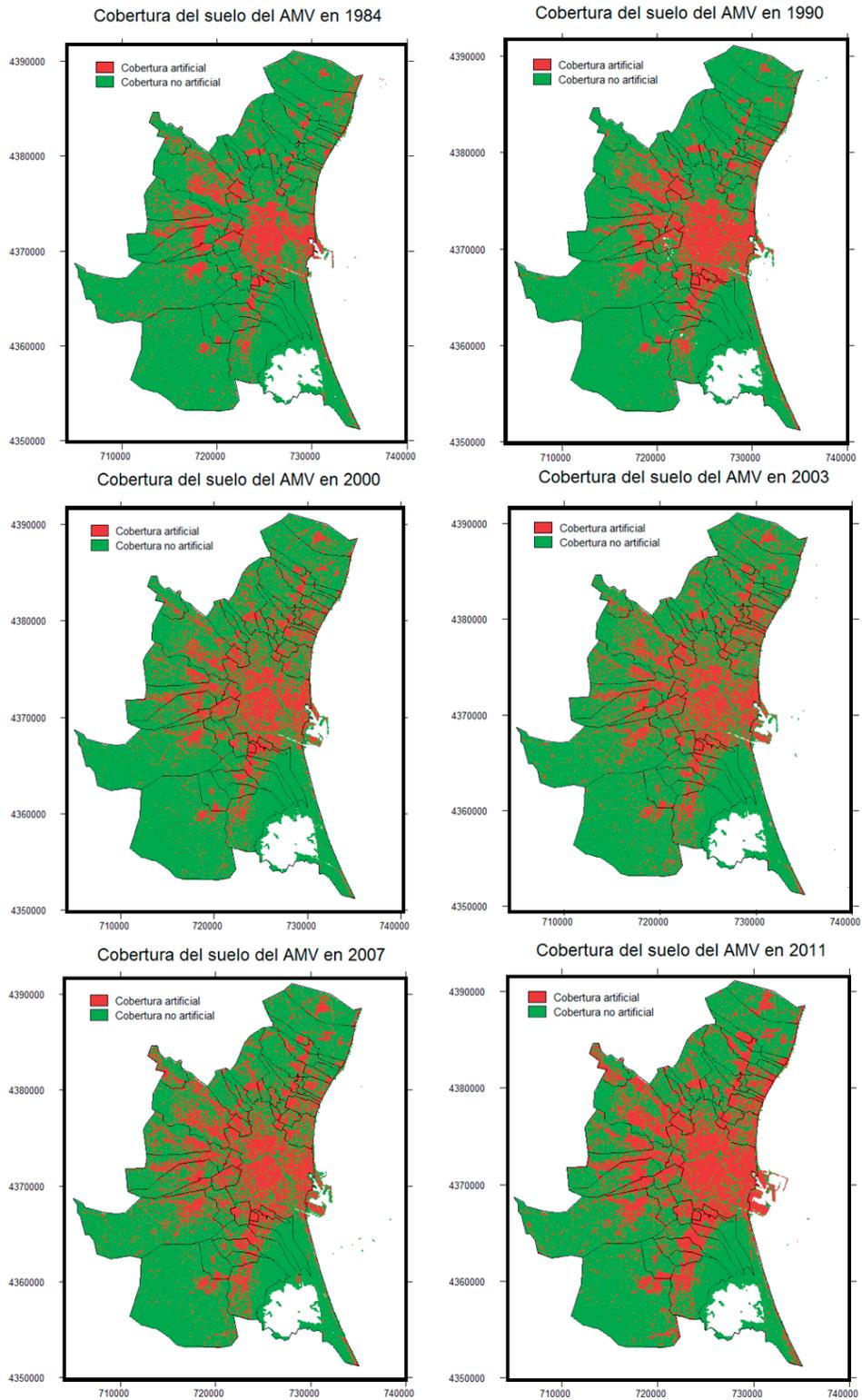


Figura 9. Serie multitemporal del mapa de cobertura artificial en el AMV obtenido a partir de las imágenes Landsat (1984, 1990, 2000, 2003, 2007 y 2011).

la metodología descrita sobre dichas imágenes, el porcentaje de acierto (*overall accuracy*) del clasificador de Máxima Verosimilitud obtenido se sitúa entre un rango del 81% y el 97%, siendo la imagen Landsat 5 TM 2003 la que obtiene porcentajes de precisión más bajos (80,62%) y la imagen Landsat 5 TM 2007 la que los obtiene más altos (96,93%).

Los mapas distinguen entre las zonas de cobertura artificial (rojo) y cobertura no artificial (verde), e incorporan la delimitación administrativa de los términos municipales. En ellos podemos observar el proceso expansivo experimentado por el AMV en este periodo, donde destaca el modelo de crecimiento axial que siguen los municipios del Área Metropolitana, los cuales, en un primer momento (1984) están representados por áreas compactas y localizadas en los centros históricos y paulatinamente van creciendo siguiendo las principales vías de comunicación, (antigua carretera de Barcelona al Norte, la pista de Ademuz al noroeste, la Nacional-III al oeste y el Camino Real de Madrid al sur). Este crecimiento ha provocado en un último estadio (2011) la fusión de las áreas urbanizadas en muchos municipios, lo que se ha traducido, sobre todo en el eje norte-sur (Carretera de Barcelona-Camino Real de Madrid) en un continuo urbano desde la capital a los límites del AMV. Por otro lado, la propia ciudad de Valencia también ha seguido un modelo axial de crecimiento, pero de manera concéntrica y multi-direccional, lo que ha provocado un efecto derrame, expandiéndose hacia las zonas de huerta circundantes e incorporando los pequeños núcleos urbanos que en ella se encuentran.

En la Figura 10 se han representado conjuntamente los datos de evolución de las superficies artificiales y del crecimiento de la población (<http://www.ine.es> y <http://atlas.vivienda.es>) para el período de estudio. Se ha considerado el año 1984 como el momento inicial con valor 100 y se han representando los incrementos (en %) para cada fecha. Junto a los datos de la evolución de las superficies artificiales obtenidos en este estudio (en rojo) se han insertado los datos que publica el Sistema de Información Urbana (SIU, en morado) obtenidos a partir del Proyecto CORINE Land Cover (1984-2006) (Aguado *et al.* 2013).

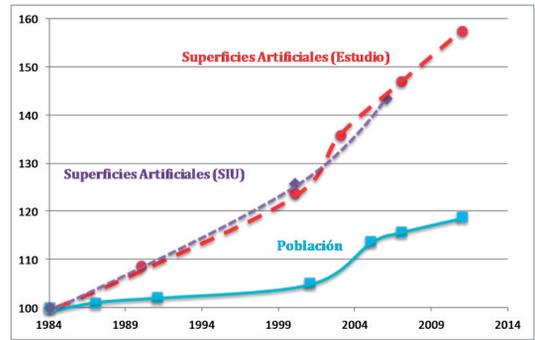


Figura 10. Evolución de la población (1984-2011) y del suelo artificial. En morado (---) se muestran los datos del SIU (1984-2006) y en rojo (- -) los datos obtenidos en este estudio (1984-2011). 1984=100.

Se observa que la dinámica de crecimiento de las superficies artificiales obtenidas en nuestro estudio coincide con la calculada para el SIU a partir de datos CORINE Land Cover. La gráfica permite comparar la dinámica evolutiva de las superficies artificiales con la de la población y muestra el gran desequilibrio existente entre ambas. Para un incremento global de un 20% de la población se observa un incremento de la superficie artificial de casi un 60%. Este desequilibrio se debe en gran medida a 3 factores: el incremento de la red de infraestructuras de transporte, el crecimiento del desarrollo urbanístico ligado al turismo residencial y el incremento de los usos industriales del suelo.

Para completar el análisis sobre el proceso de desarrollo urbano del AMV en los distintos años y periodos estudiados se han utilizado una serie de indicadores calculados siguiendo la metodología de Valera *et al.* (2011): indicadores anuales (SC=Suelo construido, PSC=Porcentaje de superficie construida, Pob=Población y DP=Densidad demográfica) e indicadores graduales calculados por períodos de tiempo (CSC=Crecimiento total de la superficie construida, ASC=Crecimiento anual de la superficie construida, CP=Crecimiento de la población). La Tabla 6 muestra los indicadores calculados por año y la Tabla 7 por periodo de estudio.

Los indicadores ponen en relieve el gran incremento de las superficies construidas (CSC) 57,6% en el periodo de estudio 1984-2011, por un crecimiento de la población (CP) del 20,26%. La superficie construida (SC) pasa de 13635,27 ha

Tabla 6. Indicadores calculados por año aplicados en el AMV. SC = Suelo construido, PSC= Porcentaje de superficie construida, Pob.= Población y DP = Densidad demográfica.

Indicadores	1984	1990	2000	2003	2007	2011	Unidades
SC	13635,3	14835,2	16885,8	18544,5	20069,6	21494,7	ha
PSC	21,7	23,6	26,8	29,5	31,9	34,2	%
Pob	1292235	1317059	1341161	1396907	1507108	1554021	hab.
DP	2055,0	2094,5	2132,9	2221,5	2396,8	2471,3	hab/km ²

Tabla 7. Indicadores calculados por periodo aplicados en el AMV. CSC = Crecimiento total de la superficie construida, ASC= Crecimiento anual de la superficie construida, CP= Crecimiento de la población.

Indicadores	1984-2011	1984-2000	2000-2011	Unidades
CSC	57,6	23,8	27,3	%
ASC	291,1	203,2	419,0	ha/año
CP	20,3	3,8	15,9	%

(el 21,68% de la superficie del AMV) en 1984 a 21494,7 ha en 2011, lo que supone un porcentaje de superficie construida (PSC) del 34,18%. Este proceso no ha sido homogéneo ni en el tiempo ni en el espacio, siendo en el periodo 2000-2011 donde encontramos una aceleración desmesurada del proceso de urbanización. Así, en la última década

se produce una gran expansión de las superficies artificiales, con un crecimiento medio anual de las superficies construidas (ASC) de 418,98 ha frente a 203,16 ha en el periodo anterior. En la década reciente también se produce un crecimiento considerable de la población (CP) del 15,87% muy por encima del 3,79% en el periodo 1984-2000. La figura 11 ilustra los procesos descritos ya que sintetiza la extensión de la cobertura urbana en los años 1984, 2000 y 2011 a partir de las imágenes obtenidas en el análisis multitemporal de las 2 variables categorizadas

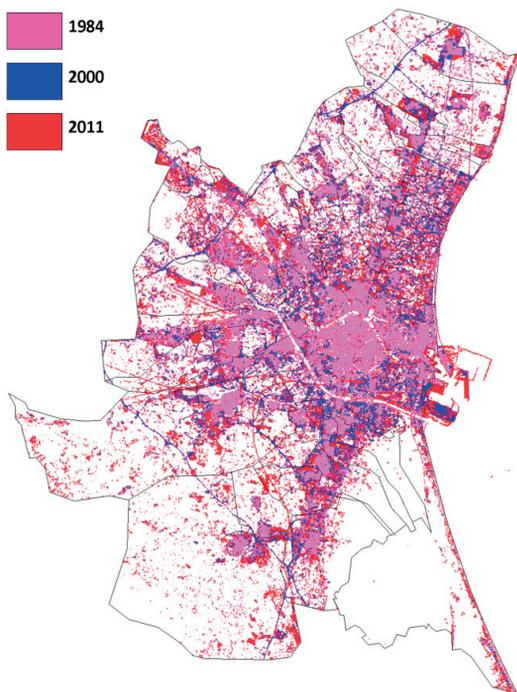


Figura 11. Evolución de las superficies artificiales en el AMV (1984-2011).

6. Conclusiones

El análisis realizado confirma, a pesar de la resolución espacial del sensor (30×30) y de la gran heterogeneidad espacial en la respuesta espectral de las áreas urbanas, la viabilidad de las imágenes Landsat TM y ETM+ para la evaluación rápida y continua de los procesos de expansión urbana en áreas metropolitanas. La validación con los datos SIOSE nos ha permitido establecer las limitaciones del método y el nivel de precisión, identificando las posibles fuentes de error en el proceso de clasificación.

El análisis multitemporal realizado mostró un incremento importante de suelo urbano durante el periodo, comparable a los datos aportados por el Sistema de Información Urbana (SIU) del Ministerio de Fomento y calculados a partir de datos CORINE Land Cover. Los resultados

indican una clara similitud entre ambas fuentes y resalta dinámicas disimiles entre el crecimiento de los suelos artificiales y el de población, siendo el primero muy superior al segundo.

A partir de estos resultados se sugieren posibles mejoras del método, como son la utilización de otros algoritmos de clasificación no paramétrica a partir de los cuales poder obtener una mejor segmentación de la imagen y la desagregación de la cartografía SIOSE en más niveles de cobertura artificial compuesta, con el propósito de conseguir una mejor coincidencia entre clases informacionales y espectrales a la hora de validar.

7. Referencias

- Aguado, M.D., Baiget, M., González, S., Fernández, M.A. 2013. *Áreas Urbanas +50. Información estadística de las Grandes Áreas Urbanas españolas 2012*. Madrid: Servicio de publicaciones Ministerio de fomento.
- Añó, C., Pascual, J.A., Sánchez, J. 2005. Capacidad de uso y sellado antropogénico del suelo en la franja litoral de la provincia de Castellón. *Investigaciones Geográficas*, 38, 65-77. <http://dx.doi.org/10.14198/INGEO2005.38.04>
- Berry, B.J.L. 1990. Urbanization. En: Turner, B.L., Clark, W.C., Kates, R.W., Richards, J.F., Matthews, J.T. y Meyer, W.B., (Eds.). *The Earth as Transformed by Human Action*, Cambridge University Press, New York, pp. 103-120.
- Boira, J.V. 1999. Transformación en la ocupación del espacio al noroeste de la ciudad de Valencia. En: Domínguez Rodríguez, R. (Coord.) *La ciudad: tamaño y crecimiento*. Málaga, España, Departamento de Geografía de la Universidad, pp. 257-265.
- Camps-Valls, G., Tuia, D., Gómez-Chova, L., Jiménez, S., Malo, J. 2011. *Remote sensing image processing*. Austin: Alan C. Bovik.
- Catalán, B., Sauri, D., Serra, P. 2007. Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in Barcelona Metropolitan Region 1993-2000. *Landscape and Urban Planning*, 85, 174-184. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.11.004>
- Chander, G., Markham, B.L., Yehder, D.L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>
- Chavez, P.S. 1996. Image-based atmospheric corrections. Revisited and improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62, 1025-1036.
- EEA, 2015. *Corine Land Cover; European Environmental Agency*. Último acceso: 24 de Febrero, 2015. Accesible en: <http://www.eea.europa.eu/publications/CORO-landcover>
- Fernández, L. 2014. Evolución de la cobertura artificial en el Área Metropolitana de Valencia en el periodo 1984-2011 a partir de imágenes Landsat TM-ETM+. *Trabajo Fin de Máster; Universitat de Valencia*, 64 pp (inédito).
- García, P., Pérez, M.E., Guerra, A. 2013. Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma*, 214-215, 135-140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.09.017>
- Hasi, B., Yoshiki, Y. 2012. Landsat analysis of urban growth: How Tokyo became the world's largest megacity during the last 40 years. *Remote Sensing of Environment*, 127, 210-222. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.09.011>
- Hasi, B., Yoshiki, Y. 2014. Land-cover change analysis in 50 global cities by using a combination of Landsat data and analysis of grid cells. *Environmental Research Letters*, 9, 064015. <http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/9/6/064015>
- Membrado, J.C. 2011. SIOSE Valencia 2005: Resultados, aplicaciones y comparación con CORINE. *Cuadernos de Geografía*, 89, 001-022.
- Pascual, J.A., 2004. Dinámica reciente de usos del suelo en el continuo metropolitano de Valencia (1956-1998). *Cuadernos de Geografía*, 76, 183-202.
- Romero, J., Francés, M. 2012. *La Huerta de Valencia. Un paisaje cultural con futuro incierto*. Valencia: Publicaciones de la Universidad de Valencia.
- Roselló, V.M., Teixidor, M.J., Boira, J.V., 1988. La comarca de l'Horta. Área metropolitana de València. Valencia: Generalitat Valenciana.
- Scalenghe, R., Ajmone-Marsan, F., 2009. The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 9(1-2), 1-10. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.011>
- Sexton, J.O., Song, X-P., Huang, C., Channan, S., Baker, M.E., Townshend, J.R. 2012. Urban growth of Washington, D.C.-Baltimore, MD metropolitan region from 1984 to 2010 by annual, Landsat-based estimates of impervious cover. *Remote Sensing of Environment*, 129, 42-53. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.025>
- SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España). *Documento técnico SIOSE 2005 versión 2.2*. Último acceso: 30 de Noviembre, 2015, de http://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Doc tecnico_SIOSE2005_v2.pdf
- United Nations, 2014. *World urbanization prospects. The 2014 revision. Highlights*, New York, 32 p.

- Valenzuela, M., Salom, J. 2008. Los procesos de urbanización en España. En: Comité español de la Unión Geográfica Internacional, *España y el Mediterráneo: una reflexión desde la geografía española*, Unión Geográfica Internacional, pp. 49-56.
- Valera, A. 2011. Dinámica espacio-temporal de usos/cubiertas del suelo y sostenibilidad ambiental en áreas metropolitanas de la Comunidad Valenciana. *Tesis Doctoral, Universitat de Valencia*, 310 pp.
- Valera, A., Añó, C., Sánchez, J. 2011. Cincuenta años (1956-2006) de crecimiento urbano y degradación de suelos por sellado antropogénico en el término municipal de Valencia. *Anales de Geografía*, 31(2), 177-191.
- Vermeiren, K., Van Rompaey, A., Loopmans, M., Serwajja, E., Mukwaya, P. 2012. Urban growth of Kampala, Uganda: Pattern analysis and scenario development. *Landscape and Urban Planning*, 106, 199-206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.03.006>
- Yuan, F., Sawaya, K.E., Loeffelholz, B.C., Bauer, M.E. 2005. Land cover classification and change analysis of the Twin Cities (Minnesota) Metropolitan area by multitemporal Landsat remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 98, 317-328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.08.006>