

Propuesta metodológica para la extracción y análisis de densidades urbanas mediante teledetección y SIG. Caso de estudio: ciudad de Tandil, Argentina

Natasha Picone*
Santiago Linares**

Resumen

Una de las principales preocupaciones dentro de los estudios en Tecnologías de Información Geográfica es el desarrollo de metodologías reproducibles en diferentes ciudades que contribuyan al análisis del proceso de urbanización. El objetivo de este trabajo es proponer una nueva metodología que permita extraer la superficie edificada del área urbana y discrimine las distintas densidades que en ella existen.

La metodología se basa en imágenes satelitales Landsat 5 TM que presenta una vasta cobertura territorial y temporal que asegura la posibilidad de réplica. Primero se procedió a una calibración radiométrica; luego se realizó una clasificación no supervisada, con la cual se obtuvieron cinco categorías de densidad de construcción bien definidas. Con las firmas reales de cada categoría se procedió a la reconstrucción realizando una mezcla espectral de firmas teóricas. Se obtuvieron las firmas de cada clase, a partir de las cuales se pueden realizar diversos estudios urbanos especialmente en investigaciones de densidades urbanas.

El desarrollo, aplicación, análisis y discusión de la metodología se realizó sobre la ciudad de Tandil (Argentina) para el período 1989-2011. Se pudo conocer satisfactoriamente, la magnitud y forma de la expansión urbana de la ciudad durante los últimos 20 años.

Palabras claves: Densidad urbana, Expansión urbana, Análisis de mezclas espectrales, Teledetección.

* Becaria CONICET. CIG-IGEHCs-CONICET/UNCPBA. Tandil, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: natashapicone@gmail.com

** Investigador Asistente. CONICET. CIG-IGEHCs-CONICET/UNCPBA. Docente – FCH-UNCPBA. Tandil, Buenos Aires, Argentina.

e-mail: slinares@fch.unicen.edu.ar

Methodological proposal for extracting and analyzing urban densities by remote sensing and GIS. Study case: Tandil city, Argentina

Abstract

One of the main concerns in Geographical Information Technology research is to develop methodologies that can be replicated in different cities and to explain the urbanization process. The aim of this work is to develop a new methodology to extract built-up surface areas and determine their density variance.

The methodology is based on Landsat 5 TM satellite images which have a wide territorial and timetable coverage, thus ensuring the replication process. Firstly, a radiometric calibration was carried out; a second stage involved a non-supervised classification, which allowed the identification of five well defined construction density categories. Using the real signature for each category, reconstruction involved applying a spectral mixture procedure. The specific signatures of each category were obtained and applied in urban studies especially in urban density research.

The methodology development and analysis was carried out in the city of Tandil (Argentina) from 1989 to 2011. Thus, the magnitude of urban expansion in the last 20 years was successfully known.

Key words: Urban density, Urban expansion, Spectral mixture analysis, Remote sensing.

Introducción

El procesamiento de imágenes satelitales para la obtención de información exhaustiva, precisa, periódica y de fácil actualización sobre los espacios urbanos es uno de los temas de investigación más significativos en el campo de las Tecnologías de la Información Geográfica debido a las actuales dificultades que aún existen para lograrlo. La continuidad en el tiempo de la misión Landsat (LDCM: *Landsat Data Continuity Mission*) ha permitido su utilización para análisis multi-temporales ambientales, forestales y agrícolas. El sensor TM (*Thematic Mapper*) presentó un aumento en la resolución espacial de las bandas posibilitando una mejor adecuación a los estudios urbanos (Stefanov *et al.*, 2001; Longley, 2002; Auch *et al.*, 2004). Los avances en este tema se vieron revitalizados por sensores comerciales de muy alta resolución espacial (IKONOS, GeoEye-1, Quickbird, Worldview-2, EROS B, etcétera) y a través de la creciente disponibilidad de fuentes de datos alternativas, tales como SAR (*Synthetic Aperture Radar*) y LIDAR (*Light Detection and Ranging* o *Laser Imaging Detection and Ranging*).

Más allá de las nuevas fuentes de datos disponibles que suponen un avance en la temática, existen una serie de preocupaciones metodológicas de la teledetección aplicada al análisis urbano que aún se encuentran en su fase experimental (Donnay *et al.*, 2001). Entre ellas se destacan dos: 1) buscar procedimientos de clasificación que infieran la diversidad con respecto a los usos del suelo existentes en el espacio urbano, 2) desarrollar metodologías de clasificación replicables en diferentes contextos urbanos que permitan aumentar la difusión y utilidad de las Tecnologías de la Información Geográfica.

La primera preocupación surge por las deficiencias al discriminar los diferentes usos del suelo sobre la base de la información espectral captada por los sensores satelitales; es así que superficies con valores de reflectancia espectral idénticos pueden corresponder a muy diferentes usos y funciones urbanas. En este sentido, las investigaciones en la actualidad pretenden mejorar la calidad de las clasificaciones (en términos del número de clases individuales como en la precisión con la que cada una de ellas se puede identificar) y lograr que las tipologías de uso del suelo se puedan representar en firmas espectrales concordantes con los nomencladores jurídicos-administrativos utilizados para planificar y gestionar el espacio urbano. Los intentos de superación han avanzado en varios sentidos, se pueden señalar entre ellos: el uso de probabilidades *a priori* o *a posteriori* de una clasificación (Mesev *et al.*, 2001); la aplicación de algoritmos de clasificación denominados "Blandos", como la clasificación que usa lógica nebulosa (Lee, 2006); procedimientos de segmentación de imágenes (Schöpfer *et al.*, 2010); la utilización de datos espaciales auxiliares (Weng, 2010); la combinación de datos espectrales con medidas de formas y texturas urbanas (Ackermann y Mering, 2007, Hermosilla *et al.*, 2012); técnicas de fusión de datos (Ranchin y Wald, 2010); técnicas de análisis hiperespectral (Robert y Herold, 2004) y el empleo de algoritmos de aprendizaje de máquinas (*machine learning*) (Rodríguez Galiano y Chica Rivas, 2012).

La segunda preocupación considera que el procedimiento mediante el cual se obtiene un mapa de uso del suelo, generado mediante una clasificación temática de una imagen satelital, no debe estar restringido a un área particular, a un momento determinado o a un programa específico. No constituye un producto final en sí; más bien debe ser considerado como un procedimiento genérico para los diversos procesos de investigación y planificación del espacio urbano. En esta línea se inscriben los aportes teóricos y metodológicos de Molina Mora y Chuvieco (1997); Jensen y Cowen (1999); Recio *et al.* (2003); Longley (2002); Stewart y Oke (2009) y Hermosilla y Ruiz (2009).

Es necesario destacar en aplicaciones sobre áreas urbanas la particularidad del efecto de sombra que provocan las edificaciones y generan una pérdida/ocultamiento de información relevante para estudios multitemporales. Para no caer en falsas inferencias se debe tener en cuenta la geometría de iluminación de las edificaciones. Existen dos alternativas que se emplean como posibles soluciones dependiendo de la resolución espacial del sensor en imágenes de media/baja resolución, la selección de imágenes con similar ángulo de incidencia solar y para imágenes de alta resolución el empleo de métodos de corrección (Dare, 2005).

De los antecedentes expuestos se evidencia que una de las virtudes innegables de la teledetección aplicada a espacios urbanos es la idoneidad para conocer la extensión, magnitud y evolución del área construida de una ciudad. Los desafíos en la actualidad pretenden ir más allá: intentando obtener información pormenorizada sobre la diferenciación de coberturas en su interior, inferencia sobre las densidades de los asentamientos y caracterización de los distintos usos del suelo.

Este trabajo tiene por objetivo principal desarrollar una metodología que permita analizar la evolución de la densidad urbana en ciudades argentinas sobre la base de la extracción de clases particulares de áreas construidas. Para tal fin se emplea un método híbrido que combina métodos de clasificación no supervisada y supervisada e integra Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. Las imágenes empleadas son las adquiridas por el sensor Landsat 5 TM, cuya disponibilidad espacial y temporal, como así también las posibilidades de acceso gratuito favorecen la generalización del procedimiento propuesto de fácil replicación en diferentes áreas de estudio.

Metodología

La extracción y análisis de superficies urbanas construidas se realizó sobre la ciudad de Tandil, (Buenos Aires, Argentina) (Fig. 1) empleando como máscara de análisis los límites correspondientes al área urbana y complementaria definida por el Plan de Desarrollo Territorial del Municipio de Tandil (PDT)¹. El área urbana

¹ Registrado bajo la Ordenanza n° 9865, que rige la planificación y gestión (urbana y rural) del municipio de Tandil, estableciendo los principios y las estrategias de actuación territorial, los programas y proyectos de acción, regulando el uso, ocupación, subdivisión y equipamiento del suelo y determinando el sistema de gestión territorial.

es la destinada a asentamientos humanos intensivos. Se pretende la implantación densa de la residencia y de diversas actividades y usos, como los equipamientos, las actividades terciarias y las de producción compatible. En ella se encuentra la dotación de infraestructuras y equipamientos para servir a la edificación existente o por construir. Por su parte, el área complementaria circundante o adyacente al área urbana, constituye la transición entre esta y el área rural y representa una reserva para la expansión del área urbanizada. Entre ambas, alcanzan una superficie de 10.195 ha.

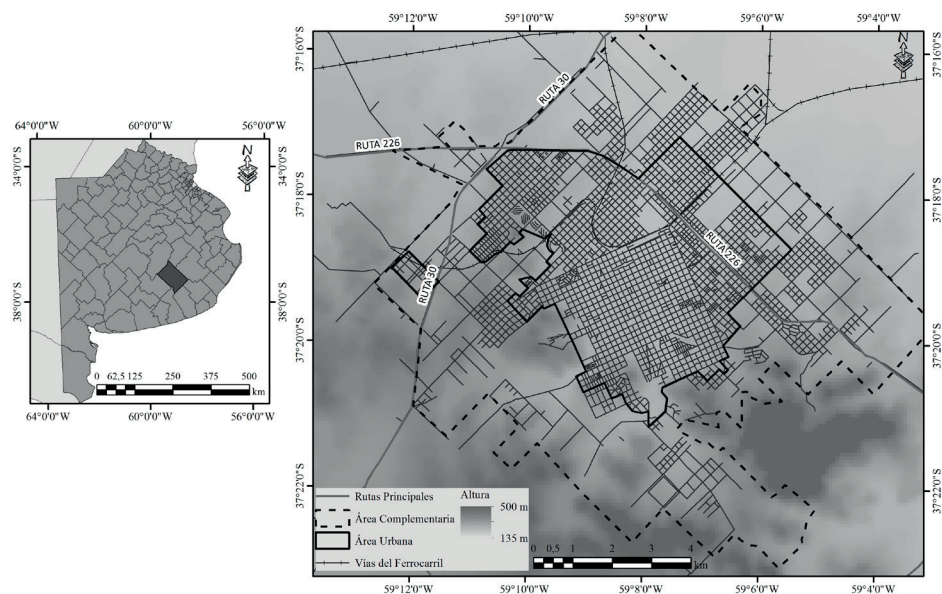


Figura 1. Ubicación del área de estudio.

Fuente: elaborado por Picone y Linares, 2014.

Elección de la escena y pre-procesamiento

Se utilizaron cuatro imágenes Landsat 5 TM de fechas: 27 de octubre de 1989, 30 de octubre de 1996, 03 de noviembre de 2003 y 24 de octubre de 2011 correspondientes a la escena Path 225 y Row 86 obtenidas de la página web del *U. S. Geological Survey* (<http://glovis.usgs.gov/>). Las imágenes seleccionadas representan condiciones atmosféricas análogas: fueron tomadas en primavera, presentaron valores meteorológicos similares y poseen Índices de Precipitaciones Estandarizados entre 1 y -1, lo que significa que el agua disponible por precipitaciones estuvo dentro de los valores normales. A su vez, se tuvo en cuenta que el ángulo de elevación solar sea similar en todas las imágenes (entre 48° y 52°) para reducir de esta manera la diferencia en el efecto de sombras. De este modo es posible superar uno de los escollos más relevantes en el procesamiento de imágenes de sensores del espectro óptico en análisis multitemporales.

Posteriormente se procedió a la calibración radiométrica de cada una de las bandas de cada imagen (Chander *et al.*, 2009; Chuvieco, 2010) mediante el módulo de corrección *Radiance* del programa Idrisi Los Andes (Eastman, 2006). Este consiste en la conversión de los números digitales a valores de radiancia considerando los coeficientes de calibración disponibles para el satélite y las fechas utilizadas. La información acerca de los parámetros de calibración de los sensores (L_{\min} y L_{\max}) se encuentra disponible en el *header* de la imagen, o bien puede extraerse de Chander *et al.*, 2009. La ecuación que relaciona los números digitales (ND) de las imágenes con la radiancia es: [1]

$$L = \left(\frac{L_{\max} - L_{\min}}{255} \right) ND + L_{\min}$$

donde L es la radiancia expresada en $Wm^{-2} sr^{-1}$.

Se realizaron comparaciones entre imágenes de diferentes fechas y se emplearon firmas espectrales teóricas para analizar el área de estudio haciéndose necesario realizar una corrección atmosférica para reducir el efecto de la absorción y dispersión de la atmósfera en cada momento y estandarizar los valores a reflectancias. Una de las maneras de proceder es mediante el módulo *Atmosc* del citado programa, utilizando los datos del *header* de las imágenes Landsat en bruto. En esta ocasión se utilizó el Modelo de Sustracción de Objetos Oscuros (Chávez, 1998) que postula que la bruma atmosférica incrementa los ND en áreas de las imágenes de agua limpia, profunda y calma, donde por las características físicas deben presentar valores de reflectancia muy próxima a cero. La diferencia entre el valor teórico y el almacenado por el sensor se sustrae en cada banda, para todos los píxeles de la escena, efectuando de esa manera la corrección.

En el módulo *Atmosc* se carga cada banda por separado, con los siguientes datos: L_{\min} y L_{\max} para la banda (expresados en $mW cm^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$: milliWatts por centímetro cuadrado por estereoradian y por micrón), elevación del sol, ángulo de la imagen, punto medio de la longitud de onda de cada banda y valores de ND de cuerpos oscuros presentes en la imagen. Para el ND del objeto oscuro se buscan los valores en las áreas de reflectancia cero conocidas, como las aguas profundas. Así, mediante el modelo se estiman los efectos atmosféricos sobre la radiación de onda corta y permite corregir los valores principalmente de las primeras bandas, con el beneficio agregado de que compensa las variaciones en ángulos de elevación solar según el momento del año (Adams y Gillespie, 2006; Chuvieco, 2010). La fórmula propuesta quedaría como:

$$\rho_k = \frac{D\pi(L_{sen,k} - L_{a,k})}{E_{o,k} \cos \theta_i \tau_{k,i}} \quad [2]$$

donde D es el factor corrector de la distancia Tierra-Sol, $L_{sen,k}$ corresponde a la radiancia espectral recibida por el sensor en la banda k , $L_{a,k}$ es la radiancia atmosférica debida a la dispersión y se estimaría a partir del valor mínimo o de un objeto de reflectividad nula, $E_{o,k}$ es la irradiancia solar en el techo de la atmósfera (para esa banda del espectro), θ_i es el ángulo cenital del flujo incidente y $\tau_{k,i}$ es la transmisividad atmosférica que afecta al rayo incidente.

Procedimientos de extracción de información temática

Como se mencionó previamente, el objetivo principal de este trabajo es obtener un procedimiento que permita obtener superficies construidas discriminando características predominantes y niveles de densidad en áreas urbanas de ciudades argentinas de una manera rápida y estandarizada. A tal fin es que se pretendió elaborar una serie de firmas espectrales de áreas urbanas construidas que permitan mediante simples operaciones aritméticas en cualquier SIG extraer este tipo de información.

El paso previo a la elaboración de estas firmas espectrales fue desarrollado en Linares y Tisnés (2011) que, sobre la base de la información contenida en las bandas espectrales 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de las imágenes Landsat 5 TM escogidas, aplicaron inicialmente un método de clasificación no supervisada mediante la herramienta Iso Cluster del SIG ArcGis y obtuvieron 26 conglomerados (*clusters*) conformados por píxeles con comportamiento espectral homogéneo. A partir de ellos fue posible extraer las clases temáticas de nuestro interés sobre las cuales se obtuvieron las firmas espectrales correspondientes. De esta clasificación se seleccionaron los píxeles de las clases que se encontraban claramente superpuestos sobre usos del suelo urbano y áreas construidas.

Clasificación supervisada y edición de firmas espectrales

Las clasificaciones supervisadas, a diferencia del método de clasificación anterior, pueden ser definidas como un proceso en el que píxeles de identidad conocida, ubicados dentro de las áreas de trabajo seleccionadas, se utilizan para clasificar píxeles de identidad desconocida. En esta clasificación se realizan generalmente las siguientes etapas: 1) etapa de entrenamiento; 2) selección del algoritmo de clasificación adecuado y clasificación y 3) operaciones de post-clasificación.

En este trabajo se editaron y optimizaron las firmas individuales de las clases obtenidas, de tal modo que sirvan como parámetros para reclasificar la imagen multiespectral de origen o sea para realizar una clasificación supervisada. Se seleccionaron así la totalidad de los píxeles de cada una de las clases urbanas construidas de manera individual y se extrajeron muestras de reflectancia para cada una de las bandas de la imagen Landsat 5 TM. Utilizando el histograma

de cada clase, fue posible eliminar aquellas observaciones que se encontraban extremadamente alejadas de la media o, dicho de otra manera, que comparían menos características que el resto de los valores seleccionados. Se optó por trabajar con un nivel de confianza del 95 % al elaborar las nuevas firmas espectrales de clase.

Como resultado se obtuvieron valores medios (media) y umbrales (máximos y mínimos) de reflectancia para cada clase en cada una de sus bandas. De esta manera fue posible elaborar la tabla I, con firmas espectrales que permitieron posteriormente ejecutar una clasificación supervisada y así poder realizar comparaciones y análisis de evolución histórica de cada clase en diferentes ciudades.

Interpretación de clases urbanas mediante análisis lineal de mezclas espectrales

La señal que registra el sensor en cada píxel, representa una mezcla de reflectancias de varias coberturas puras. En el espacio urbano esta heterogeneidad de coberturas por unidad de superficie se incrementa aún más. Es por ello que para alcanzar una mejor interpretación de cada una de las clases obtenidas mediante el procedimiento descrito anteriormente, resulta muy útil realizar un análisis lineal de mezclas espectrales (*Spectral Mixture Analysis*).

Este análisis permite calcular, para cada clase, la proporción ocupada por cada una de las cubiertas que lo integran y obtener así información sub-píxel sobre el área de estudio. Se asume para este procedimiento, que:

* Las mezclas son lineales

* La proporción de cada componente puro (F_i) debe estar entre 0 y 1:

$$0 \leq F_{i,j,m} \leq 1 \quad [3]$$

* No existe negatividad en la solución: $\sum_{m=1}^p F_{i,j,m} = 1$ [4]

* No hay influencia de cubiertas vecinas.

En este contexto se admite que en cada píxel mezclado o mixto, la reflectividad total constituye una combinación lineal de la reflectividad individual de los componentes puros en proporción a la superficie que ocupan. El concepto puede sintetizarse en la expresión (Chuvieco, 2010: 368):

$$\rho_{i,j,k} = \sum_{m=1}^p F_{i,j,m} \rho_{m,k} + e_{i,j} \quad [5]$$

donde, $\rho_{i,j,k}$ indica la reflectividad observada en el píxel i,j en la banda k ; $F_{i,j,m}$ es la proporción del componente m en ese píxel i,j para cada uno de los p componentes

puros; $\rho_{m,k}$ corresponde a la reflectividad característica de ese componente m en la banda k , y e_{ij} representa el error asociado a la estimación de las proporciones en cada píxel i,j . Así, el total de las proporciones correspondientes a los componentes individuales presentes, equivale a la superficie del píxel.

Para conocer las respuestas espectrales de los componentes puros en cada una de las clases, denominados *endmembers* (Adams y Gillespie, 2006; Powell *et al.*, 2007) fue necesario recurrir a una serie de bibliotecas espectrales. Estas almacenan colecciones de espectros, habitualmente tomados en laboratorio bajo condiciones controladas, que intentan recoger la reflectividad característica de una amplia variedad de materiales terrestres.

Son varios los núcleos de investigación que disponen de dichas bibliotecas, dentro de los cuales, empleamos por su vasto contenido sobre coberturas urbanas las siguientes:

Nombre: *USGS Spectroscopy Lab*

Web: <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>

Nombre: *JPL (jet propulsion laboratory) - ASTER*

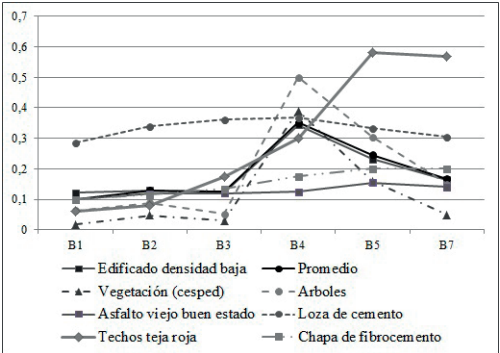

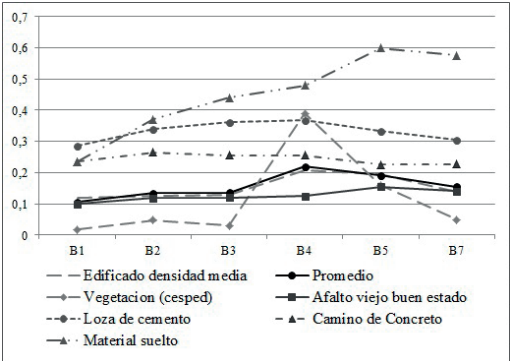

Web: <http://speclib.jpl.nasa.gov>

Nombre: *Santa Barbara urban spectral libraries*

Web: <http://www.geogr.uni-jena.de/~c5hema/spec/sburbspectable.htm>

Finalmente, se obtuvieron las respuestas espectrales de los componentes puros de cada clase y se realizó una reconstrucción de la reflectividad mezclada que capta el sensor para cada una de las longitudes de onda tenidas en cuenta en el análisis es decir, para las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 de Landsat 5 TM. Esta reconstrucción se realizó de manera inductiva a partir del conocimiento del terreno y sobre la base de la construcción de gráficos lineales que permitieron comparar las firmas espectrales de las clases obtenidas, las de cada uno de los componentes puros observados en cada clase y los promedios ponderados entre ellos que representan la reconstrucción de la reflectancia que capta el sensor. En la tabla I se muestra el resultado del procedimiento aplicado para cada una de las clases que indican diferentes densidades de edificación en la ciudad.

A partir de la identificación de las coberturas puras en cada una de las clases y su representación proporcional por unidad de superficie posibilitó realizar un reajuste espectral en cada clase, permitiendo mejorar la clasificación e interpretación de usos del suelo urbano en los diferentes períodos considerados.

CLASE	FIRMAS ESPECTRALES (umbral máximo y mínimo para cada clase y banda)	CARACTERÍSTICAS
EDIFICADODENSIDAD BAJA	<p>B1: 0.100789-0.144165/B2: 0.100883-0.158503 B3: 0.090548-0.157492/B4: 0.283694-0.403982 B5: 0.199319-0.265179/ B7: 0.135501-0.193289</p> 	<p>45 % del área edificada (20% loza de cemento, 15% asfalto viejo, 5% tejas rojas, 5% chapa de fibrocemento) y 55 % del área sin edificar (35% césped y 20% arbolado).</p> 
EDIFICADODENSIDAD MEDIA	<p>B1: 0.096573-0.141425/B2: 0.097905-0.150625 B3: 0.100774-0.158934/B4: 0.152680-0.261476 B5: 0.155724-0.232228/B7: 0.091262-0.188210</p> 	<p>78 % del área edificada (62% de asfalto viejo, 7% caminos de concreto, 4% de loza de cemento y 5% de material suelto en caminos) y 22 % del área sin edificar (césped).</p>  <p>Imagen área de muestra</p>

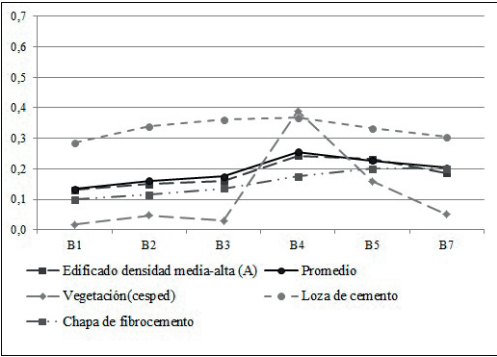

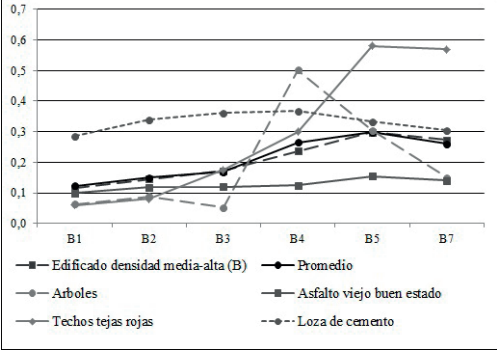

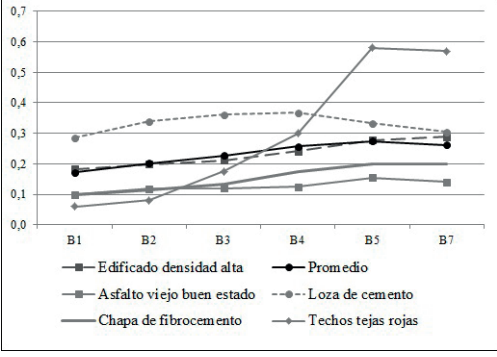

<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">EDIFICADODENSIDAD MEDIA – ALTA (A)</p>	<p>B1: 0.107656-0.152816/B2: 0.124758-0.174898 B3: 0.131844-0.190040/B4: 0.185933-0.300921 B5: 0.181205-0.282537/B7: 0.143892-0.227124</p> 	<p>85 % del área edificada (60% chapa de fibrocemento y 25% loza de cemento) y 15 % del área sin edificar (césped).</p>  <p>Imagen área de muestra</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">EDIFICADODENSIDAD MEDIA – ALTA (B)</p>	<p>B1: 0.090806-0.139462/B2: 0.110516-0.178774 B3: 0.125206-0.219218/B4: 0.221674-0.252586 B5: 0.227136-0.369960/B7: 0.196043-0.349435</p> 	<p>85 % de área edificada (45% asfalto viejo, 20% tejas rojas, 20% loza de cemento) y 15 % del área sin edificar (árboles).</p>  <p>Imagen área de muestra</p>
<p style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">EDIFICADODENSIDAD ALTA</p>	<p>B1: 0.140074-0.227186/B2: 0.139103-0.260147 B3: 0.151912-0.270692/B4: 0.144505-0.337661 B5: 0.178452-0.376528/B7: 0.150452-0.425840</p> 	<p>100 % área edificada (40% loza de cemento, 50% chapa de fibrocemento, 6% tejas rojas y 4% de asfalto viejo).</p>  <p>Imagen área de muestra</p>

Tabla I. Umbrales de clase y análisis lineal de mezclas espectrales.

Fuente: elaborado por Picone y Linares, 2014.

Aplicación a la ciudad de Tandil

Definidas las clases que representan las distintas densidades de edificación en el área urbana y conociendo el error aproximado de la clasificación es posible calcular la superficie edificada para el período considerado (1989-2011), conocer la evolución de la ocupación del suelo durante cada subperíodo y analizar la distribución y patrón espacial que presenta este proceso: expansión y estructuración urbana.

En principio, la pauta global de la superficie edificada se obtiene de multiplicar la superficie edificada de cada píxel en la imagen Landsat (Baja = 405 m²; Media 702 m²; Media-Alta 765 m² y Alta 900 m²) por la sumatoria del total de píxeles de cada clase. Por lo tanto, la superficie total construida aumentó entre 1989 y 2011 un 116 % pasando de 925 ha al principio del periodo a 2001 ha en el final. La tasa de variación relativa entre cada período es de 26 % para 1989-1996, 39 % para 1996-2003 y 23 % para 2003-2011. La figura 2 presenta una primera aproximación a los resultados globales donde se muestra cómo los píxeles de cada una de las clases han variado durante el período considerado en la ciudad de Tandil.

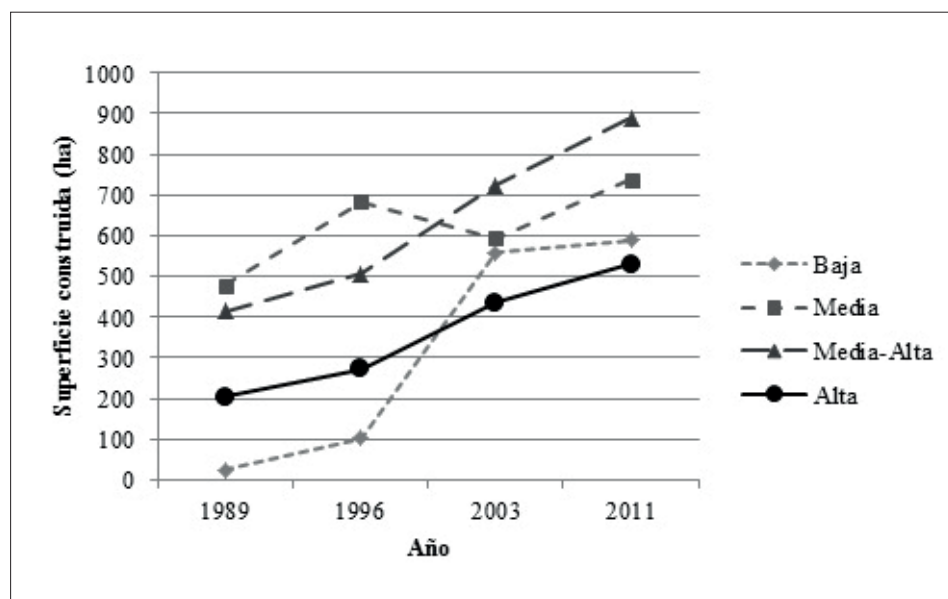


Figura 2. Evolución del área construida según densidad.

Fuente: elaborado por Picone y Linares, 2014

Se observó que los comportamientos de las clases presentaron dos tendencias. Por un lado, las áreas con alta y media-alta densidad de edificaciones mostraron una tendencia creciente y a un ritmo sostenido en el tiempo. Por el otro, las áreas con media y baja densidad de edificaciones fueron inestables e irregulares entre los años considerados. Mientras que la clase con baja densidad de edificaciones presentó un crecimiento destacadamente pronunciado durante el período 1996-2003 para luego estabilizarse en el período siguiente; la clase con media densidad de

edificaciones mostró una disminución de su representatividad durante el período 1996-2003 para luego recuperar su crecimiento.

La obtención de cartografía temática mediante la implementación de SIG (Fig. 3) permitió describir la forma en que cada una de las clases se distribuyó en el área urbana de Tandil durante los diferentes momentos considerados. A su vez facilitó la interpretación a escala intraurbana de los procesos de expansión y estructuración que se produjeron en los últimos veinte años en esta ciudad.

De la figura 3 y sobre la base de los postulados teóricos que explican los procesos de estructuración y desarrollo urbano es posible encontrar dos argumentaciones que permiten comprender el comportamiento observado en el período de estudio. Por un lado, el primer subperíodo comprendido entre 1989-1996 evidenció un comportamiento de ciudad compacta similar al modelo de anillos concéntricos de Burgess (1925) adaptado a las particularidades regionales y locales expuestas por Yujnovsky (1971). En él la ciudad tiende a expandirse radialmente partiendo de su Distrito Central de Negocios que se caracteriza por una alta densidad de edificaciones, que se encuentra circundado por un anillo de transición, donde dominan las áreas residenciales consolidadas con densidades de edificación medias-altas y algunas localizaciones dispersas de comercios básicos y, una tercera zona conformada por una periferia residencial de baja densidad de edificaciones, que crece en forma espontánea y no planificada, aprovechando los bajos costos del suelo y alquiler por la falta de accesibilidad a servicios urbanos y lugares de trabajo. El factor que explica esta configuración es la rentabilidad por unidad de superficie, por lo tanto, a medida que la ciudad aumenta su tamaño crece su Distrito Central de Negocios, ejerciendo presión e invadiendo áreas correspondientes al segundo anillo. El uso del suelo residencial se ve reemplazado gradualmente por el uso comercial y de servicios y la población allí residente es obligada a ocupar áreas más alejadas del centro invadiendo el tercer anillo donde reproduce el principio de invasión-sucesión que caracteriza a la ciudad concéntrica.

Desde 1996 en adelante se observó un comportamiento diferente con respecto al proceso de expansión urbana que se venía desarrollando. Si bien se observaron rasgos heredados de una ciudad compacta y concéntrica correspondiente a la configuración anterior se destacó un fuerte incremento de los píxeles con baja densidad de edificación que se distribuyen de una manera discontinua y fragmentada, cada vez más alejados del área central. Estas áreas periféricas de baja densidad se produjeron, mayormente, por la construcción de viviendas unifamiliares y, particularmente hacia el sur de la ciudad, por complejos de cabañas con fines turísticos distribuidas sobre el piedemonte serrano. Este proceso de dispersión trajo aparejado una disminución de la proximidad entre las personas y entre estas y el área comercial tradicional alternado el sistema urbano monocéntrico característico. De la misma manera se observa que la pérdida de continuidad entre viejos y nuevos desarrollos urbanos generó vacíos intermedios que incrementaron considerablemente los costos de urbanización.

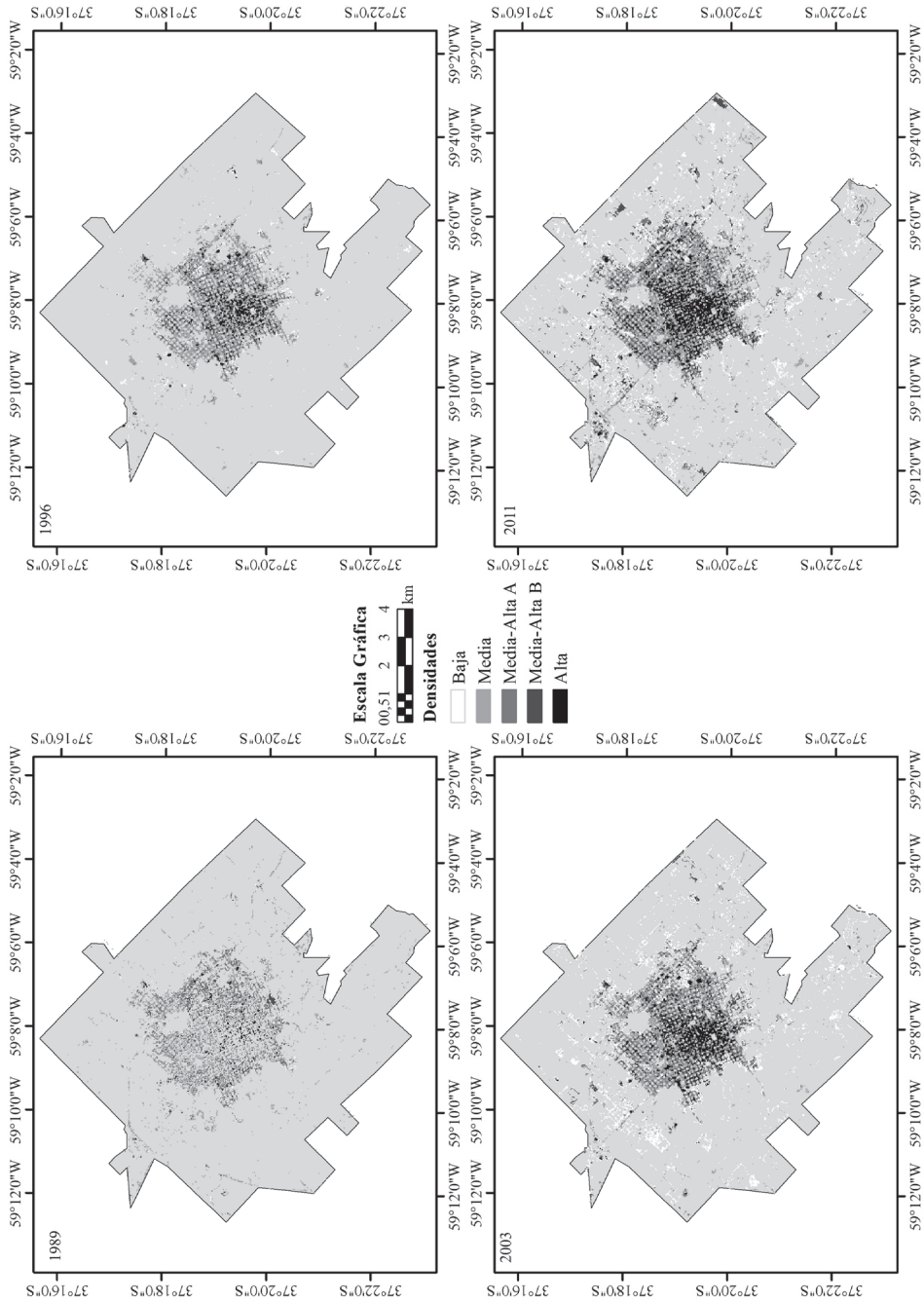


Figura 3. Evolución de la densidad de edificaciones en la ciudad de Tandil (1989-2011).

Fuente: elaborado por Picone y Linares, 2014.

Estimación de la exactitud de la clasificación

En un sentido estricto, ninguna clasificación puede considerarse completa hasta que su grado de exactitud sea evaluado. El grado de exactitud puede definirse como el grado de concordancia entre las clases asignadas por el clasificador y sus ubicaciones correctas según los datos recolectados en campo o clasificados previamente haciendo uso de otras metodologías y considerados como datos de referencia.

El instrumento más usado para evaluar la exactitud de una clasificación es la matriz de confusión, también llamada matriz de error o de contingencia. Esta es una matriz cuadrada de $n \times n$ filas y columnas, en la que n representa el número de clases. Dicha matriz muestra la relación entre dos series de medidas correspondientes al área de estudio. La primera serie corresponde a datos de referencia adquiridos de observaciones de campo, inspección de estadísticas, interpretación de fotos aéreas y otras fuentes similares. La segunda corresponde a la categorización de los píxeles realizada por el clasificador para las clases de interés. En una matriz de confusión las columnas corresponden a los datos de referencia, mientras que las filas se refieren a las asignaciones del clasificador. A partir de una matriz de confusión pueden deducirse varios índices relativos a la exactitud de la clasificación, entre los más usuales se destacan el índice de exactitud global, la exactitud del productor y la exactitud del usuario (Congalton y Green, 1998; Chuvieco, 2010).

En la tabla II se presenta una matriz de confusión compuesta por cuatro categorías: densidad baja, densidad media, densidad media-alta y densidad alta. Los valores en las columnas representan las clases reales obtenidas de una fuente de información auxiliar, como es el catastro digital urbano de la ciudad de Tandil y que posee información sobre la superficie construida por manzana para el año 2011. En las filas aparecen las clases obtenidas tras la clasificación, agregadas espacialmente a las unidades catastrales que posibiliten su comparación. La diagonal de esta matriz cuadrada expresa el número de puntos de verificación en donde se produce acuerdo entre las dos fuentes (mapa y realidad), mientras los marginales suponen errores de asignación. La relación entre el número de puntos correctamente asignados (diagonal) y el total expresa la exactitud global que para nuestro caso es de 82,06 %. Los errores de omisión indican tipos de cubiertas reales que no se incluyeron en el mapa de clases obtenido, siendo 11,8 % para manzanas con densidad baja, 19,4 % para manzanas con densidad media, 25,7 % para manzanas con densidad media-alta y 15,5 % para manzanas con densidad alta; mientras que los residuales en columnas es decir, los errores de comisión implican cubiertas del mapa que no se ajustan a la realidad, siendo 12,1 % para densidad baja, 20,9 % para densidad media, 24,2 % para densidad media-alta y 15,2 % para densidad alta.

Se deduce de la matriz de confusión que el método propuesto logra discriminar satisfactoriamente las densidades edificadas en los extremos de las categorías (alta y baja densidad), aunque su exactitud disminuye en aquellas clases intermedias, donde las diferencias espectrales son menores, lo que aumenta la probabilidad de que un píxel con densidad media sea asignado a la clase media-alta y viceversa.

	Densidad Baja	Densidad Media	Densidad Media - Alta	Densidad Alta	Total	Exactitud usuario	Error comisión
Densidad Baja	478	44	6	16	544	87,90%	12,10%
Densidad Media	53	408	49	6	516	79,10%	20,90%
Densidad Media - Alta	7	49	376	64	496	75,80%	24,20%
Densidad Alta	4	5	75	468	552	84,80%	15,20%
Total	542	506	506	554	2108		
Exactitud usuario	88,20%	80,60%	74,30%	84,50%			
Error omisión	11,80%	19,40%	25,70%	15,50%			

Exactitud Global: 82,06 %

Tabla II. Matriz de confusión. Clasificación de imagen Landsat 5 TM e información auxiliar del catastro urbano de Tandil (2011).

Fuente: elaborado por Picone y Linares, 2014

Reflexiones finales

En principio, se debe destacar que los cálculos sobre el área, evolución de superficies construidas, la identificación de las principales formas y densidades de construcción se convierten en una técnica de gran utilidad para la planificación y gestión del uso del suelo urbano. El hecho de trabajar con imágenes satelitales gratuitas con amplia distribución geográfica como temporal y de contar con firmas espectrales generalizables permite aplicar los procedimientos descriptos a diferentes áreas de estudio y periodos considerados.

Más allá de los fines de este trabajo se podrían señalar otras utilidades de extraer área urbanas construidas, algunas de ellas serían: el ajuste de las unidades administrativas de recolección de información de los organismos oficiales de estadísticas y censos (ej. radios censales); la obtención de insumos básicos para la realización de proyecciones sobre la expansión urbana; la evaluación y seguimiento de los impactos provocados por los planes de ordenamiento territorial implantados y, también, podría emplearse para detectar y controlar la expansión irregular e ilegal en las periferias urbanas.

Sin embargo, la evaluación de los procedimientos descriptos, puede ser optimizada significativamente si se corrigen dos aspectos comentados en este trabajo. Uno, referido a la fuente de datos auxiliares empleada para evaluar la clasificación de las imágenes Landsat 5 TM. Esta fuente de datos suministrada por la Municipalidad de Tandil se presenta como deficiente y desactualizada en cuanto a la información digital disponible, por lo tanto, existe un subregistro de la superficie edificada que afecta la fidelidad de la verdad de campo sobre la cual se evalúa la clasificación, impactando por lo tanto en un aumento de los valores de comisión en la matriz de confusión. De la misma manera, las bases de datos catastrales no registran la superficie edificada no cubierta como: grandes espacios públicos deportivos y/o recreativos, estacionamientos públicos y privados, infraestructuras de transporte automotor y peatonal, grandes equipamientos públicos, entre los más significativos.

Otro de los errores existentes proviene de las diferencias entre las unidades espaciales para validar la información. Las manzanas provenientes del catastro urbano de Tandil poseen una superficie de 16.900 m², mientras que los píxeles de las imágenes empleadas es de 900 m². Fue necesario realizar una agregación espacial de los píxeles para llevarlos a unidades comparables, lo que implica, como en todo proceso de agregación, una alteración de los datos originales. Esta diferencia es aún mayor si se considera las parcelas que se encuentran en el área complementaria de la ciudad. Es por ello que se debería pensar en otro procesamiento digital de los datos auxiliares para eliminar errores inducidos en el método de validación, o bien reemplazar esta fuente por otra alternativa, donde las imágenes de mayor resolución espacial serían una excelente alternativa.

Bibliografía

- ACKERMANN, G. y MERING, C. 2007. *Extracción de áreas construidas a partir del análisis de imágenes satelitales SPOT*. En: RIVAS, R., GRISOTO, A. y SACIDO M. (Eds). 2007. Teledetección. Hacia un mayor entendimiento de la dinámica global y regional. UNCPBA. Tandil, Argentina. pp. 369-376.
- ADAMS, J. y GUILLESPIE, A. 2006. *Remote Sensing of Landscapes with Spectral Images. A Physical Modeling Approach*. Cambridge University Press, New York, USA. 362 pp.
- AUCH, R., TAYLOR, J. y ACEVEDO, W. 2004. *Urban Growth in American Cities. Glimpses of U.S. Urbanization*. Circular 1252, U.S. Geological Survey Information Services, Denver. 52 pp.
- BURGESS, E. W. 1925. *The growth of city: an introduction to a research project*. En: PARK, R. E., BURGESS E. W. y MCKENZIE, R. D. (Comp.). 1925. *The city*. Chicago, EE.UU. The University of Chicago Press.
- CHANDER, G., MARKHAM, B. L. y HELDER, D. L. 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. N° 113. pp. 893-903.
- CHAVEZ, P. S. 1988. An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*. N° 24. pp. 459-479.
- CHUVIECO, E. 2010. *Teledetección Ambiental. La observación de la tierra desde el espacio*. Editorial Planeta, S. A. Barcelona, España (Edición actualizada). 591 pp.
- CONGALTON, R. G. y GREEN, K. 1998. *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (1st edition)*. London: Taylor & Francis (CRC Press). 160 pp.
- DARE, P. M. 2005. "Shadow analysis in High-Resolution satellite imagery of urban areas" en *Photogrammetric Engineering & Remote*. Vol 71, N°2. pp 169-177.
- DONNAY, J. P., BARNSLEY, M. J. y LONGLEY, P. A. 2001. *Remote Sensing and Urban Analysis*. Taylor & Francis. Londres, Inglaterra. 256 pp.
- GREEN, K. 2000. "Selecting and Interpreting High-Resolution Images". *Journal of Forestry, Society of American Foresters*. Volume 98, Number 6, 1. p. 37-40.
- HERMOSILLA, T. y RUIZ, L. Á. 2009. Detección automática de edificios combinando imágenes de satélite y datos lidar. *Semána Geomática*. Barcelona, España.
- HERMOSILLA, T., RUIZ, L. Á., RECIO R. J. y CAMBRA-LÓPEZ, M. 2012. Assessing contextual descriptive features for plot-based classification of urban areas. *Landscape and Urban Planning*. N° 106. pp. 124-137.

- JENSEN, J. R. y COWEN, D. C. 1999. Remote sensing of Urban/Suburban Infrastructure Socio-Economic Attributes. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 5. pp. 611-622.
- LEE, S. 2006. Landsat ETM sub-pixel analysis of urban landscape using fuzzy c-means clustering and differentiated impervious surface classes. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Annual Conference*. Bethesda, Maryland, EE.UU. 7 pp.
- LINARES, S. y TISNÉS, A. 2011. Extracción y análisis de superficies urbanas construidas empleando imágenes Landsat 5 (TM). *I Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica - IV Reunión de Usuarios de Tecnologías de la Información Geográfica del NEA*. Facultad de Humanidades - UNNE, Laboratorio de Tecnologías de la Información Geográfica, IIGHI - CONICET, Resistencia, Argentina. pp. 180-191.
- LONGLEY, P. A. 2002. “Geographical Information Systems will developments in urban remote sensing and GIS lead to ‘better’ urban geography?”. *Progress in Human Geography*. Vol. 26 N° 2. pp. 231-239.
- MESEV, V., GORTE, B. y LONGLEY, P. A. 2001. Modified Maximum-Likelihood Classification Algorithms and their Application to Urban Remote Sensing. En: DONNAY, J-P.; BARNSLEY, M. Y LONGLEY, P. (Eds.). 2001. *Remote Sensing and Urban Analysis*. Taylor and Francis. Londres, Inglaterra. pp. 62-83.
- MOLINA MORA, Z. y CHUVIECO, E. 1997. Detección del crecimiento urbano en la ciudad de Maracaibo (Venezuela) mediante análisis multitemporal de imágenes MSS y TM. En: CASANOVA, J. L. Y SANZ, J. (Eds.). 1997. *Teledetección: usos y aplicaciones*. Universidad de Valladolid. Valladolid, España. pp. 361-368.
- POWELL, R., ROBERTS, D., DENNISON, P. y HESS, L. 2007. Sub-pixel mapping of urban land cover using multiple endmember spectral mixture analysis: Manaus, Brazil. *Remote Sensing of Environment* 106. pp. 253-267.
- RANCHIN, T. y WALD, L. 2010. Data Fusion in Remote Sensing of Urban and Suburban Areas. En: RASHED, T. y JÜRGENS, C. (Eds.). 2010. *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Series: Remote Sensing and Digital Image Processing, Vol. 10. Springer. pp. 193-218.
- RECIO RECIO, J., PARDO PASCUAL, J., RUIZ, L. Á.; FERNÁNDEZ SARRIA, A. y CÓRCOLES, P. 2003. Detección y cartografiado de los procesos de expansión urbana mediante técnicas combinadas de teledetección y SIG. En: *IX Conferencia Iberoamericana de SIG*, Cáceres, España. pp. 1-14.
- ROBERTS, D. A. y HEROLD, M. 2004. Imaging spectrometry of urban materials. En: KING, P., RAMSEY, M. S. y SWAYZE, G. (Eds.). 2004. *Infrared Spectroscopy in Geochemistry, Exploration and Remote Sensing*, Mineral Association of Canada, Short Course Series Volume 33, London, Ontario, Canada. pp. 155-181.

RODRÍGUEZ GALIANO, V. y CHICA RIVAS, M. 2012. Clasificación de imágenes de satélite mediante software libre: nuevas tendencias en algoritmos de Inteligencia Artificial. En: XV Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica, Madrid, AGE-CSIC, 19-21 de septiembre de 2012. 7 pp.

SCHÖPFER, E., LANG, S. y STROBL, J. 2010. Segmentation and Object-Based Image Analysis. En: RASHED, T. y JÜRGENS C. (Eds.). *Remote Sensing of Urban and Suburban Areas*. Series: Remote Sensing and Digital Image Processing, Vol. 10. Springer. pp. 181-192.

STEFANOV, W. L., RAMSEY, M. S. y CHRISTENSEN, P. H. 2001. “Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers” en *Remote Sensing of Environment*. Vol. 77. pp 173 – 185.

STEWART, I. y OKE, T. 2009. Classifying urban climate field sites by “local climate zones”: the case of Nagano, Japan. En: *The 7th International Conference on Urban Climate*. International Association on Urban Climate. Yokohama, Japan. 4 pp.

WENG, Q. 2010. *Remote Sensing and GIS Integration: Theory, Methods, and Applications*. The McGraw-Hill Companies, EE.UU. 416 pp.

YUJNOVSKY, O. 1971. *La estructura interna de la ciudad. El caso latinoamericano*. Ediciones SIAP. Buenos Aires, Argentina.

Fecha de recepción: 29 de abril de 2014

Fecha de aceptación: 30 de junio de 2014

© 2014 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR