

Juan Miguel Rodríguez López,^a Pablo Rosso,^b Jürgen Scheffran^c
y Gian Carlo Delgado Ramos^d

Teledetección del uso sustentable de tierra rural-urbana en la Ciudad de México: un análisis cualitativo para la confiabilidad y validación

Resumen | La Ciudad de México es una de las urbes más grandes del mundo donde de manera importante se ha transformado el suelo de conservación a suelo urbano. Este trabajo compara la zona sur de la Ciudad de México sobre la base de imágenes, disponibles de manera gratuita (Landsat–30m) e imágenes de alta resolución (RapidEye–5m), con el objeto de verificar su confiabilidad y validez en forma explorativa. Sostenemos que el grado de resolución de las imágenes de libre acceso disponibles para el análisis del desarrollo urbano en un nivel estructural del uso del suelo, no es suficiente para identificar la evolución de sectores específicos de la ciudad. A pesar del hecho de que puede observarse el patrón general de cambios en el uso del suelo, los cambios al interior de la estructura urbana son difíciles de ver a una resolución de 30 metros por pixel en las imágenes de Landsat. En términos de la validez, este análisis es meramente gráfico, y exhibe una correlación prometedora del desarrollo urbano con las denuncias ambientales y de uso de suelo, aunque de cualquier modo, será necesario hacer un análisis numérico en el futuro.

Remote Sensing of Sustainable Rural-Urban Land Use in Mexico City: A Qualitative Analysis for Reliability and Validity

Abstract | Mexico City is one of the largest cities on the globe and a site where important transformations of nature reserves into urban areas have been taking place. This paper compared the southern part of Mexico City based on free images available (Landsat–30m) and high-resolution imagery (RapidEye–5m) from an exploratory qualitative perspective in the logic of reliability and validity. We argue that the resolution of the free imagery available

a Center for a Sustainable University y KlimaCampus, Hamburgo. Universität Hamburg. **Correo electrónico:** miguel.rodriguez@uni-hamburg.de

b Investigación Aplicada, Blackbridge. **Correo electrónico:** pablo.rosso@blackbridge.com

c Instituto de Geografía, Universität Hamburg. **Correo electrónico:** juergen.scheffran@zmaw.de

d Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades (CEIICH) de la Universidad Nacional Autónoma de México. **Correo electrónico:** giandelgado@unam.mx

for the assessment of urban development on the structural level of land use is not sufficient to identify the development of specific parts of the city. Despite the fact that the general pattern of changes in land use is observable, changes within the urban structure are difficult to see with a resolution of 30 meters per pixel in the Landsat images. For validity, this analysis is merely graphic, and it shows a promising matching of urban development with environmental and land complaints; nevertheless, a numerical analysis is needed in the future.

Palabras clave | teledetección – análisis cualitativo – denuncias ante PAOT – uso de suelo – Ciudad de México

Keywords | remote sensing – qualitative analysis – PAOT complaints – land use – Mexico City

Introducción

DADO QUE LAS CIUDADES están creciendo como consecuencia de la globalización, resultan más que necesarios los planes integrales para un uso sustentable del suelo. La zona sur de la Ciudad de México,¹ una de las mega urbes del mundo, ha sido un ejemplo de transformación del suelo de conservación a suelo urbano (Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011). La teledetección brinda una oportunidad y una herramienta para observar el uso del suelo y el desarrollo urbano (Hacker *et al.* 2013; Kit y Lüdeke 2013; Kit *et al.* 2012; Kohli *et al.* 2012; Odindi *et al.* 2012; Taubenböck y Kraff 2014; Ward y Peters 2007), al tiempo que permite mejorar la comprensión de la transformación del uso del suelo. Específicamente indagamos la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo los principios de confiabilidad y validez pueden ser cualitativamente verificados mediante el uso de teledetección para el caso de la zona sur de la Ciudad de México? Este trabajo se propone desarrollar dos pruebas exploratorias de análisis de teledetección, una de confiabilidad y otra de validez. Para comprobar la confiabilidad, comparamos imágenes de mediana y alta resolución espacial provenientes de dos fuentes: los satélites Landsat y RapidEye. Para comprobar la validación, nuestro segundo enfoque fue integrar imágenes de alta resolución con el mapeo de denuncias ante la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT), una entidad del gobierno de la Ciudad de México responsable de revisar y procesar denuncias ambientales y de uso de suelo.

Si bien algunos autores han empleado teledetección para el caso de México

1 Legalmente la Ciudad de México alude a 16 delegaciones que conforman el Distrito Federal. Por tanto, excluye la zona conurbada que suma 60 municipios adyacentes de los estados de México e Hidalgo (www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010). Nos centramos sólo en la Ciudad de México.

(Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011), la confiabilidad y la validez no han sido aspectos considerados. Por tanto, nuestra investigación vincula los resultados de un método de teledetección de alta resolución (análisis de imágenes con base en objetos / *object-based image analysis method*) con el uso del suelo en la zona sur de la Ciudad de México para así demostrar el potencial y las limitaciones de esta metodología bajo los principios de confiabilidad y validez desde una aproximación cualitativa.

La siguiente sección brinda una introducción sobre cómo la Ciudad de México y su periferia se enfrentan con el desafío de unificar los principios normativos del desarrollo sustentable con los principios metodológicos de confiabilidad y validez. Posteriormente, las secciones dedicadas a métodos y resultados exhiben la clasificación del uso del suelo en diferentes momentos temporales en el sur de la Ciudad de México, analizando cualitativamente la confiabilidad y validez. La discusión de resultados incluye una revisión de la literatura sobre el desarrollo urbano y los conflictos ambientales en la Ciudad de México. Por último, las conclusiones formuladas se vinculan a los beneficios y costos de la teledetección de alta resolución para el caso de dicha ciudad.

Revisión de literatura y teoría

La Ciudad de México se ubica tierra adentro en el centro-sur del país (figura 1), siendo una de las concentraciones urbanas más grandes del globo. También es una de las acumulaciones de asentamientos informales más grandes del mundo como consecuencia de las intensas migraciones rural-urbana y urbana-urbana experimentadas (Marx *et al.* 2013; Platt 2010). Así mismo, el nivel de conflictos políticos y sociales ha sido históricamente alto en esta zona (Davis 1994; 2006; Marshall y Cole 2014). Este creciente espacio urbano ha derivado en una elevada demanda de recursos, sobre todo de agua, que fluye de norte a sur a través de las áreas rurales y periurbanas (Delgado Ramos 2015). En el caso del sur, el agua fluye a través de las reservas naturales o suelo de preservación hacia las áreas urbanizadas (Jujnovsky *et al.*) donde han proliferado los asentamientos irregulares (Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011). Se producen también interacciones entre las áreas urbanas y rurales en lo que respecta a flujos de alimentos y servicios sociales: el área urbana en crecimiento afecta a los agricultores, quienes también sufren por la escasez de recursos (agua, suelo y aire) generada por la urbanización. A pesar de ello, los “agricultores urbanos” también se benefician—en principio— de los servicios de las ciudades tales como acceso a educación y mejor atención médica (Méndez Lemus 2012).

Una descripción detallada de la región entre los contextos urbano y periurbano debería incluir una expansión de asentamientos con gran crecimiento poblacional

en la Ciudad de México (Pérez Campuzano y Santos Cerquera 2013). Las áreas edificadas de la ciudad crecen y se expanden hacia la periferia en todas direcciones a expensas del suelo de conservación o de valor ecológico, especialmente en la zona sur (Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011). Por esta razón vemos la zona sur de la ciudad como área de investigación (figura 2).

El suelo de conservación formalmente comprende 87,294 hectáreas, principalmente en la parte sur de la Ciudad de México. Cubre alrededor de 59% del territorio de la Ciudad de México, brindando servicios ecológicos claves tales como: preservación de la biodiversidad, regulación del clima local, captura de agua que contribuye a la recarga del acuífero de la ciudad a un ritmo promedio de unos 151.4 millones de metros cúbicos anuales (41% del agua que se usa en la ciudad proviene del subsuelo), la reducción de contaminantes del aire y la captura de carbono (el total de carbono capturado en el suelo de conservación se estima en 8.5 millones de toneladas de carbono), entre otros (GO-DF 2014).

La población de esta área está calculada en unos 2.2 millones de personas, de las cuales 700,000 (o el 8% de la población total de la Ciudad de México) están vinculadas a la zona de conservación (Aguilar 2013). Casi 80% del suelo de



Figuras 1 y 2. Mapa de localización y área de investigación.

conservación es de propiedad social,² el cual corresponde a centros urbanos, zonas agrícolas y áreas forestales de los 36 pueblos rurales asentados ahí; 15% es propiedad privada (correspondiente a vivienda, establecimientos comerciales y servicios), y 5% es propiedad federal (barrancas, cuerpos de agua e infraestructura federal, como la red eléctrica) (PAOT 2010). Son tres los distritos administrativos que concentran la mayor parte de la zona de conservación: las delegaciones de Milpa Alta (32.2%), Tlalpan (29.4%) y Xochimilco (11.9%) (GO-DF 2014; Rodríguez *et al.* 2013). El amplio, intrincado y, por tanto confuso marco legal asociado al suelo de conservación y que involucra los tres niveles de gobierno (municipal, estatal y federal), ha creado una oportunidad para que ciudadanos comunes, especuladores de bienes raíces, e incluso autoridades locales, se aprovechen o sean permisivos al interpretar y aplicar la ley. Por lo tanto, no es casual que la definición de la zona que corresponde al suelo de conservación cambie periódicamente, y que por tanto la línea divisoria entre suelo de conservación y suelo urbano tenga que ser actualizada, legalmente, en la medida en que es superada por los procesos sociales (Aguilar 2013). De manera particular, el exceso de reglamentación que divide el suelo urbano y el suelo de conservación y, por tanto, las obligaciones legales entre las diferentes autoridades, en la práctica ha permitido diluir o duplicar responsabilidades. En consecuencia, no sorprende que entre 1970 y 2010, las delegaciones que albergan suelo de conservación hayan incrementado su población en 25.54%, una tasa mayor a la observada en el resto de las delegaciones de la ciudad (Santos 2013). Tal incremento poblacional ha provocado cambios en el uso del suelo y la erosión de los servicios ecológicos tales como los que previamente se mencionaron (GO-DF 2014). Con estos antecedentes abordamos la pregunta de investigación mediante el desarrollo de pruebas de confiabilidad y validez del análisis por teledetección en la zona sur de la Ciudad de México.

La evaluación del problema del uso sustentable del suelo en la Ciudad de México exige que se avance hacia mejores “mediciones” metodológicas que respeten ciertos principios, en particular principios de confiabilidad y validez

2 Existen tres tipos de propiedad de la tierra en México: privada, pública y social. La última es consecuencia de la Revolución Mexicana que derivó en la restitución de la tierra despojada a comunidades rurales por caciques (esto conformó la tierra de propiedad comunal, tal y como lo designa la Constitución de 1917), mientras que la dotación de tierra como propiedad común a los campesinos mexicanos conformó la tierra de propiedad ejidal. En el país, el 53% de la tierra es de propiedad social. En la Ciudad de México, aún después de procesos de expansión urbana y erosión del suelo que derivaron en múltiples casos de expropiación de tierra, permanecen aún 333,938 hectáreas de propiedad social, el grueso en el suelo de conservación de la ciudad; 25,916 ejidatarios o comuneros viven ahí (Vargas y Martínez 1999). Debe notarse que algunas de las áreas más conservadas corresponden a tierra de propiedad social.

(véanse, por ejemplo, en relación con estos principios, DeMarrais y Lapan 2004; King *et al.* 1994; Singh 2007; Vaus 2002; Walliman 2006).

La confiabilidad es fácil de verificar porque hay un buen número de métodos estandarizados para comprobarla, tales como *test-retest* (prueba y comprobación de la prueba) y la denominada forma alterna (Jupp 2006, 262-263). La confiabilidad refiere al hecho de que los datos generados a partir del uso de los mismos métodos de medición (*test-retest*) o las dos formas de la misma metodología de comprobación sobre los mismos individuos observados (forma alterna), conducen a los mismos resultados (King *et al.* 1994).³

Un segundo principio es maximizar la validez de nuestras mediciones, donde validez se define como “medir lo que creemos que estamos midiendo” (King *et al.* 1994, 25). Un buen método para evaluar la validez es la triangulación, es decir, medir el mismo fenómeno con varios métodos (DeMarrais y Lapan 2004, 260).

Se eligió la Ciudad de México como caso de estudio por ser históricamente una de las ciudades menos sustentables del mundo (Davis 1994, 2006). Sin embargo, en años recientes, la Ciudad de México ha sido presentada públicamente como pionera en la formulación de respuestas formales e informales ante los retos de la sustentabilidad, de parte tanto del gobierno como de la sociedad civil (Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011). Este enfoque de investigación exige una creciente plataforma interdisciplinaria para impulsar investigaciones sobre el diseño urbano sustentable (Heldens *et al.* 2011), contribuyendo con un análisis cualitativo exploratorio de dicho problema a partir de la teledetección remota.

Hay una abundante literatura que muestra el potencial y las posibles dificultades que crea la utilización de datos de alta resolución en comparación con imágenes de Landsat (Helden *et al.* 2011); sin embargo, el presente trabajo se propone poner a prueba estas ventajas como las desventajas para el caso específico de la Ciudad de México. Las imágenes de alta resolución (RapidEye) han sido de gran valor para el proyecto de investigación porque tienen una mayor resolución espacial (5 metros) y brindan datos de manera rápida, actual y homogénea de grandes áreas de la ciudad. Dos imágenes de RapidEye (verano de 2009 y verano de 2014) con resolución de 5 metros nos permiten mostrar las ventajas de imágenes de alta resolución en comparación con las de Landsat (30 metros de resolución) para la observación del uso del suelo en la parte sur de la Ciudad

³ En este contexto no es menor que el estándar cartográfico actual para la toma de decisiones sea diferente para el suelo de conservación y el suelo urbano: el primero a escala de 1:20,000 y el segundo a escala de 1:50,000 (PAOT 2010). Y es que de ese modo es más que usual que se generen superposiciones cartográficas y rangos de error; aspectos que de ninguna manera contribuyen a la planificación integrada del uso del suelo.

de México. Por ejemplo, aunque las imágenes de Landsat muestran un desarrollo a expensas de reservas naturales o suelo de conservación, los cambios dentro de la estructura urbana son sin embargo difíciles de ver a una resolución de 30 metros. Resultados similares también fueron confirmados por otros científicos en distintas partes del mundo (para una revisión de la literatura, véase: Hel-dens *et al.* 2011).

Métodos

Se usa un método de análisis de imágenes basado en objetos (Dupuy *et al.* 2012) para observar la conversión del uso del suelo entre 2009 y 2014. Luego los resultados son contrastados con la base de datos de la PAOT sobre denuncias ambientales y uso de suelo. El total de información en la base de datos de la PAOT incluye casi 18 mil denuncias georreferenciadas entre 2002 y 2013.

Esta base de datos puede ser parcialmente descargada del sitio de la PAOT pero la base completa de 2002 a 2013 fue obtenida directamente de la PAOT por medio de una solicitud del CEIICH-UNAM. La PAOT colecta denuncias en cinco rubros: uso ilegal del suelo, deterioro de las áreas verdes, residuos, ruido / vibraciones, y animales. Cualquier persona puede denunciar ante la PAOT, sea por teléfono, electrónicamente o en persona. Primero, la PAOT debe definir el carácter legal de la denuncia para poder admitirla en un plazo de 13 días laborales. Después de su admisión, la PAOT genera un informe preliminar en 30 días hábiles. La denuncia finaliza con una resolución, acto de conciliación o recomendación de acción para otros actores, tales como la policía o el sector salud. El punto central de nuestro trabajo es que la expansión urbana debe producir en el área de estudio un incremento en el número de denuncias sobre asentamientos ilegales / irregulares.

Los principales tipos de cobertura de suelo en el área abarcada por este estudio fueron identificados por observación directa y con la ayuda de conocimiento experto e imágenes de Google Earth. La selección final de clases de cobertura de suelo se basó en dos criterios: factibilidad analítica y relevancia de acuerdo con la meta del estudio. Considerando la reducida cantidad de imágenes disponibles, no se pudo hacer un análisis detallado de tiempos seriados; por lo tanto, fue limitada la capacidad para identificar tipologías de cobertura del suelo complejas y dinámicas. Tomando en cuenta estas limitaciones, y considerando que la meta principal de este trabajo es analizar el impacto de la urbanización sobre suelo de conservación, se enfatizó el mapeo de áreas urbanas y forestales, dado que estas últimas están frecuentemente asociadas con áreas protegidas. Aunque la cobertura de suelo de tipo forestal es importante para estimar el impacto de la urbanización sobre áreas protegidas y suelo de conser-

vación, en última instancia hay que evaluar el efecto del crecimiento urbano sobre la base de la extensión legal de las áreas protegidas y el suelo de conservación por medio de información auxiliar vectorial. Por tanto, las clases de cobertura de suelo que se incluyeron en este análisis, fueron: urbana, forestal, vegetación no forestal (pastizales y cultivos), suelo desnudo y agua.

Se utilizaron dos mosaicos de productos RapidEye de nivel 3A (números 1447913 y 1447914) para cubrir las áreas de interés para dos fechas: noviembre de 2009 y agosto de 2014. También se usó una imagen Landsat 5 y una Landsat 8 (path: 026, row: 047), correspondientes a febrero 2009 y agosto 2014, respectivamente. Los dos mosaicos *RapidEye* fueron procesados para obtener una cobertura completa para cada fecha. Las escenas de Landsat fueron editadas hasta coincidir con las dimensiones de los mosaicos RapidEye. Tanto las imágenes de Landsat como las de RapidEye fueron pre procesadas mediante procedimientos de eliminación de neblina y co-registro geométrico en la medida de lo necesario, para mejorar su precisión espectral y espacial.

Las cuatro imágenes fueron clasificadas de acuerdo con un enfoque basado en objetos usando el programa E-cognition. En el caso de Landsat 5 se emplearon las siete bandas disponibles y para Landsat 8 se seleccionaron las bandas 1-7. Para el análisis de los datos de RapidEye, se emplearon las cinco bandas disponibles.

Por medio del algoritmo de segmentación de resolución múltiple, y después de probar diferentes parámetros de segmentación, se eligió el tamaño óptimo de segmento para cada uno de los sensores, y se aplicó como sigue:

- Landsat 5: Scale parameter (Parámetro de escala) = 10, compactness (grado de densidad) = 0.9, shape (forma) = 0.1
- Landsat 8: Scale parameter = 50, compactness = 0.9, shape = 0.1
- RapidEye: Scale parameter = 50, compactness = 0.5, shape = 0.1

Para la definición de estos parámetros, (véase Laliberte *et al.* 2004). El sistema de clasificación se alimentó usando 10-20 muestras bien distribuidas para cada clase de cobertura de suelo. Para nuestra clasificación usamos las siguientes variables (características de los objetos): NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, en inglés), brillo promedio, promedio de reflectancia de cada banda, homogeneidad de GLCM (Gray Level Co-Occurrence Matrix), y algoritmos de textura de entropía de GLCM en todas direcciones.

Después de la clasificación, para valorar la precisión de los resultados se realizó una inspección visual con ayuda de información adicional. En algunos casos fue necesario llevar a cabo un nuevo muestreo y la subsecuente clasificación, mientras que en otros se realizó una reasignación manual de clase. La ma-

yoría de las diferencias relevantes entre datos del mismo sensor fueron observadas en el tipo de vegetación en las imágenes de Landsat, dado que febrero (Landsat 5, 2009) es un mes particularmente seco en la región sur de la Ciudad de México, que contrasta con el mes de agosto, mucho más húmedo. Un análisis de precisión semi-cuantitativo indicó una precisión general mayor a 80%. Con el objeto de visualizar la dinámica del crecimiento urbano, se hizo un análisis de la clasificación posterior a la detección de cambios entre los datos correspondientes a las dos imágenes de RapidEye.

La combinación de teledetección y datos de denuncias es muy interesante porque representa una nueva forma de detección remota con información estadística integrada. Consideramos que la combinación de análisis de teledetección con análisis estadísticos tiene el potencial de cambiar la forma en la que los científicos analizan los fenómenos sociales. Usamos este proyecto como ejemplo concreto exploratorio de cómo los científicos sociales pueden prácticamente utilizar la teledetección con información recabada por secretarías de gobierno u otras entidades. La colecta de datos censales y estadísticos es muy costosa y engorrosa. Conforme el costo de relevamiento de imágenes satelitales continúe cayendo, observamos un gran potencial de combinar la teledetección con datos censales y estadísticos para generar más valor a partir de esa información disponible.

Resultados

Para poner a prueba la confiabilidad de las imágenes de Landsat y RapidEye desde una perspectiva exploratoria, esta sección apela a los mismos métodos de medición por detección remota para apreciar las diferencias en los resultados entre ambas fuentes de información, en los mismos y diferentes puntos en el tiempo y con diferentes resoluciones. Este procedimiento se conoce como confiabilidad en formas alternas (Jupp 2006, 275) y difiere del de *test-retest* en el que la confiabilidad se basa en diferentes formas (RapidEye y Landsat) de la misma prueba (teledetección) entre las mediciones de uso de suelo. La base de datos de denuncias de la PAOT es utilizada para la validación por triangulación. El objetivo de la triangulación es asegurar que lo que se está midiendo efectivamente corresponde con lo que se asegura estar midiendo.

Resulta claro que mientras más elevada sea la resolución de cada pixel, mejor será la resolución de la imagen en cuanto a confiabilidad mediante la prueba de forma alterna. ¿Qué tanto mejor puede llegar a ser? Frente a las preguntas de investigación referidas a comprobar cualitativamente los principios de confiabilidad y validez, las figuras 3a y 3b presentan una comparación entre la clasificación por cobertura del suelo en el área investigada en la Ciudad de México a partir de

datos de Landsat y RapidEye, respectivamente. Estas figuras han sido elaboradas a partir de las imágenes detalladas obtenidas en el mismo día, 27 de agosto de 2014, para ambos casos, Landsat y RapidEye. Brinda una expresión gráfica del grado de mejoría que puede representar una imagen con definición de 5 metros (RapidEye) en comparación con la resolución de 30 metros (Landsat). Es fácil observar cómo el patrón total de la imagen es similar, ya que todas las grandes estructuras urbanas están representadas en ambas imágenes y, de manera especial, la diferencia entre lo urbano y lo no-urbano es claramente identificable.

Para corroborar la confiabilidad desde una perspectiva exploratoria, las figuras desde la 4a a la 4d comparan una sub-muestra de toda el área investigada, enfocándose en el Parque Ecológico de Xochimilco y áreas adyacentes. Elegimos

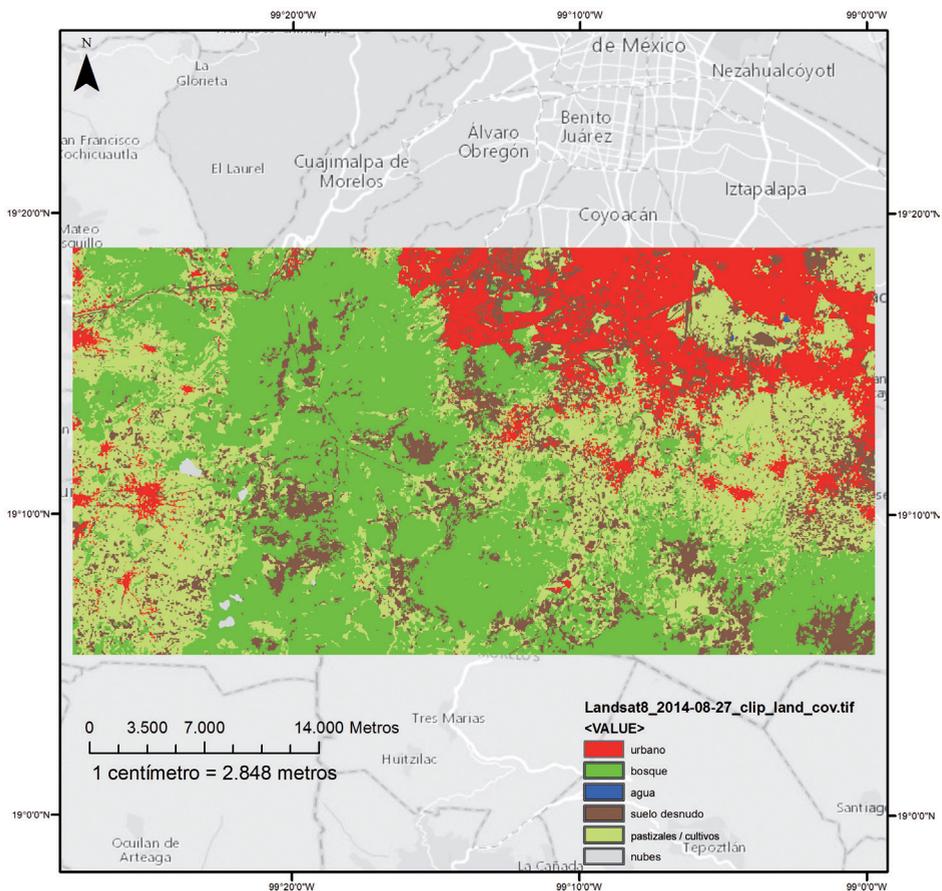


Figura 3a. Comparación de la clasificación de uso de suelo con Landsat y RapidEye el 27.08.2014 / Landsat (30 m).

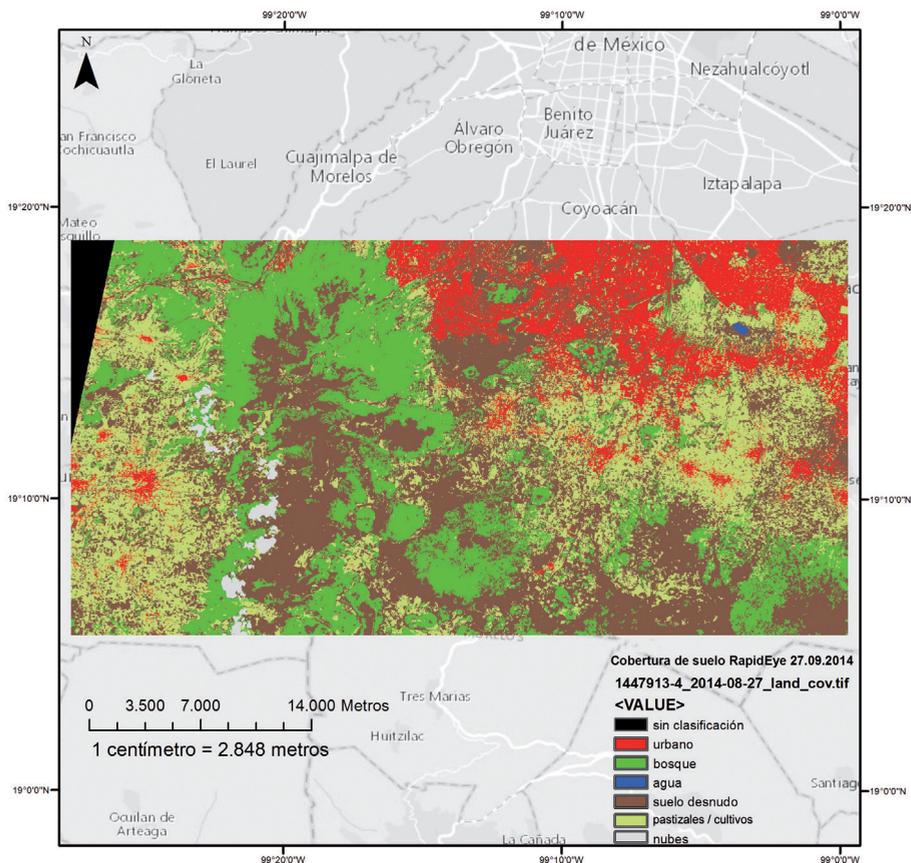


Figura 3b. Comparación de la clasificación de uso de suelo con Landsat y RapidEye el 27.08.2014 / RapidEye (5 m).

esta área porque es fácilmente identificable y potencialmente útil para futuras investigaciones de campo, dado que muchos fenómenos como agricultura, ocupación del suelo, y cuerpos de agua están presentes en esta pequeña muestra del análisis. Si examinamos las imágenes de Landsat, cuando se reduce la escala del análisis en las figuras 4a y 4c, se pierden algunas estructuras específicas de la urbanización dentro del Parque, o en la zona sur del Parque, como por ejemplo calles e instalaciones de agua. En resumen, los límites entre las áreas urbanas y no-urbanas son fácilmente reconocibles en toda el área de investigación, como por ejemplo la forma triangular del Parque Ecológico de Xochimilco (claramente identificable en las figuras 3a y 3b). Sin embargo, no es posible hablar del mismo patrón del espacio urbano cuando se observa una escala territorial

más pequeña, es decir, hacia adentro del Parque Ecológico de Xochimilco (véase y compárese figuras 4a y 4b para 2009 y 4c y 4d para 2014). Casi toda la variación interna y las sub-estructuras al interior del Parque Ecológico desaparecen (por ejemplo, urbanizaciones al sur del Parque), y las diferentes actividades urbanas en los límites de éste tienden a ser difíciles de reconocer en las imágenes de Landsat (véase figuras 4a y 4c). Aún más, la baja resolución resulta en problema de mala clasificación, ya que no se trata solamente de lo que se ve, sino también de lo que se puede identificar incorrectamente. Se trata de un error derivado de la abundancia de píxeles mezclados en Landsat.

Para obtener una primera validación de resultados, este trabajo presenta una triangulación gráfica de datos sobre los cambios en las clasificaciones del uso del suelo entre 2009 y 2014 (figura 5a, RapidEye) y las denuncias de uso irregular de suelo de la PAOT (figura 5b) en el sur de la Ciudad de México. Los cambios entre ambas clasificaciones del área a partir de los datos de teledetección fueron generados por un análisis de imágenes basado en objetos. Para este caso, los cambios en el uso del suelo entre 2009 y 2014 (en rojo, figura 5a) se usaron para mostrar el patrón resultante de la expansión urbana entre dichos años (en rojo, en la figura 5a) en comparación con las quejas referidas exclusivamente al uso irregular del suelo de conservación (figura 5b, puntos rojos).

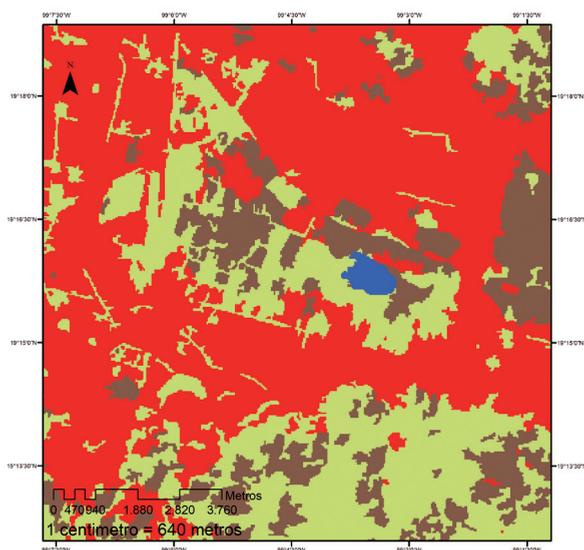


Figura 4a. Comparación de la relación costo eficiencia de las clasificaciones con imágenes de RapidEye y Landsat. Ejemplo: Parque Ecológico de Xochimilco / Landsat 30 m (2009). Rojo: suelo urbano / Verde: pastizales/cultivos / Marrón: suelo desnudo / Azul: agua.

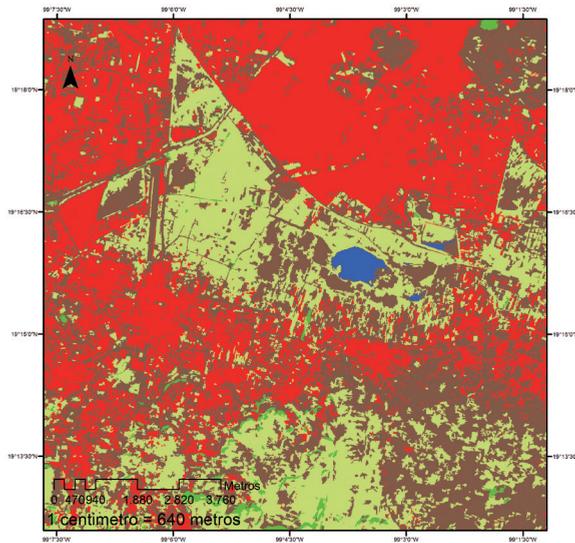


Figura 4b. Comparación de la relación costo eficiencia de las clasificaciones con imágenes de RapidEye y Landsat. Ejemplo: Parque Ecológico de Xochimilco / RapidEye 5 m (2009). *Rojo: suelo urbano / Verde: pastizales y cultivos / Verde fuerte: bosques y regiones arboladas / Marrón: suelo desnudo / Azul: agua.*

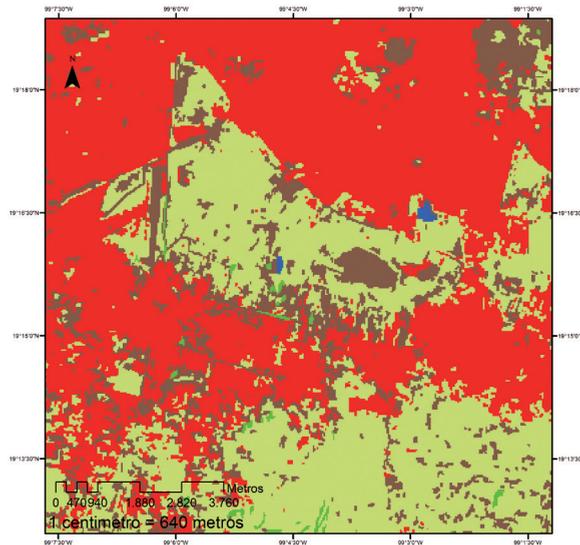


Figura 4c. Comparación de la relación costo eficiencia de las clasificaciones con imágenes de RapidEye y Landsat. Ejemplo: Parque Ecológico de Xochimilco / Landsat 30 m (2014). *Rojo: suelo urbano / Verde: pastizales/cultivos / Marrón: suelo desnudo / Azul: agua.*

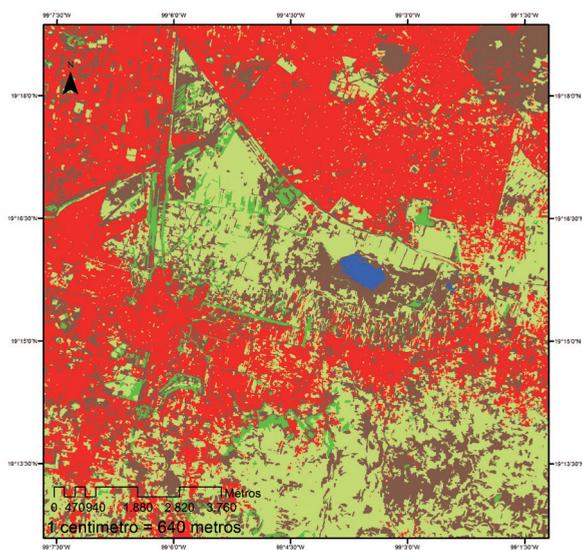


Figura 4d. Comparación de la relación costo eficiencia de las clasificaciones con imágenes de RapidEye y Landsat. Ejemplo: Parque Ecológico de Xochimilco / RapidEye 5 m (2014). Rojo: suelo urbano / Verde: pastizales y cultivos / Verde fuerte: bosques y regiones arboladas / Marrón: suelo desnudo / Azul: agua.

Llama la atención la manera en que las denuncias georreferenciadas se emplazan cerca o en las nuevas zonas antropogénicas identificadas entre 2009 y 2014 (en rojo, figura 5a). Suponiendo que estamos hablando de las fronteras entre el suelo urbano y el de conservación, podemos observar el avance del primero sobre el segundo. Comparando las figuras 5a y 5b, esta triangulación muestra las posibilidades de cruzar varias fuentes de datos para explicar los mismos fenómenos y así ofrecer algún tipo de garantía de que los fenómenos observados son los mismos que los que se pretende observar. Debido a limitaciones de espacio y tiempo, este análisis es meramente gráfico, pero sería posible extenderlo a un análisis numérico.

Hay que hacer notar que el cambio de urbano a no urbano (en azul en la figura 5a), aunque puede reflejar cambios reales (modificación de calles o demolición de edificios), también puede deberse, por lo menos parcialmente, a una imprecisión de la clasificación, y no a una verdadera reversión del uso de suelo urbano. Al examinar un extracto de la expansión urbana (véase figura 6), el hecho de que las áreas recientemente urbanizadas (rojo) predominen sobre las pérdidas de la clasificación urbana (azul) en la periferia de la cobertura urbana estable (verde) indica que hay un patrón claro de expansión urbana, tal como se

esperaba. Además, las pérdidas de áreas urbanas tienden a carecer de la típica estructura de conglomerados de viviendas y calles, reforzando la idea de que estas áreas pueden deberse en su mayor parte a confusiones entre cobertura urbana del suelo y otras clasificaciones con altas propiedades de reflectancia como el suelo desnudo.

La tendencia descrita previamente puede ser validada con datos anteriores sobre expansión urbana, por ejemplo, dentro de las tres delegaciones más relevantes en términos de superficie de suelo de conservación: de 1970 a 2007, el suelo construido se expandió en 567% en la Delegación Xochimilco (de 346 hectáreas a 1,963 hectáreas), en 373% en la Delegación Milpa Alta (de 350 a 1,305 hectáreas),

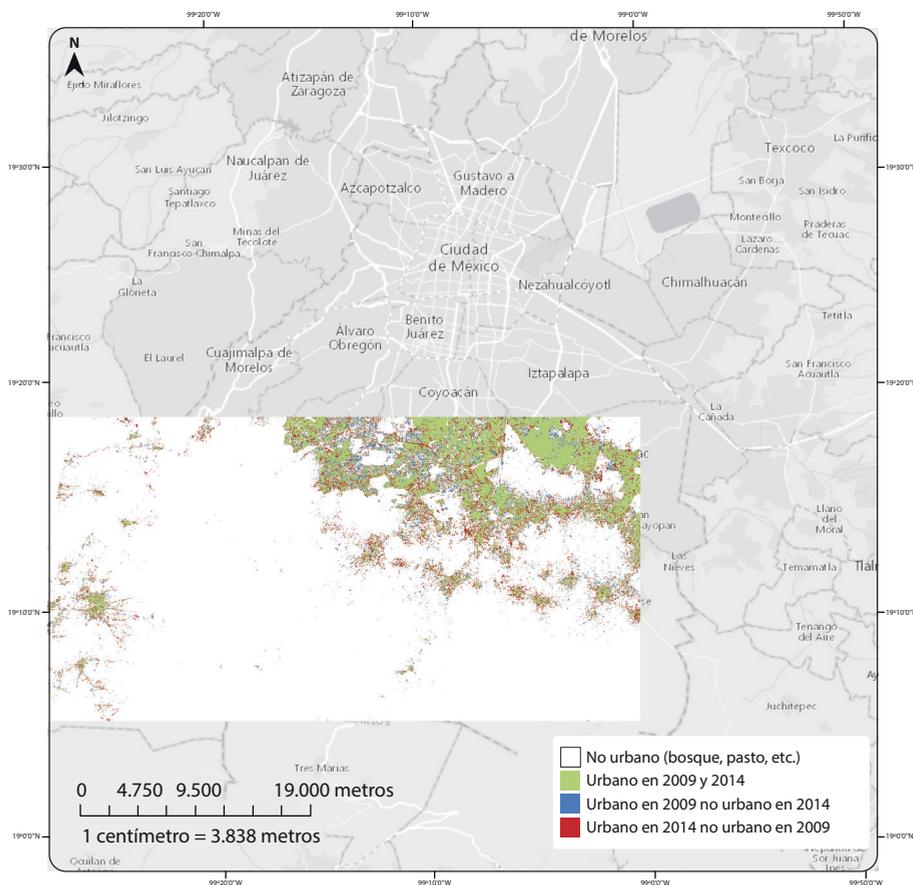


Figura 5a. Validación de los resultados con información de campo / Cambio en el uso de suelo entre 2009 y 2014.

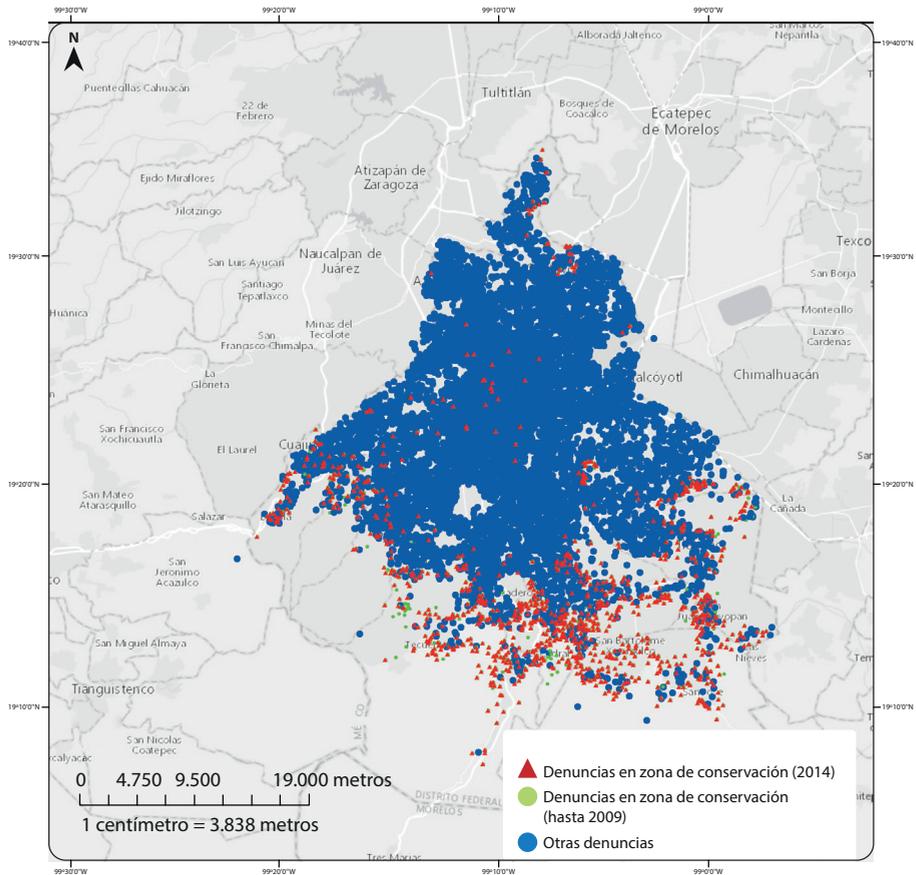


Figura 5b. Validación de los resultados con información de campo / gráfico con denuncias ambientales (2009-2014).

y en 1,133% en la Delegación Tlalpan (de 194 a 2,195 hectáreas) (Rodríguez *et al.* 2013). En el mismo período de tiempo el suelo dedicado a la agricultura de temporal disminuyó en 32.2% mientras que la superficie de pastizales lo hizo en 9.4% (*Ibid.*).

Discusión de los resultados

La discusión interdisciplinaria de la sustentabilidad del uso del suelo en el sur de la Ciudad de México incrementa la necesidad de confiabilidad y validez en las observaciones mediante teledetección, así como su integración con otros análisis



Figura 6. Muestra de la expansión urbana 2009-2014 (Extracto: RapidEye). Rojo: áreas recientemente urbanizadas / Azul: pérdidas de la clasificación urbana / Verde: cobertura urbana estable.

de naturaleza socioeconómica y política. Es una cuestión clave determinar la escala apropiada entre la resolución del pixel y el tamaño de la imagen de teledetección puesto que, mientras más precisa sea la resolución del pixel en metros, se necesitarán más imágenes para el mismo mapeo (Griffiths *et al.* 2010; Helden *et al.* 2011). Esto es relevante cuando la información es costosa de obtener. Por lo tanto el pixel no debería ser ni demasiado grande ni demasiado pequeño para poder capturar el fenómeno con el menor número posible de imágenes. Las imágenes de Landsat constituyen una posibilidad dado que han sido utilizadas en muchas ocasiones y son relativamente fáciles de obtener por su carácter de acceso abierto. Hay también una diversidad de posibilidades con resolución más alta, pero de acceso costoso. RapidEye es un ejemplo de mayor resolución (5 metros), que resulta más apropiado para indagar el tema de desarrollo urbano. Otros servicios posibles son Ikonos, Quickbird y GeoEye. Para el caso analizado, la resolución de 5 metros muestra un buen desempeño en función de la

cantidad de imágenes y la definición, y esto queda ilustrado por el hecho de que las imágenes RapidEye (números 1447914 y 1447913) cubrieron 80% (estimado) de la base del suelo de conservación. Por otra parte, las limitaciones impuestas por los costos son una realidad y podrían estimarse entre \$2.00 y \$30.00 dólares por kilómetro cuadrado (GOFC-GOLD 2014, 28); sin embargo, los precios de las imágenes por teledetección han estado cayendo de manera continua en los últimos años. Para el caso específico de la investigación que aquí se presenta, las imágenes de RapidEye hubieran costado alrededor de mil euros por cada observación; no obstante, es posible obtener la información de manera gratuita por medio de la presentación de un proyecto científico en el marco de RESA (RapidEye Science Archive) o Copernicus (European Programme for Earth Observation). Es importante aclarar en este punto que las imágenes de alta resolución han sido obtenidas mediante un acuerdo entre la Asociación Alemana para el Espacio (DLR, por sus siglas en alemán) y Blackbridge (productora y distribuidora de los datos RapidEye) el cual fue posible mediante la afiliación de una institución de investigación alemana dentro del programa RESA.

La importancia de los resultados de este trabajo se vincula con el crecimiento del espacio urbano sobre la naturaleza (figura 5a) y esto da pie a varias discusiones. Primero, el creciente espacio urbano ha creado una fuerte demanda sobre los recursos, tal y como lo muestra la literatura (Aguilar 2008; Aguilar y Santos 2011; GO-DF 2014). Dado que la Ciudad de México depende del agua que fluye desde fuera del espacio urbano (por ejemplo, el río Magdalena, al sur de la Ciudad), hace falta un activo manejo del agua para mantener su provisión y el ecosistema (Burns 2009; Jiménez *et al.* 2011; Delgado Ramos 2015), especialmente, como ya se dijo, en la zona sur donde se encuentra la mayor parte del suelo de conservación. Segundo, el manejo de la producción de alimentos es también un factor esencial en la expansión urbana en la medida en que los productores van transformándose de agricultores rurales en agricultores urbanos (Méndez Lemus 2012), pero también en tanto que la tierra agrícola se va urbanizando. Aunque los resultados de las transformaciones de una megaciudad en crecimiento pueden afectar negativamente a los agricultores en las zonas periféricas, ya que pueden sufrir de escasez de recursos (agua, aire y suelo) debido a la urbanización del territorio, también es cierto que pueden beneficiarse del acceso a servicios urbanos, como la educación y mejores servicios de salud (Méndez Lemus 2012). Este tipo de interacciones afectan tanto a las áreas rurales como a las periurbanas. Tales interacciones muestran una heterogeneidad espacial en los efectos de mantener la agricultura tradicional y cambiar hacia una forma más intensiva de agricultura industrializada con todo y sus impactos ambientales (Torres Lima y Rodríguez Sánchez 2008).

El análisis de las imágenes presentadas es preciso en lo que se refiere a las

diferencias entre las áreas urbanas y no-urbanas, pero deberíamos trabajar con más información de campo para poder calibrar mejor la identificación entre bosques/regiones arboladas y las otras dos clases de cobertura biológica del suelo (suelo desnudo y pastizales/cultivos), ello con el objeto de poder medir mejor los servicios ecológicos en investigaciones futuras. Sin embargo, mientras las zonas de suelo desnudo y pastizales/cultivos no pudieron ser definidas de manera bien clara, las áreas principales de bosques densos sí fueron mapeados con precisión.

Como tercer punto, otro tema significativo es el relacionado a los conflictos ambientales (a partir de mirar las denuncias de la PAOT), particularmente entre las áreas urbanas y no-urbanas y en un contexto de creciente violencia en el país. (Davis 1994; Marshall y Cole 2014; Delgado 2015). La democratización del sistema durante el presente siglo —por la vía de la democracia representativa convencional— no ha contribuido a revertir esta situación (Davis 2006). Por tanto, el nexo entre los conflictos urbanos ambientales, el uso del suelo y la democracia es otra área de investigación relacionada al caso de estudio presentado que puede ser desarrollada a partir de un análisis interdisciplinario basado en un enfoque propio de la ecología política urbana (Loftus 2012; Rossi y Vanolo 2012; Swyngedouw *et al.* 2005). Se trata de un esfuerzo más que deseable si se expande a escala metropolitana y regional debido a que es ampliamente reconocida la acelerada megalopolización que experimenta todo el centro del país —y que incluye la Zona Metropolitana del Valle de México y las ciudades circundantes como Toluca, Pachuca, Puebla y Cuernavaca.

Por último, pero no por ello menos importante, es relevante y necesaria una discusión acerca de las dimensiones éticas del procesamiento masivo de datos y de la protección de los derechos civiles. Si se va a adoptar la teledetección en las ciencias sociales, será necesario iniciar una discusión más intensa y detallada sobre su utilización y sus implicaciones ético-morales.

Conclusiones

Este trabajo compara imágenes de la región sur de la Ciudad de México, por un lado, de libre acceso (Landsat) y por el otro, de alta resolución (RapidEye), a partir de una perspectiva cualitativa de su confiabilidad y validez. Llegamos a la conclusión de que la resolución de las imágenes de libre acceso para la evaluación del desarrollo urbano a nivel estructural del uso del suelo no es suficiente para identificar el desarrollo de partes específicas de la ciudad. Por ejemplo, en nuestro estudio de caso (figuras de la 4a a la 4d), las imágenes de Landsat (4a y 4c) muestran un desarrollo urbano a expensas del suelo de conservación en el Parque Ecológico de Xochimilco. A pesar del hecho de que el patrón general de cambios en el uso del suelo es observable, las modificaciones al interior de la

estructura urbana son difíciles de percibir con una resolución de 30 metros en las imágenes de Landsat. Los problemas de evaluación de la expansión del suelo urbano, o la detección de cambios a nivel de distrito o de barrio, sólo pueden abordarse con imágenes de alta resolución. Sin embargo, dichas imágenes son costosas, aunque se están volviendo más económicas y fácilmente accesibles, como ya se dijo, no son gratuitas.

Este trabajo plantea algunas limitaciones. La teledetección permite la identificación del uso antropogénico del suelo, pero las diferencias al interior del uso del suelo no-antropogénico, por ejemplo, entre pastizales/cultivos y suelo desnudo, son más complejas de identificar por lo que se vuelve necesaria más información de campo.

En última instancia, los cuatro mosaicos que componen las dos imágenes analizadas (para los años 2009 y 2014), con resolución de 5 metros, nos permitieron mostrar las ventajas de las imágenes de alta resolución en comparación con las imágenes de Landsat, algo central para investigaciones futuras sobre desarrollo urbano sustentable en el sur de la Ciudad de México. Otros temas, como las relaciones en torno a los recursos entre zonas urbanas y periurbanas, los conflictos ambientales y la política ecológica puesta en juego, además de las implicaciones éticas de la detección remota, requieren ser abordados en el futuro.

Lo que se enuncia más arriba parece ser cada vez más relevante para informar mejor a las autoridades locales, y por tanto para la toma democrática —y hasta participativa— de decisiones, lo que constituye un asunto de importancia creciente en la medida en que empeoran los impactos sociales, ecológicos y climáticos, y se plantea de manera cada vez más urgente la necesidad de acciones que permitan confrontar una realidad rápidamente cambiante.

Reconocimientos

Este trabajo ha sido apoyado por el Centre for a Sustainable University (KNU) y por el Cluster de Excelencia “Integrated Climate System Analysis and Prediction” (CliSAP) fundado por el Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG). La información provista por RapidEye fue una contribución desde el Centro Aeroespacial Alemán por medio del financiamiento del Ministerio Federal de Economía y Energía Alemán. Queremos agradecer a Leonard Boerchert y a Olaf Conrad por su ayuda y asesoría en materia de Sistemas de Información Geográfica (GIS).

Referencias

- Aguilar, Adrian G. «Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City.» *Cities* 25, n° 3 (2008): 133-145.
- . «Sustentabilidad urbana y política urbano-ambiental. La Ciudad de México y el Suelo de Conservación.» En *La sustentabilidad en la Ciudad de México. El suelo de conservación en el Distrito Federal*, editado por Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla, 23-66. México DF: UNAM y Porrúa, 2013.
- y Clemencia Santos. «Informal settlements' needs and environmental conservation in Mexico City: An unsolved challenge for land-use policy.» *Land Use Policy* 28, n° 4 (2011): 649-662.
- Burns, Elena (ed.). *Repensar la Cuenca: la gestión de los ciclos del agua en el Valle de México*. México DF: UAM —Unidad Xochimilco— y USAID, 2009.
- Davis, Diane. «Undermining the Rule of Law: Democratization and the Dark Side of Police Reform in Mexico.» *Latin American Politics & Society* 48, n° 1 (2006): 55-86. DOI: 10.1353/lap.2006.0005.
- . *Urban leviathan: Mexico City in the twentieth century*. Temple University Press, 1994.
- Delgado-Ramos, Gian C. «Water and the political ecology of urban metabolism: the case of Mexico City.» *Journal of Political Ecology* 22 (2015): 98-114.
- deMarrais, Kathleen y Stephen D. Lapan. *Foundations for research: Methods of inquiry in education and the social sciences*. Mahwah, NJ: Erlbaum, 2004.
- Dupuy, Stéphane, Eric Barbe y Maud Balestrat. «An Object-Based Image Analysis Method for Monitoring Land Conversion by Artificial Sprawl Use of RapidEye and IRS Data.» *Remote Sensing* 4 (2012): 404-423.
- Griffiths, Patrick, Patrick Hostert, Oliver Gruebner, y Sebastian van den Linden. «Mapping megacity growth with multi-sensor data.» *Remote Sensing of Environment* 114 (2010): 426-439.
- GO-DF-Gaceta Oficial del Distrito Federal. «Acuerdo por el que se aprueba el Programa Sectorial Ambiental y de Sustentabilidad 2013-2018.» *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, n° 1965 bis (octubre 15, 2014): 2-48.
- GOFC-GOLD. *A sourcebook of methods and procedures for monitoring and reporting anthropogenic greenhouse gas emissions and removals associated with deforestation, gains and losses of carbon stocks in forests remaining forests, and forestation*. GOFC-GOLD Report version COP20-1, GOFC-GOLD Land CoverProject Office, Wageningen University, Países Bajos, 2014.
- Hacker, Kathryn P. *et al.* «Urban slum structure: integrating socioeconomic and land cover data to model slum evolution in Salvador, Brazil.» *International journal of health geographics* 12, n° 1 (2013): 45-57.
- Heldens, Wieke, Uta Heiden, Thomas Esch, Enrico Stein y Andreas Müller. «Can the future EnMAP mission contribute to urban applications? A literature survey.»

- Remote Sensing* 3, n° 9 (2011): 1817-1846.
- Jiménez Cisneros, Blanca, Rodrigo Gutiérrez Rivas, Boris Marañón Pimentel y Arsenio González Reynoso (eds.). *Evaluación de la política de acceso al agua potable en el Distrito Federal*. México DF: PUEC-UNAM, 2011.
- Jujnovsky, Julieta, Teresa Margarita González-Martínez, Enrique Arturo Cantoral-Uriza y Lucia Almeida-Leñero. «Assessment of Water Supply as an Ecosystem Service in a Rural-Urban Watershed in Southwestern Mexico City.» *Environmental Management* 49, n° 3 (2012): 690-702. DOI: 10.1007/s00267-011-9804-3.
- Jupp, Victor. *The Sage dictionary of social research methods*. Thousand Oaks-California y Londres: Sage Publications, 2006.
- King, Gary, Robert O. Keohane y Sidney Verba. *Designing social inquiry: Scientific inference in qualitative research*. Princeton, NJ: Univ. Press, 1994.
- Kit, Oleksandr, Matthias Lüdeke y Diana Reckien. «Texture-based identification of urban slums in Hyderabad, India using remote sensing data.» *Applied Geography* 32, n° 2 (2012): 660-667.
- y Matthias Lüdeke. «Automated detection of slum area change in Hyderabad, India using multitemporal satellite imagery.» *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 83 (2013): 130-137.
- Kohli, Divyani, Richard Sliuzas, Norman Kerle y Alfred Stein. «An ontology of slums for image-based classification.» *Computers, Environment and Urban Systems* 36, n° 2 (2012): 154-163.
- Laliberte, Andrea S. *et al.* «Object-oriented image analysis for mapping shrub encroachment from 1937 to 2003 in southern New Mexico.» *Remote Sensing of Environment* 93, n° 1 (2004): 198-210.
- Loftus, Alex. *Everyday Environmentalism. Creating an urban political ecology*. EEUU: University of Minnesota, 2012.
- Marshall, Monty G. y Benjamin R. Cole. *Global report 2014: Conflict, governance, and state fragility*. Center for Systemic Peace, 2014.
<http://www.systemicpeace.org/vlibrary/GlobalReport2014.pdf>
- Marx, Benjamin, Thomas Stoker y Tavneet Suri. «The economics of slums in the developing world.» *The Journal of Economic Perspectives*, 2013: 187-210.
- Méndez-Lemus, Yadira M. «Urban growth and transformation of the livelihoods of poor campesino households: the difficulties of making a living in the periphery of Mexico City.» *International Development Planning Review* 34, n° 4 (2012): 409-438. DOI: 10.3828/idpr.2012.25.
- Odindi, John, Paidamwoyo Mhangara y Vincent Kakembo. «Remote sensing land-cover change in Port Elizabeth during South Africa's democratic transition.» *South African Journal of Science* 108, n° 5/6 (2012): 1-7.
- PAOT. *Estudio sobre el ordenamiento, control y tratamiento integral de los*

- asentamientos humanos irregulares, ubicados en suelo de conservación del Distrito Federal.* México DF: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial del Distrito Federal, 2010.
- Pérez-Campuzano, Enrique y Clemencia Santos Cerquera. «Tendencias recientes de la migración interna en México.» *Papeles de Población* 19, nº 76 (2013): 53-88.
- Platt, Harold. «Exploding Cities: Housing the Masses in Paris, Chicago and Mexico City, 1850-2000.» *Journal of Urban History* 36, nº 5 (2010): 575-593. DOI: 10.1177/0096144210365454.
- Rodríguez Gamiño, Ma. de Lourdes Blanco, Jorge López y Gilberto Vela Correa. «Cambio de cobertura vegetal y uso de suelo 1970-2007 en el suelo de conservación, Distrito Federal.» Editado por Aguilar, Adrián Guillermo e Irma Escamilla, 149-178. UNAM y Porrúa, 2013.
- Rossi, Ugo y Alberto Vanolo. *Urban Political Geographies. A global perspective.* Londres: Sage, 2012.
- Santos Cerquera, Clemencia. «Interacciones y tensiones entre la expansión urbana y el suelo de conservación.» En *La sustentabilidad en la Ciudad de México. El suelo de conservación en el Distrito Federal*, editado por Adrián Guillermo Aguilar e Irma Escamilla, 67-108. México DF: UNAM y Porrúa, 2013.
- Singh, Kultar. *Quantitative social research methods.* Los Angeles: Sage, 2007.
- Swyngedouw, Erik, Niklas Heynen y Maria Kaika (eds.). En *The nature of cities: urban political ecology and the politics of urban metabolism.* Londres: Routledge, 2005.
- Taubenböck, Hannes y Nicholas J. Kraff. «The physical face of slums: a structural comparison of slums in Mumbai, India, based on remotely sensed data.» *Journal of Housing and the Built Environment* 29, nº 1 (2014): 15-38.
- Torres Lima, Pablo y Luis Rodríguez Sánchez. «Farming dynamics and social capital: A case study in the urban fringe of Mexico City.» *Environment, Development and Sustainability* 10, nº 2 (2008): 193-208. DOI: 10.1007/s10668-006-9059-y.
- Vaus, David de. *Survey quality.* Londres: Sage, 2002.
- Vargas Montes, Franco y Silvia Pabello Martínez. «Análisis de la propiedad social del Distrito Federal en el umbral del Siglo XXI.» *Estudios Agrarios* 5, nº 12 (1999): 9-53.
- Walliman, Nicholas. *Social research methods.* Londres: Sage, 2006.
- Ward, Peter M. y Paul A. Peters. «Self-help housing and informal homesteading in peri-urban America: Settlement identification using digital imagery and GIS.» *Habitat International* 31, nº 2 (2007): 205-218.