

Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia

Land cover vegetation analysis and projection through remote sensing and Geographic Information Systems in the Suba District, Bogotá-Colombia

Jerson Andrés Achicanoy¹, Rosario Rojas-Robles^{2, 4}, Jorge Enrique Sánchez³

RESUMEN

La expansión urbana genera impactos ambientales que degradan los ecosistemas naturales, cambiando su estructura y función. En este trabajo se desarrollaron lineamientos metodológicos mediante el uso de herramientas geográficas y teledetección para la detección de cambios, el modelamiento y proyección de la expansión urbana y el cambio de coberturas vegetales. Haciendo uso de imágenes satelitales y fotografías aéreas se realizó una clasificación orientada a objetos de coberturas en cuatro períodos de tiempo (1985, 1995, 2005, 2015) en la localidad de Suba (Bogotá, Colombia). Se analizó la dinámica urbana utilizando métricas de paisaje y el índice de entropía de Shannon. Los resultados muestran que las áreas urbanas aumentaron en un 432% y la cobertura de árboles y arbustos disminuyó en un 56% entre 1985 y 2015. El valor de entropía resultante fue de 0,92 para 2015, lo que demuestra una tendencia a la expansión urbana intensiva. El modelo de cambio de cobertura de la tierra por medio de las cadenas de Markov se utilizó para realizar proyecciones del cambio de cobertura a 2020 y fue validado con éxito usando las variaciones de Kappa. Los cambios proyectados evidencian una clara tendencia de disminución constante de coberturas vegetales, con incremento y densificación de las áreas urbanas.

PALABRAS CLAVE: expansión urbana; CA-Markov; clasificación de imágenes orientada a objetos; modelo de cambio de coberturas; métricas de paisaje.

ABSTRACT

Urban sprawl generates environmental impacts that degrade natural ecosystems, changing their structure and function. Methodological guidelines were developed using geographic tools and remote sensing for the detection of changes, modeling and projection of urban expansion and change of vegetal covers. An object-oriented classification of covers was performed for four years (1985, 1995, 2005, 2015) using satellite images and aerial photographs of the Suba District in Bogotá (Colombia). Urban dynamics were analyzed using landscape metrics and the Shannon entropy index. Results show that urban areas increased by 432% and the tree and shrub cover decreased by 56% between 1985 and 2015. The resulting entropy value was 0.92 by 2015, demonstrating a trend towards intensive urban sprawl. The land cover change model using Markov chains was used to make projections of the land cover change to 2020; the model was successfully validated using Kappa variations and projected changes revealing a trend towards urban sprawl, which threatens the forest cover, as well as shrubs and pastures used for agriculture.

KEYWORDS: Urban sprawl; CA-Markov; object-oriented image classification; land cover change modeling; landscape metrics.

1 Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. ORCID Achicanoy, J.A.: 0000-0001-7132-7594

2 Instituto de Estudios Ambientales (IDEA), Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Colombia. ORCID Rojas-Robles, R.: 0000-0002-9010-6188

3 Consultor Independiente. Bogotá, Colombia.

4 Autor de correspondencia: mrrojas@unal.edu.co

Recepción: 12 de diciembre de 2017. Aceptación: 01 de junio de 2018

Introducción

El fenómeno de expansión urbanística se ha incrementado exponencialmente debido al crecimiento poblacional, generando un impacto ambiental considerable sobre los ecosistemas que rodean los asentamientos humanos. La conversión de extensiones que previamente eran bosques, sabanas, suelos de uso rural o agrícola hacia las urbes, dejan en evidencia el gran cambio de las coberturas y los numerosos efectos sobre los sistemas ecológicos naturales y su estructura (Araya y Cabral, 2010; Barnes et al., 2002; Herold, 2002; Yen y Li, 2001).

En los últimos años diferentes ciudades alrededor del mundo han desarrollado estrategias para la gestión de coberturas vegetales. Las ciudades de Seattle en el estado de Washington (Kazmierczak y Carter, 2010) y Baltimore del estado de Maryland en Estados Unidos (Irani y Galvin, 2003), Barcelona en España (Chaparro y Terradas, 2009) y Berlín en Alemania (Okujeni, 2014) son solo algunos de muchos casos en los que las administraciones y planes de desarrollo destacan la importancia de las coberturas vegetales urbanas como aquellas que desempeñan un papel importante, tanto en la salud como en el marco social y la sostenibilidad económica de una ciudad. Por tal motivo, en esas ciudades se ha implementado el monitoreo y la gestión de las coberturas vegetales urbanas haciendo uso de tecnologías que incluyen los sensores remotos (imágenes de satélites y fotografías aéreas) y Sistemas de Información Geográfica (SIG) para su desarrollo, trabajo centralizado en la medición de los cambios y proyección de escenarios que faciliten el alcance del fenómeno.

Las estrategias de ordenamiento actualmente no contemplan dentro de su metodología lineamientos que permitan analizar e integrar cambios estructurales de las ciudades, su expansión y los cambios en las coberturas vegetales a través del tiempo mediante el uso de modelos espaciales y de proyección de coberturas de acuerdo con las necesidades de adaptación de la ciudad. Esto se evidencia por ejemplo en las presiones del mercado inmobiliario para Bahía Blanca en Argentina (Urriza y Garriz, 2014), la apertura de los mercados y el desplazamiento de personas a principios de los noventa en Bogotá (Romero, 2010) e incluso la resistencia frente a la adopción de

viviendas verticales en Querétaro (México) cuyo fin es expandir las áreas verdes (Félix, 2015).

Para llevar a cabo este trabajo se seleccionó la localidad de Suba de la ciudad de Bogotá (Colombia) como unidad representativa y de ejecución de los lineamientos metodológicos, debido a que, como el resto de localidades, ha estado enmarcada por cambios estructurales y poblacionales. Se evaluó la localidad en cuatro periodos de tiempo y en este proceso se realizó interpretación visual en pantalla de las coberturas y se generaron mapas que representan los cambios multitemporales mediante la interpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas. Estas últimas proporcionan una fuente de información valiosa y detallada del área de estudio en el tiempo (Araya y Cabral, 2010), lo que permite conocer el estado anterior y actual de la cobertura de la tierra.

La identificación y medición de los cambios de la cobertura de la localidad de Suba se realizó a partir de varios procedimientos: construcción de mapas, análisis espaciales mediante el uso de software especializado en SIG, análisis estadístico basado en los cambios detectados, y modelamiento y proyección de escenarios para la gestión de coberturas vegetales mediante análisis multicriterio (autómatas celulares "AC"), que incluye la información generada y algoritmos que permiten desarrollar aproximaciones geográficas de las coberturas de la tierra.

Este estudio de caso genera lineamientos metodológicos de análisis espacial a manera de guía, los cuales son aplicables al planeamiento territorial y al diseño de estrategias para la gestión urbana y van desde la selección de imágenes, interpretación y generación de mapas hasta el análisis de datos y modelos de proyección. Esto permite examinar el cambio que ha tenido cierto territorio a través del tiempo y proyectar espacios para el crecimiento urbano y la implementación de coberturas vegetales, en equilibrio con las necesidades de la sociedad.

Materiales y métodos

Área de estudio

La localidad de Suba se ubica entre los 74.132° W, 4.837° N y 74.034° W, 4.685° N en la zona noroccidental del Distrito Capital; limita al norte con

el municipio de Chía, al sur con la localidad de Engativá, al oriente con la localidad de Usaquén y al occidente con el municipio de Cota. Es la cuarta localidad más extensa de la capital, con 10.043 hectáreas después de Sumapaz, Usme y Ciudad Bolívar, y tiene aproximadamente 1'200.000 habitantes (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017) (Figura 1). Según el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge, presenta un bosque seco montano bajo bs-MB (Moreno et al., 2002). Presenta un territorio mayormente plano con dos zonas montañosas (los cerros de La Conejera y Suba) y también se localizan los humedales de La Conejera, Juan Amarillo, Córdoba y Guaymaral. Estos son ecosistemas intermedios entre el medio acuático y el terrestre, caracterizados por porciones húmedas, semi-húmedas y secas, de gran importancia para diferentes especies vegetales y animales (Moreno et al., 2002).

En relación con los usos actuales del suelo, en Suba predomina el residencial, con la presencia de zonas comerciales, centros educativos, recreativos,

universidades y clubes deportivos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2009).

Entre las dinámicas que se escogieron para la selección de la localidad de Suba están el crecimiento poblacional, la expansión urbana, inclusión de nuevas infraestructuras, el cambio de lo rural a lo urbano, cambio en las coberturas vegetales, y el uso de las reservas forestales y de parques que se ha modificado a través del tiempo. Estas características son en su mayoría comunes para las demás localidades de Bogotá, pero Suba constituye un excelente caso de estudio para el desarrollo de los lineamientos metodológicos para la detección, análisis y proyección de coberturas vegetales.

Metodología

Se evaluaron cuatro períodos de tiempo que corresponden a: i) 1985, ii) 1995, iii) 2005 y iv) 2015, por lo cual fue necesario adquirir fotografías aéreas e imágenes satelitales, información proveniente de

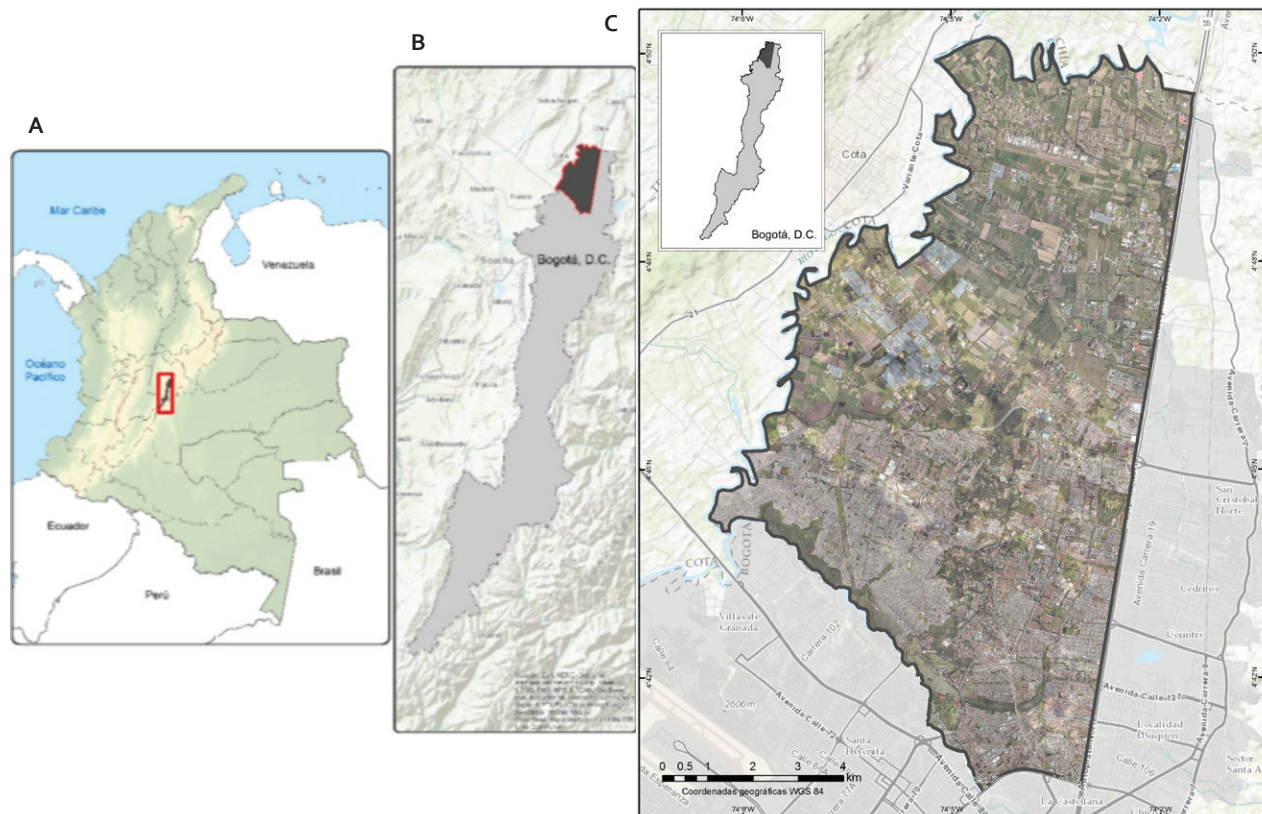


Figura 1. Localización de la localidad de Suba. A, ubicación en Colombia; B, ubicación en el Distrito Capital; C, delimitación del área de estudio. Fuente: elaboración propia. Capas proporcionadas por el IDECA y mapa base de ESRI.

la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA), la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

Manejo y preparación de la información proveniente de sensores remotos

Se realizó el pre-procesamiento de imágenes que incluye una serie de técnicas orientadas a i) corregir o remover efectos en la imagen por errores del sensor o por factores ambientales, ii) realzar el contraste para facilitar la interpretación, y iii) incrementar la resolución espacial para mejorar la delimitación y detección de objetos (UNODC, 2016).

Para la segmentación y clasificación de coberturas de la tierra en los cuatro periodos de tiempo se utilizó el programa eCognition, que ha sido utilizado en diferentes investigaciones que contemplan el cambio de coberturas (Araya y Cabral, 2010; Chen et al., 2012; Zhou et al., 2014). Para el desarrollo del pre-procesamiento se utilizó el *software* PCI Geomática 2016 aplicando el método de corrección geométrica con modelo polinomial de primer orden y alcanzándose un error cuadrático medio (RMS) no mayor a 1 m (Dai et al., 2010). Para el análisis espacial se utilizó el programa ArcGis de Esri y el modelamiento y proyección de coberturas se realizó

por medio del programa TerrSet. En la Tabla 1 se listan los materiales utilizados.

Corrección geométrica: se utilizó el sistema de coordenadas WGS84 UTM zona 18 N como datum de referencia para la corrección geométrica. Las imágenes utilizadas para la interpretación de coberturas de la localidad de Suba se georreferenciaron a partir de una serie de puntos de control (50) tomados de un ortofotomosaico de imágenes de buena calidad ajustadas y empalmadas para 2015, suministrado por el IDECA (Figura 2).

Realce o mejora de imágenes: después de analizar el histograma y visualizar su comportamiento se realizó el filtro de paso bajo de media para el posterior análisis, el cual permite reducir el ruido de la imagen y el relleno de píxeles con valores nulos o inexistentes (Eastman, 2016). El filtro se realizó con un tamaño de matriz 3 x 3 y se guardaron los cambios para cada imagen utilizada, como lo indican las imágenes de la Figura 3.

Clases de coberturas

Se determinó que las coberturas evaluadas y analizadas en los cuatro periodos de tiempo debían corresponder con algunas de las categorías generales de la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia (IDEAM, 2010) (Tabla 2).

Tabla 1. Características de las imágenes utilizadas

Periodo evaluado	Imagen	Resolución espacial	Resolución radiométrica	Resolución espectral
1985	Landsat 5 TM	30 m	8 bits	7 bandas
1995	Ortofoto 1998	1 m	8 bits	1 banda
2005	Ortofoto 2004	1 m	8 bits	3 bandas
2015	Ortofoto 2015	1 m	8 bits	3 bandas
DTM	DTM 2014	5 m	32 bits	1 banda

Fuente: las imágenes para 1985 se obtuvieron del U.S. Geological Survey. Las imágenes para 1995, 2005, 2015 y el Modelo Digital de Terreno (DTM en inglés) se obtuvieron del IDECA.

Tabla 2. Clases de coberturas de la tierra usadas en el estudio

Coberturas	Descripción basada en la metodología Corine Land Cover
Zonas urbanas	Todas las formas de edificaciones.
Vías y sistemas de transporte	Rutas de acceso, caminos, aeropuertos.
Humedales	Zonas con superficies inundables de manera permanente o intermitentemente.
Cubierta forestal y arbustales	Árboles de hoja caduca, coníferas, bosque mixto, bosques de transición, arbustos.
Mosaico de pastos y cultivos	Cubierta de pastos predominantemente no bajo un sistema de rotación.
Invernaderos	Invernaderos.
Cuerpos de agua	Cursos y cuerpos de agua.

Fuente: metodología Corine Land Cover.

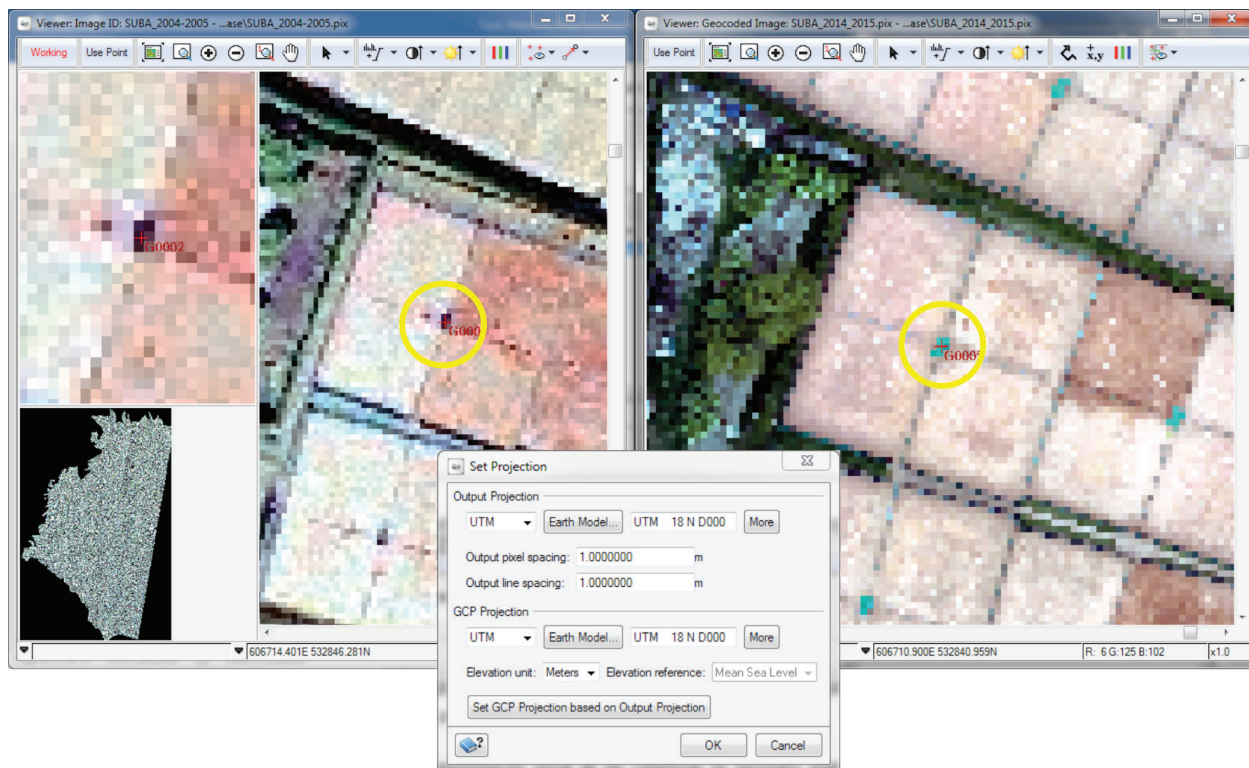


Figura 2. Corrección geométrica. Fuente: elaboración propia a partir del software PCI Geomática.

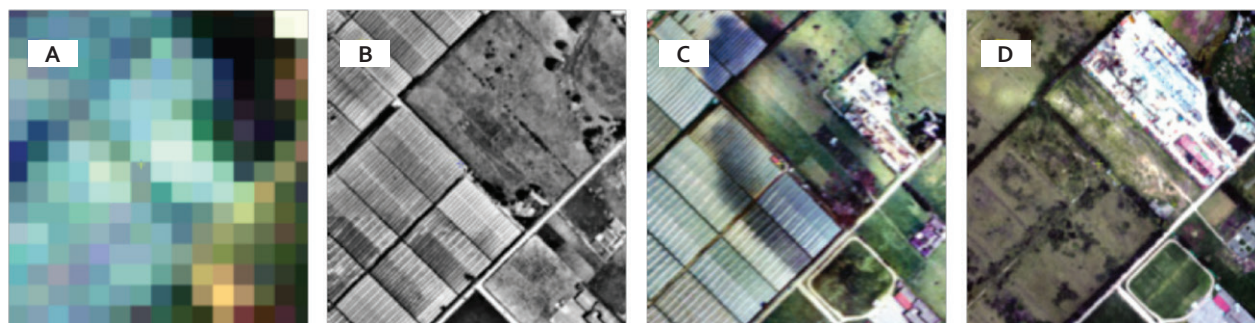


Figura 3. Filtro de media: a) 1985, b) 1995, c) 2005, d) 2015. Fuente: elaboración propia a partir del software PCI Geomática.

Clasificación de coberturas y evaluación de la exactitud

Por medio del uso de *software* especializado se realizó la interpretación con visualización en pantalla de las imágenes en los cuatro periodos de tiempo, para lo cual se definió la escala de trabajo y variables como el umbral, la resolución espacial y radiométrica de las imágenes, cuyas salidas se definieron de acuerdo con la leyenda aplicada (Zhou et al., 2014).

Se definió que la escala geográfica de trabajo sería 1:2500 debido a la calidad de las imágenes, con salidas cartográficas y temáticas a escala 1:72000

que cubren toda la localidad de Suba. Se realizó una clasificación supervisada basada en objetos haciendo uso del *software* eCognition debido a la heterogeneidad de las zonas urbanas y porque presentó una mayor ventaja sobre otros tipos de clasificación e interpretación de imágenes (Chen et al., 2012).

Clasificación orientada a objetos de imagen

Para la construcción de objetos se aplicó un proceso denominado segmentación (Figura 4), el cual divide la imagen en regiones de acuerdo con la

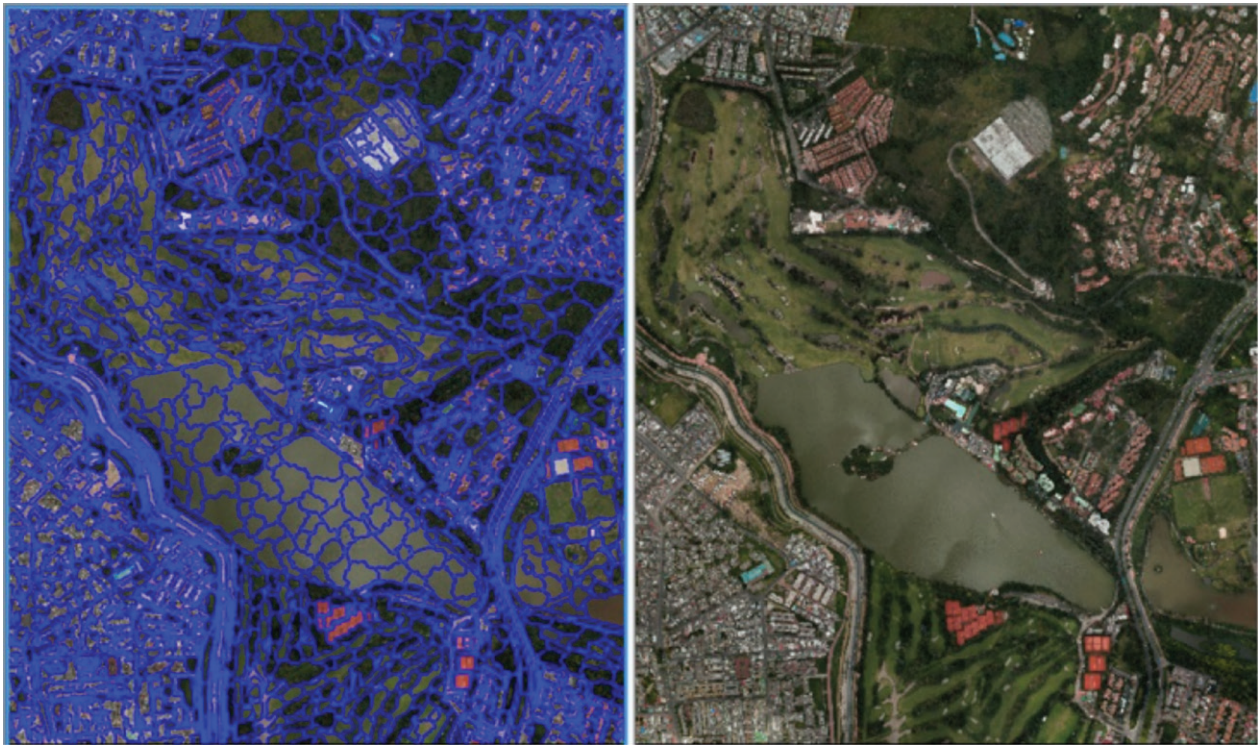


Figura 4. Segmentación de sección de fotografía aérea de la localidad de Suba 2015. Fuente: elaboración propia.

principal característica de los niveles digitales de la imagen (baja heterogeneidad o alta homogeneidad). El resultado es un conjunto de objetos en función de unos parámetros espectrales y geométricos, los cuales serán las unidades básicas para el análisis de cada imagen (Chen et al., 2012).

Por otra parte, el proceso de segmentación permite generar objetos para extraer información y organizarla en una estructura multinivel o jerárquica donde pueden establecerse relaciones entre niveles que facilitan y mejoran los resultados de la clasificación. También se puede hacer uso de funciones de tipo intrínsecas relacionadas con los objetos, es decir, relacionadas con las propiedades de la imagen, como atributos espectrales (el brillo, la desviación estándar, la media, entre otros) y atributos de forma (área, longitud, compacidad¹, ancho, entre otros). Del mismo modo, existen funciones de semántica y topología que tienen que ver con los objetos y la clasificación, como los atributos de jerarquía (niveles y subniveles

1 En topología, un espacio compacto es aquél que tiene propiedades similares a un conjunto finito, en cuanto a que las sucesiones contenidas en un conjunto finito siempre contienen una sucesión convergente. La propiedad de compacidad es una versión más fuerte de esta propiedad.

de segmentación) y los atributos relacionados con la clasificación de los objetos (relación con objetos vecinos y relación con sub o super-objetos) (Herold et al., 2002).

Funciones intrínsecas: describen matemáticamente el comportamiento de los objetos resultantes de la segmentación, tomando para ello atributos espectrales propios de la imagen y atributos de forma característicos de los objetos resultantes (Okujeni, 2014).

Funciones de semántica y topología: identifican las variables, relaciones o cantidad de objetos que pueden ser considerados como aquellos que describen un fenómeno en particular. En este apartado se tienen en cuenta los niveles de segmentación (diferentes niveles que se generan para agrupar o desagregar objetos de acuerdo con los análisis que se requieran), la jerarquía de objetos (orden jerárquico de los niveles aplicados a objetos), la relación de vecindad (agrupamiento de objetos vecinos que presentan características similares a las de los objetos de análisis), la relación con super-objetos y sub-objetos, y la relación dependiente de los niveles de segmentación (Chen et al., 2012) (Figura 5).

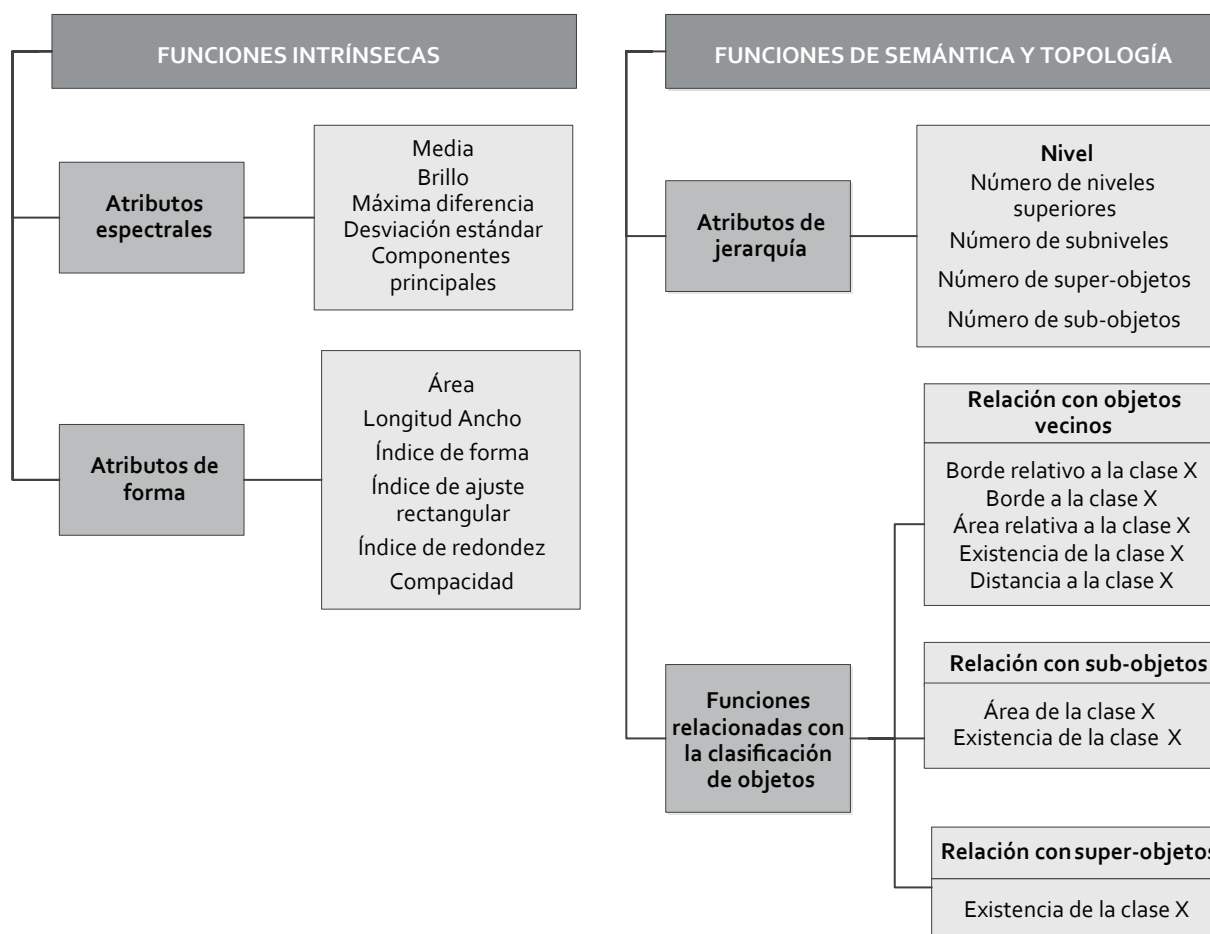


Figura 5. Funciones de análisis de los objetos para la clasificación de las coberturas.
Fuente: adaptada del manual de usuario de eCognition

Evaluación de correspondencia

La evaluación de correspondencia hace referencia a la parte integral de cualquier proceso de clasificación que permite estimar la exactitud en la clasificación de las coberturas. La manera más común para llevar a cabo este proceso es la elaboración de matrices de confusión, que han sido recomendadas y adoptadas como un reporte estándar de evaluación de correspondencia a la clasificación de coberturas (Congalton, 1991).

La matriz de confusión presentada en tablas se generó a partir de los píxeles que se tomaron como muestras y que fueron completamente aleatorias en los cuatro periodos, para un total de 300 muestras. Del conjunto de píxeles muestreados, la matriz comparó cómo definió las clases el intérprete (resultado

de la clasificación de la imagen) y cómo las encontró el clasificador. Así, en la diagonal de la matriz se encuentran los aciertos, es decir, aquellos píxeles que tanto el clasificador como el usuario ubicaron en la misma clase (Congalton, 1991).

La relación entre la suma de los aciertos y el total indica la precisión de la clasificación. En este trabajo la evaluación de correspondencia se logró utilizando las imágenes de cada periodo de tiempo con su respectiva resolución espacial y se generó un conjunto de puntos de referencia (300 puntos aleatorios por cada categoría) para cada mapa derivado (Eastman, 2016). Estos puntos fueron verificados y etiquetados con los datos de referencia. Las exactitudes del usuario y del productor se estimaron a partir de las matrices para también calcular el coeficiente de Kappa (Rosenfield y Fitzpatrick-Lins, 1986), que es

una de las medidas más populares para abordar la correspondencia en la clasificación.

Análisis del cambio de cobertura de la localidad de Suba

Este procedimiento requiere una previa interpretación de imágenes de satélite y fotografías aéreas en los cuatro periodos de tiempo seleccionados para este estudio de caso. Con la interpretación de las imágenes se obtuvieron cuatro capas correspondientes a los estados de las coberturas de la tierra en los periodos seleccionados, con salidas cartográficas digitales y mapas temáticos para su posterior análisis.

Los cambios detectados en los diferentes periodos de tiempo se determinaron cuantificando la información proveniente de la interpretación de las imágenes de sensores remotos, mediante análisis espacial y medición de los cambios detectados de cada una de las clases (Herold et al., 2002; Cabral et al., 2005) de la localidad de Suba. Los cambios en la clasificación de la cubierta vegetal fueron medidos y analizados utilizando el *software* ArcGis y como resultado se generaron mapas temáticos y tablas de descripción con el área en hectáreas (ha) de las diferentes coberturas.

Medición de la expansión urbana usando el índice de entropía de Shannon

La expansión urbana es un fenómeno directamente relacionado con la alteración de la cubierta vegetal, ya que la primera necesita de la segunda para su establecimiento afectando los ecosistemas naturales (Barnes et al., 2002).

En este estudio de caso la expansión urbana se determinó mediante el cálculo de áreas urbanizadas de las capas resultantes de la interpretación de las coberturas de los años 1985, 1995, 2005 y 2015 y haciendo uso de la entropía de Shannon, que se utiliza para medir el grado de concentración espacial y el grado de dispersión (Lata et al., 2001; Yeh y Li, 2001; Sudhira et al., 2004; Araya y Cabral, 2010). El valor de entropía varía de 0 a 1; si la distribución se concentra en punto específico se obtiene el valor de entropía más bajo, mientras que una distribución dispersa sobre el territorio de las áreas urbanas da

como resultado un valor máximo de 1. Este cálculo se obtiene de la siguiente ecuación (1).

$$En = -\sum p_i \log\left(\frac{1}{p_i}\right) / \log(n) \quad (1)$$

donde En es la entropía relativa, $p_i = x_i / \sum_i^n x_i$, y x_i es igual a la cantidad de áreas urbanas, dividida por el área total en la i -ésima de n zonas totales. El número de zonas en este estudio se refiere al número de búferes alrededor de la parte persistente detectada en el bit menos significativo (LSB en inglés). En este estudio se necesitaron anillos concéntricos de 5 y 10 km alrededor del área urbana persistente para cubrir todas las partes del LSB.

Proyección de la cobertura de la tierra usando CA-Markov

Este estudio de caso implementa el análisis de CA-Markov, incorporado en el *software* TerrSet de Clarks Labs. Esta herramienta está compuesta por dos técnicas. La primera, "El análisis de la cadena de Markov", describe la probabilidad de cambio de cobertura de un período a otro mediante el desarrollo de una matriz de probabilidad de transición entre y (Eastman, 2016). El segundo, "El componente CA", permite estimar las probabilidades de transición de un píxel en función de los píxeles vecinos. CA-Markov modela el cambio de varias clases de celdas usando una matriz de transición de Markov (Eastman, 2016).

Se desarrolló una matriz de probabilidad de transición para cada período de estudio utilizando los mapas de clasificación de la cubierta terrestre como una entrada para modelar el cambio de cobertura de la tierra. Además, se desarrollaron dos tipos de criterios (restricciones y factores) para determinar qué tierras se debían considerar para su posterior desarrollo (tierras adecuadas). Las restricciones se normalizaron en un carácter booleano de 0 y 1, mientras que los factores se normalizaron a una escala continua de idoneidad de 0 (menos adecuado) a 255 (más adecuado). Las limitaciones incluyeron áreas urbanas existentes, vías y sistemas de transporte, el modelo digital de terreno y los cambios de todas las coberturas hacia zonas urbanas en los periodos evaluados (Tabla 3).

Tabla 3. Desarrollo de criterios de enfoque booleano.

Controladores de cambio	Descripción
Cobertura de la tierra	Sobre la base de la tendencia del cambio de cobertura del suelo de un estado a otro.
Distancia de las vías	El desarrollo y la expansión urbana van de la mano de los accesos que tengan a diferentes partes de un territorio.
Distancia de zonas urbanas	Las zonas cercanas a las zonas desarrolladas son más adecuadas para la expansión urbana que las zonas alejadas de las zonas urbanizadas.
Modelo digital de terreno	Las zonas planas son más adecuadas para la construcción de edificaciones.

Fuente: elaboración propia.

Validación del modelo de proyección

El módulo de CA-Markov utiliza una regla de contigüidad (Cabral y Zamyatin, 2006), que establece que es más probable que un píxel que está cerca de una categoría de cobertura de tierra específica pertenezca a dicha categoría, en comparación con un píxel que está más lejos. La validación del modelo es un paso importante en el proceso de proyección de coberturas. Para cuantificar el uso predictivo del modelo fue necesario comparar el resultado de la simulación de las coberturas a 2015 con la capa de referencia o “real” obtenida para el período 2015 proveniente de la interpretación de las imágenes, utilizando las variaciones Kappa en una matriz de confusión, al igual que en la validación de la clasificación de las coberturas. Si el poder predictivo de un modelo se considera fuerte (es decir, mayor que 80%), entonces será razonable hacer proyecciones estimativas futuras (Araya y Cabral, 2010).

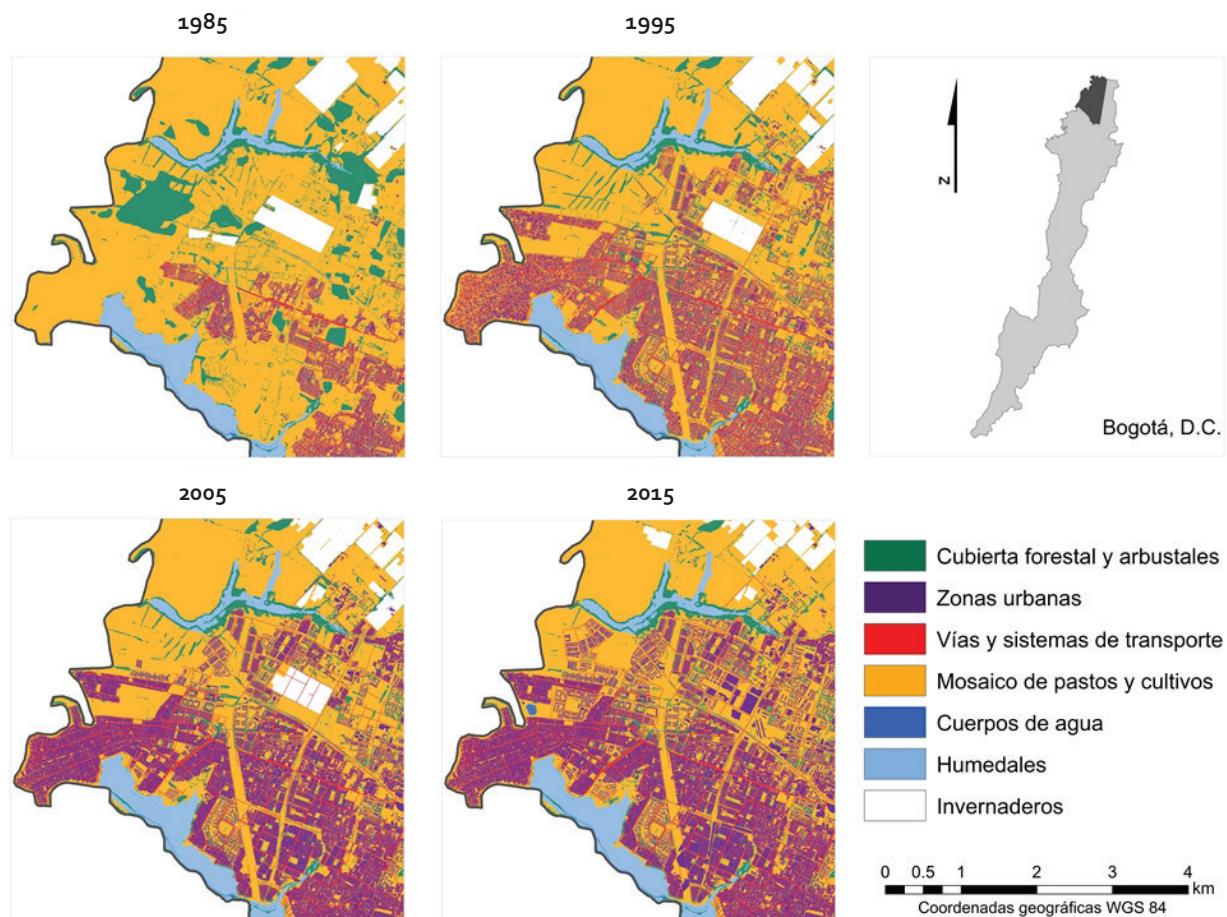


Figura 6. Cambios en la cobertura de la tierra en 1985, 1995, 2005 y 2015 en la localidad de Suba. Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Error de la clasificación de coberturas de la imagen de 1985 en Suba, Bogotá-Colombia

Clases de coberturas	Precisión del productor	Intervalo de confianza 95%	Precisión del usuario	Intervalo de confianza 95%	Estadísticos Kappa
Cubierta forestal y arbustales	90,57%	81,7%-99,4%	88,89%	79,6%-98,2%	0,865
Zonas urbanas	70,00%	47,4%-92,6%	93,33%	77,4%-109,3%	0,928
Vías y sistemas de transporte	100,00%	95%-105%	76,92%	50,2%-103,7%	0,761
Mosaico de pastos y cultivos	95,00%	91,7%-98,3%	95,00%	91,7%-98,3%	0,85
Cuerpos de agua	100,00%	75%-125%	50,00%	-11,5%-111,5%	0,496
Humedales	75,00%	20,1%-129,9%	100,00%	83,3%-116,7%	1
Invernaderos	100,00%	95,5%-104,5%	100,00%	95,5%-104,5%	1
Precisión general:	92,7%				
Intervalo de confianza al 95%:	89,6%-95,8%				
Estadística general de Kappa:	0,858				
Variación general Kappa:	-0,012				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Error de la clasificación de coberturas de la imagen de 1995 en Suba, Bogotá-Colombia

Clases de coberturas	Precisión del productor	Intervalo de confianza 95%	Precisión del usuario	Intervalo de confianza 95%	Estadísticos Kappa
Cubierta forestal y arbustales	75,00%	59,5%-90,5%	65,85%	50,1%-81,6%	0,612
Zonas urbanas	50,00%	35,1%-64,9%	89,29%	76,0%-102,5%	0,8714
Vías y sistemas de transporte	60,00%	24,6%-95,4%	60,00%	24,6%-95,4%	0,5862
Mosaico de pastos y cultivos	92,39%	88,3%-96,5%	84,16%	78,9%-89,4%	0,5903
Cuerpos de agua	0	0	0	0	0
Humedales	100,00%	87,5%-112,5%	80,00%	34,9%-125,1%	0,7973
Invernaderos	87,50%	68,2%-106,8%	100,00%	96,4%-103,6%	1
Precisión general:	82%				
Intervalo de confianza al 95%:	77,5%-86,5%				
Estadística general de Kappa:	0,673				
Variación general Kappa:	-0,003				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6. Error de la clasificación de coberturas de la imagen de 2005 en Suba, Bogotá-Colombia

Clases de coberturas	Precisión del productor	Intervalo de confianza 95%	Precisión del usuario	Intervalo de confianza 95%	Estadísticos Kappa
Cubierta forestal y arbustales	60,53%	43,7%-77,4%	76,67%	59,9%-93,5%	0,732
Zonas urbanas	75,86%	64%-87,7%	88,00%	78%-98%	0,851
Vías y sistemas de transporte	53,33%	24,8%-81,9%	80,00%	50,2%-109,8%	0,7895
Mosaico de pastos y cultivos	91,91%	87,6%-96,3%	83,25%	77,7%-88,8%	0,6042
Cuerpos de agua	100,00%	75%-125%	50,00%	-11,5%-111,5%	0,4966
Humedales	0	0	0	0	0
Invernaderos	92,86%	75,8%-110%	92,86%	75,8%-110%	0,9251
Precisión general:	83%				
Intervalo de confianza al 95%:	78,583%-87,417%				
Estadística general de Kappa:	0,709				
Variación general Kappa:	0				

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Error de la clasificación de coberturas de la imagen de 2015 en Suba, Bogotá-Colombia

Clases de coberturas	Precisión del productor	Intervalo de confianza 95%	Precisión del usuario	Intervalo de confianza 95%	Estadísticos Kappa
Cubierta forestal y arbustales	64,87%	48,1%-81,6%	80,00%	64%-96%	0,771
Zonas urbanas	68,49%	57,2%-79,8%	90,91%	82,4%-99,4%	0,879
Vías y sistemas de transporte	53,85%	22,9%-84,8%	53,85%	22,9%-84,8%	0,5176
Mosaico de pastos y cultivos	93,13%	88,9%-97,4%	80,98%	75%-86,921%	0,5924
Cuerpos de agua	100,00%	83,3%-116,7%)	100,00%	83,3%-116,7%	1
Humedales	66,67%	20,6%-112,7%	57,14%	13,3%-101%	0,5627
Invernaderos	100,00%	93,8%-106,3%	100,00%	93,8%-106,3%	1
Precisión general:	82%				
Intervalo de confianza al 95%:	77,1%-86%				
Estadística general de Kappa:	0,701				
Variación general Kappa:	0				

Fuente: elaboración propia.

Resultados y discusión

Clasificación de la cubierta terrestre y evaluación de la exactitud

Se presenta a continuación el resultado de la interpretación de las imágenes en los cuatro periodos de tiempo y como resultado se generaron mapas de cobertura de la tierra (Figura 6).

Con el fin de evaluar su exactitud, se presentan las matrices de confusión para la clasificación (Tablas 4, 5, 6 y 7). La precisión general para los periodos 1985, 1995, 2005 y 2015 fue en promedio del 84,83%. Algunos autores han hecho referencia a que una precisión del 80% es aceptable y es el mínimo necesario para un análisis efectivo y fiable de cambio de cobertura de la tierra y sus proyecciones (Sun et al., 2007).

Al observar la matriz de confusión de las imágenes (Tablas 4, 5, 6 y 7), la exactitud del productor de la clase urbana se encuentra entre el 50% y el 76% (toma de muestras) y para el usuario entre 88% y 93% (clasificación). En otras palabras, las áreas urbanas han sido correctamente identificadas como tal. Para el caso de la cubierta forestal y arbustales se observa que las exactitudes de los productores se encuentran entre el 61% y el 95% y para el usuario entre 66% y 89%.

Por otro lado, la matriz de errores también revela la confusión significativa en la discriminación de zonas urbanas de vías y sistemas de transporte. Esto

se debe en parte a la reflectancia que generan estos objetos en las imágenes analizadas, sobre todo con la utilización de la imagen correspondiente al periodo de 1995 en la cual se utilizó solo una banda para determinar las características espectrales de los objetos. Es importante señalar además que la precisión del usuario y del productor es sensible al número de puntos y método de muestreo, y que en este caso las 300 muestras fueron insuficientes al presentar clases donde no se evaluó ninguna muestra (cuerpos de agua en la Tabla 5 y humedales en la Tabla 6).

Medición de la cobertura de la tierra y aplicación de la entropía de Shannon

Análisis de las métricas de cobertura de la tierra

Las medidas espaciales y su variación se calcularon para las diferentes coberturas. Se destaca la pérdida de la cubierta forestal del 56% a partir de 1985 hasta el 2015; de igual forma sobresale el crecimiento de las zonas urbanas con un aumento del 432% a partir de 385 hectáreas en 1985 hasta 1.667 hectáreas en 2015. Sin embargo, el crecimiento de zonas urbanas se marcó fuertemente entre 1985 y 1995 con 108% de cambio, sobrepasando el doble de área que tenía en el punto inicial en un lapso de diez años (Figura 7).

Este fenómeno se puede explicar por el auge de actividades económicas e industriales para el periodo

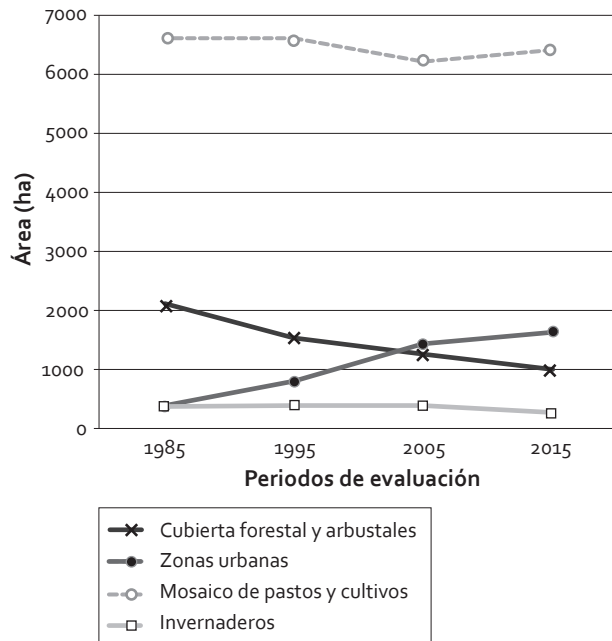


Figura 7. Dinámica de cambio de coberturas de la tierra en Suba, Bogotá-Colombia. Fuente: elaboración propia.

en mención en Bogotá. En ese lapso de tiempo se presentó una aglomeración de la zona industrial en el centro de la ciudad (Romero, 2010) y como consecuencia de ello, se generaron nuevas necesidades y la población creció en la localidad de Suba, pasando de cerca de 335.000 a aproximadamente 700.000 habitantes. De hecho, las necesidades habitacionales fueron subsanadas por las zonas y espacios periurbanos, lo que sugiere una urbanización hecha por la aglomeración de parches urbanos preexistentes en el primer período, mientras que en el segundo la urbanización se caracterizó por la dispersión, desencadenando un efecto que se repite en los otros periodos evaluados.

Adicional al proceso mencionado anteriormente, detrás de esta expansión y crecimiento urbano se encuentra una serie de características demográficas y sociales que ayudaron a su proliferación. Si bien estas condiciones no fueron tomadas en cuenta para la interpretación de coberturas y las proyecciones de las mismas, cabe señalar que los conflictos en el territorio colombiano, los desplazamientos y las oportunidades de trabajo que se generaron en ese entonces incentivaron la migración hacia la capital colombiana.

Por otro lado, el factor ambiental se ha visto afectado por estos cambios a través del tiempo. Algunos

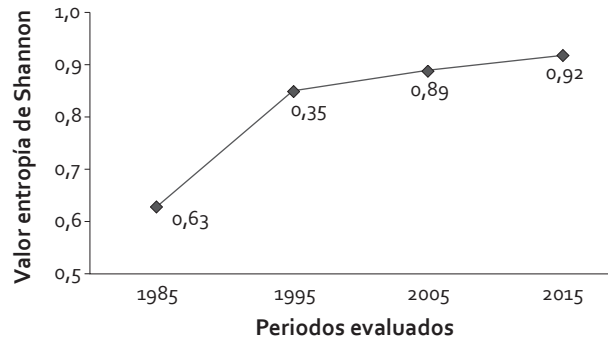


Figura 8. Medición de la expansión urbana de Suba en Bogotá-Colombia. Fuente: elaboración propia.

estudios realizados en la localidad de Suba (Secretaría Distrital de Hábitat, 2009) señalan diversas problemáticas ambientales, como la degradación de las estructuras ecológicas (especialmente sobre los cerros), los recursos hídricos y los humedales con problemas de invasión urbana y agroindustrial que generan vertimientos de residuos sólidos y líquidos, contaminación por aguas negras, conflictos en el espacio público y detrimento de la calidad de aire.

Medición de la dispersión urbana

Los cálculos de entropía se muestran en la Figura 8. Los valores para los años 1985, 1995, 2005 y 2015 para la localidad de Suba fueron superiores a 0,50, lo que demuestra una alta tasa de expansión urbana. También se evidencia un incremento continuo en el tiempo marcado en los periodos del 1985 a 1995, como se mencionó en el aparte anterior. Estos valores altos indican que la localidad de Suba tuvo un crecimiento marcado por la conglomeración de zonas urbanas ya establecidas y la expansión hacia los sitios rurales de la localidad, donde se daban otros tipos de uso del suelo.

Como se puede observar en los resultados de la medición de la dispersión, la expansión urbana ha disminuido en su tasa, debido en parte a que actualmente la localidad y en cierta forma toda la ciudad de Bogotá viene experimentando cambios importantes en la reurbanización vertical; es decir, se ocupan los mismos terrenos pero extendiendo el número de edificios y de pisos.

La expansión urbana está directamente vinculada a la propiedad de la tierra, a los agentes intervinientes y a la gestión del suelo que determinan

cierta dinámica en distintos períodos. Estos factores configuran la expansión y densificación de las zonas urbanas, el desarrollo de forma compacta o siguen algunos ejes de crecimiento, como el vertical (Castro y Vargas, 2009; Urriza y Garriz, 2014).

Cabe anotar que debido a factores biofísicos y a la disminución de calidad de vida, cada vez son más los urbanistas, arquitectos e ingenieros que abogan por la construcción de ciudades verticales como modelos de desarrollo sostenible. El espacio que ocupa una aglomeración urbana de este tipo es cuatro veces menor al requerido por una construcción tradicional horizontal (Félix, 2015). Las ciudades verticales son el panorama para el futuro para una ciudad densa como Bogotá.

Validación del modelo para la proyección de las coberturas de la tierra

La interpretación visual de los resultados del modelado (Figura 9) muestra que el mapa simulado para el año 2015 coincide con el mapa de interpretación de la cubierta terrestre para el mismo año. Se

realizó un análisis más detallado usando las variaciones de Kappa. Cuanto más se acercan los valores de estos índices al 100%, más fuerte era el acuerdo entre los dos mapas. El $K_{no} = 85\%$ da la exactitud general de la simulación (Araya y Cabral, 2010), el modelo se desempeñó muy bien en cuanto a la capacidad de especificar la ubicación correctamente ($K_{location} = 89\%$), y también en cuanto a la capacidad de especificar la cantidad ($K_{quantity} = 88\%$). Sin embargo, es importante señalar que algunas discrepancias son evidentes entre la cubierta terrestre “real” y el mapa simulado de la cubierta terrestre. Esto podría deberse a generalizaciones aplicadas para los resultados de clasificación de imágenes debido al tamaño de los objetos generados para la clasificación o a la forma del filtro de contigüidad utilizado.

Proyección de las coberturas de la tierra a 2020

Después de definir los parámetros utilizados para la calibración y el modelado y de evaluar su validez, se prosigue a examinar el patrón y la tendencia de

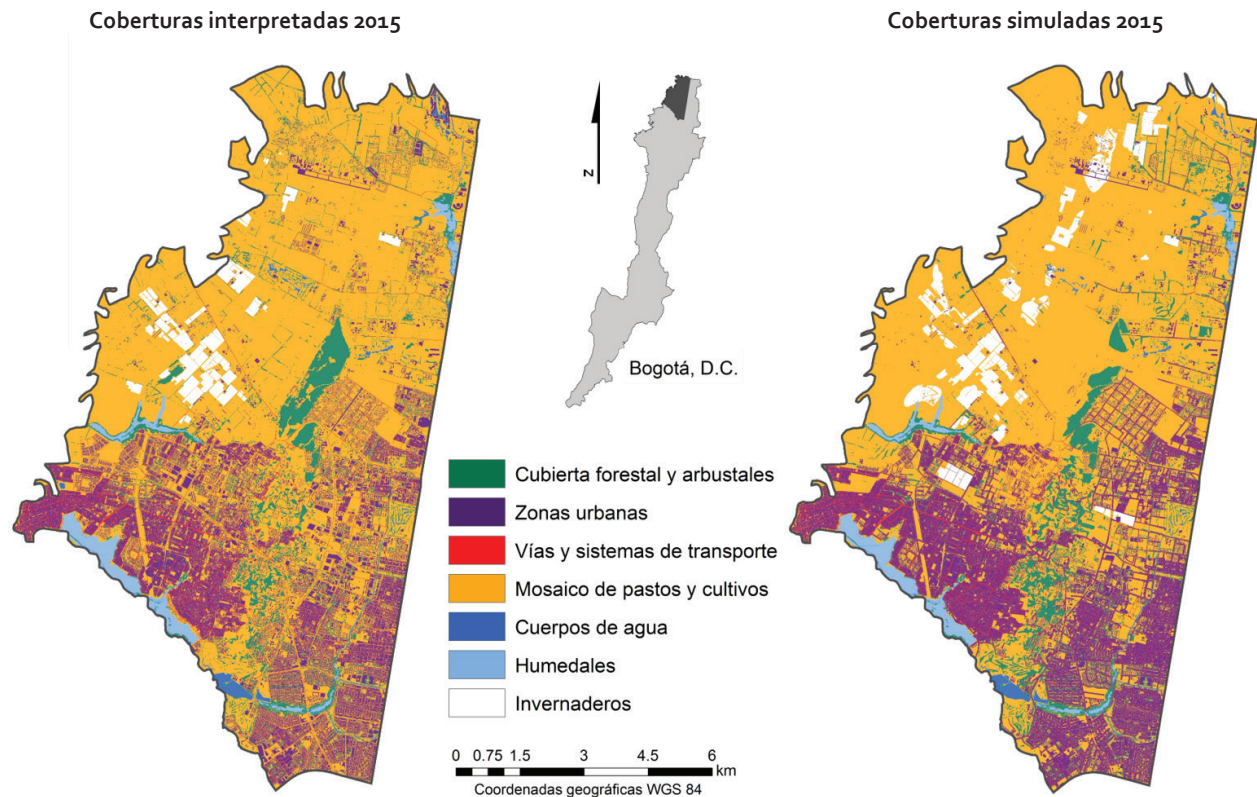


Figura 9. Clasificación y simulación de coberturas para el año 2015. Fuente: elaboración propia.

cambio en una simulación a mediano plazo. Por lo tanto, la proyección de cubierta de tierra para el año 2020 se realizó de la misma manera que en el modelo de validación y con los parámetros de restricción aplicados en la simulación para 2015 (Figura 10).

A continuación se presenta un perfil de barras que describe la cantidad de área que se espera que cambie de 2015 a 2020 en las clases de cobertura del suelo incluidas en el estudio. Los cuerpos de agua y los humedales no fueron incluidos en la matriz porque el modelo no predijo ningún cambio para 2020 (Figura 11).

Es importante señalar que la proyección resultante indica una reducción significativa de la cubierta forestal y arbustales. La aproximación puede no llegar a ser ajena a la realidad que se ha vivido a lo largo del periodo de estudio y aunque existe una política de arborización de Bogotá, cabe resaltar que la oferta de espacios disponibles para la siembra de nuevos árboles es limitada y tiende a reducirse con el tiempo a rondas hídricas, humedales y nuevas zonas de espacio público que se planean y son entregadas por constructoras (arborización programada), entonces

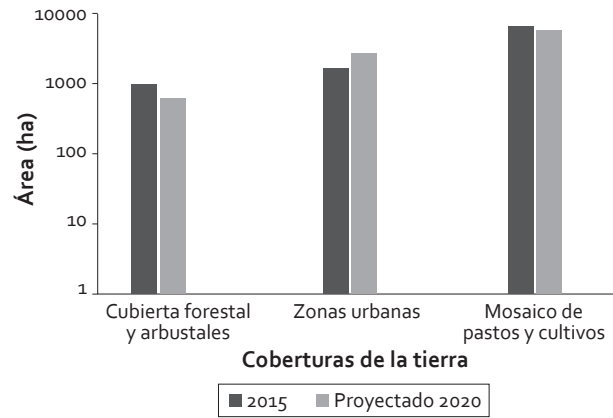


Figura 11. Cambios entre las coberturas 2015 al modelo proyectado a 2020 en la localidad de Suba. Fuente: elaboración propia.

se seguirán evidenciando parches donde los árboles son más escasos (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013). Por tal motivo este tipo de alertas que se evidencian mediante esta metodología de detección de cambios en la cobertura constituye un llamado de atención para que los programas de ordenamiento territorial y de urbanización contemplen más variables a la hora de su planeación, las cuales deben apuntar a la mejora de la calidad de vida de sus habitantes.

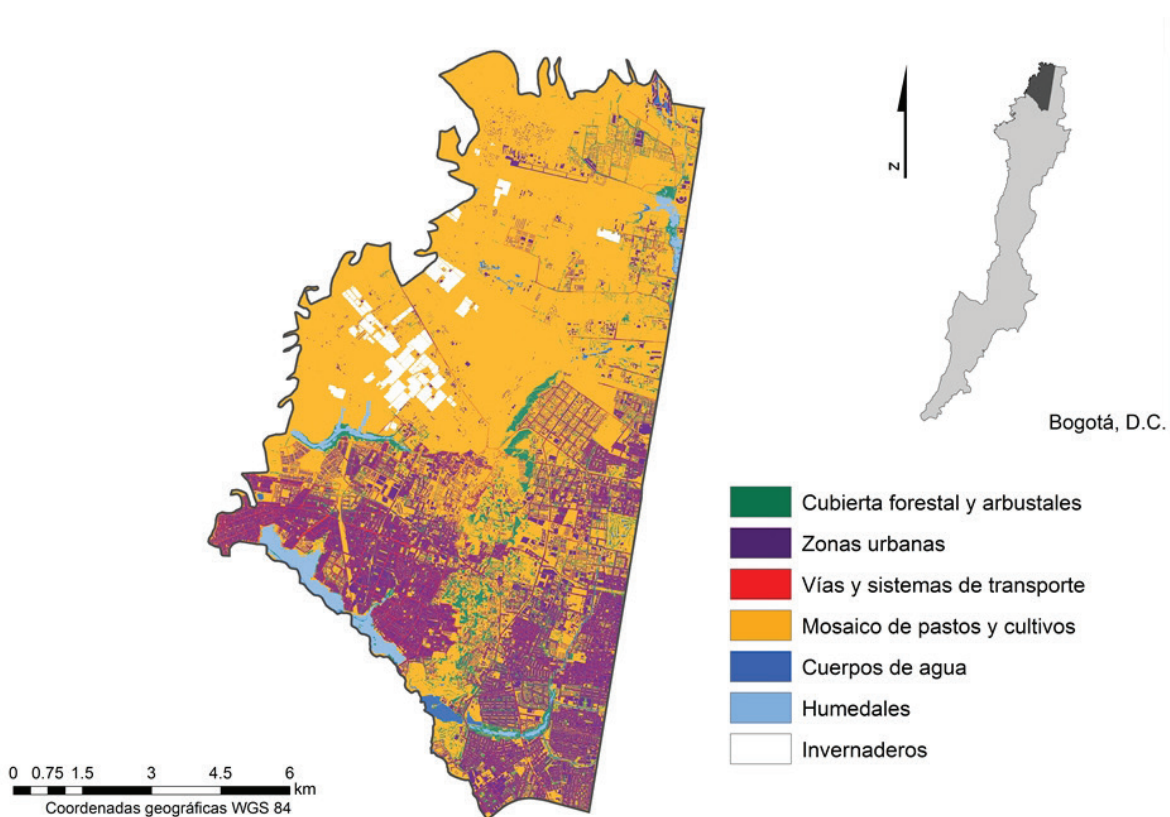


Figura 10. Proyección de coberturas para 2020 en la localidad de Suba. Fuente: elaboración propia.

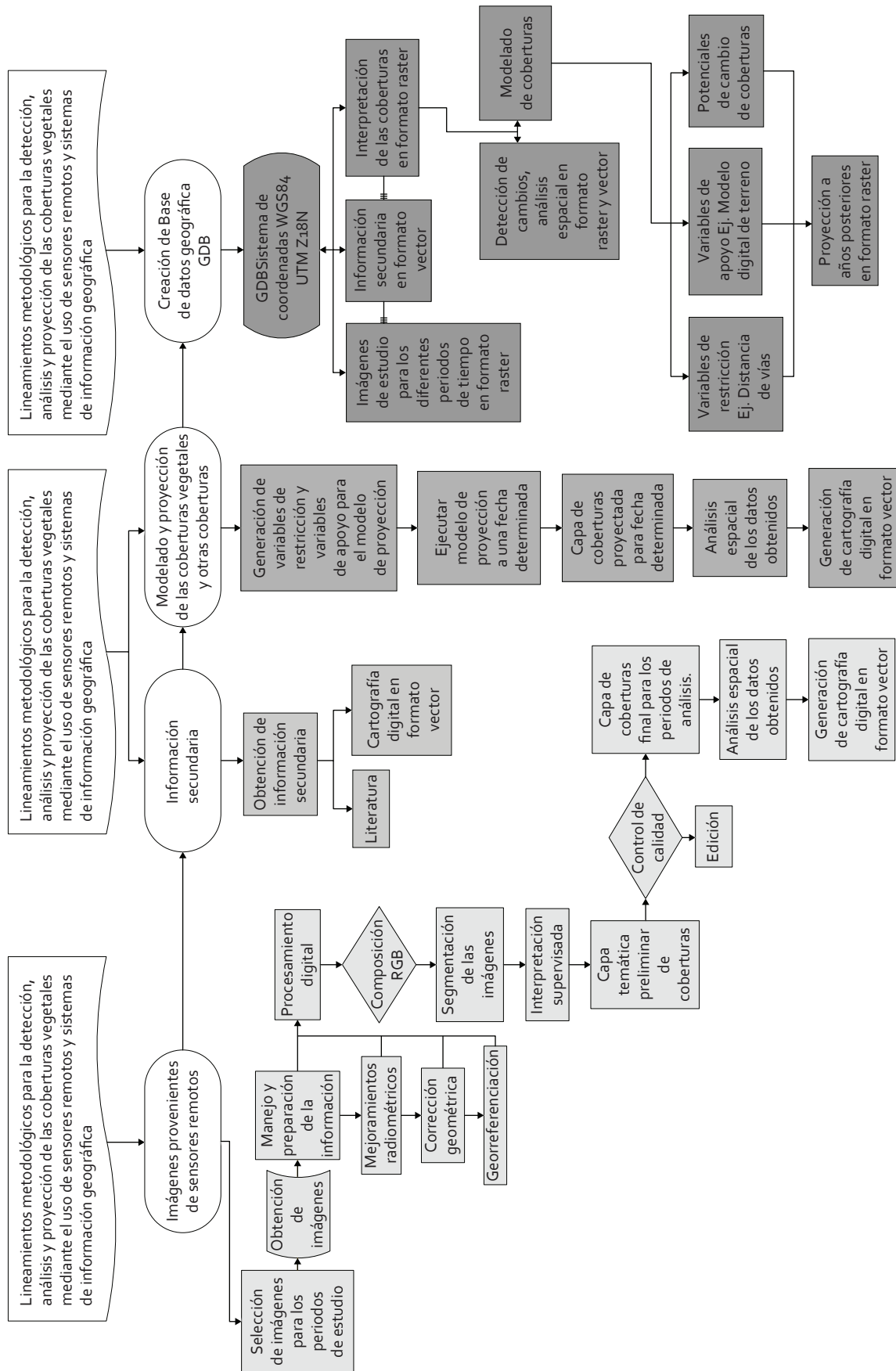


Figura 1.2. Diagrama de flujo de la metodología generada. Fuente: Elaboración propia.

Resumen de los lineamientos metodológicos

Los procedimientos seguidos por la metodología propuesta por este trabajo se presentan en forma de diagrama de flujo direccional (Figura 12) en tres cortes que están conectados entre sí.

Conclusiones

Este estudio evaluó y modeló la tendencia de los cambios en la cobertura de la tierra en el área de estudio utilizando un enfoque integrado que incluía SIG, sensores remotos y herramientas de proyección mediante la estructuración de lineamientos metodológicos que pueden ser replicables en otros territorios. Se encontró que el área de estudio ha experimentado una conversión extensiva de la cobertura de la tierra en las últimas décadas

Los mapas de cobertura de la superficie de estudio para los periodos 1985, 1995, 2005 y 2015 se obtuvieron utilizando una clasificación orientada a objetos. Los resultados obtenidos de la clasificación fueron validados antes de ser empleados para su análisis y modelización.

Se analizó y cuantificó la naturaleza del cambio en la cobertura de la tierra usando mediciones de las coberturas y medidas de expansión urbana. Las dos coberturas con mayor cambio en los periodos de estudio fueron las zonas urbanas, y la forestal y de arbustales.

La medición de la expansión con el índice de entropía de Shannon apoya la afirmación de que ha habido una alta tasa de expansión y dispersión del desarrollo urbano en el período estudiado, sobre todo entre 1985 y 1995, causando un impacto significativo en la franja urbana. Las fuerzas motrices detrás de la expansión podrían ser muchas, pero uno de los principales factores fue el crecimiento de la población.

De acuerdo con los resultados de la entropía de Shannon y lo observado en la clasificación de las coberturas de la tierra para el periodo 2015, las zonas urbanas se han densificado conservando la mayor parte de los espacios, esto se traduce en expansión vertical urbana. Igualmente, esto se ve reflejado en la proyección a 2020.

La técnica de simulación espacial empleada produjo resultados satisfactorios que al ser comparados con la interpretación de las coberturas fueron confirmados por varios resúmenes de Kappa. Esto permitió proyectar los cambios de la tierra para 2020. Los resultados indican que el crecimiento urbano seguirá tomando como fuente principal la cubierta forestal y las zonas de mosaicos de pastos y cultivos, y en un futuro podría tener un impacto innegable en los recursos naturales con los que cuenta el territorio, a menos que se establezca algún mecanismo de preservación.

Aunque en las proyecciones futuras no se modelaron las coberturas de humedales y cuerpos de agua, es necesario hacer un llamado de atención ya que las políticas de turno podrían modificar los usos del suelo, favoreciendo la ocupación de estas zonas.

Es importante recalcar que los mapas arrojados por los modelos de proyección deben interpretarse como la representación plausible de las cubiertas de la tierra bajo ciertos supuestos y que en muchos casos la modelación no es un instrumento de predicción fiable, ya que muchos de los factores proyectados dependen de las necesidades de la población y de las decisiones de la política de turno.

El acceso a una secuencia temporal de mapas de cobertura terrestre para cualquier territorio es importante para medir el cambio, calcular los puntos de referencia de desarrollo y realizar una planificación del mismo de manera puntual, evaluando diferentes variables que permitan desarrollar un territorio integral y encaminado a la sostenibilidad.

Agradecimientos. A aquellas personas e instituciones que han contribuido en el desarrollo de este trabajo; a la Universidad Nacional de Colombia, la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) y al apoyo del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y su programa de estímulos a la investigación Thomas Van Der Hammen.

Contribuciones de autoría. Achicanoy, J.A.: tesista del documento usado para la proyección del artículo y realización de los análisis presentados. Rojas-Robles, R.: co-directora del trabajo final, estructuración del proyecto, asesoría en el desarrollo, discusión y resultados. Mejoramiento de la redacción del artículo y contacto con la revista. Sánchez, J.E.: dirección del trabajo final. Estructuración del proyecto, asesoría en desarrollo de la investigación, apoyo y aval para la consecución de financiación, discusión de resultados.

Conflicto de intereses. El manuscrito fue preparado y revisado con la participación de los autores, quienes declaran no tener algún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados aquí presentados.

Bibliografía

- Alcaldía Mayor de Bogotá, 2009. Conociendo la localidad de Suba: diagnóstico de los aspectos físicos, demográficos y socioeconómicos 2009. Secretaría Distrital de Planeación, Bogotá.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, 2013. Decreto 364, plan de ordenamiento territorial de Bogotá. Registro Distrital 5.185. Bogotá.
- Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017. Suba. Disponible en: <http://www.bogota.gov.co/localidades/suba>; consultado: abril de 2018
- Araya, Y., Cabral, P., 2010. Analysis and modeling of urban land cover change in Setúbal and Sesimbra, Portugal. *Remote Sensing* 2, 1549-1563. DOI: 10.3390/rs2061549
- Barnes, B., Morgan III, J., Roberge, M., Lowe, S. 2002. Sprawl development: its patterns, consequences, and measurement. Geospatial Research and Education Laboratory, Department of Geography and Environmental Planning, Towson University, Baltimore, MD.
- Cabral, P., Geroyannis, H., Gilg, J.-P., Painho, M., 2005. Analysis and modeling of land-use and land-cover change in Sintra-Cascais area. En: Toppen, F., Painho, M. (Eds.), AGILE 2005, 8th Conference on Geographic Information Science: Conference Proceedings. Lisboa. pp. 51-60.
- Cabral, P., Zamyatin, A., 2006. Three land change models for urban dynamics analysis in Sintra-Cascais area. En: Proc. 1st EARSel Workshop of the SIG Urban Remote Sensing. Humboldt-Universität zu Berlin, Berlín.
- Castro, V., Vargas, G., 2009. Guía de clasificación morfológica de zonas urbanas a partir de sensores remotos. Ar@cne, disponible en: <https://www.raco.cat/index.php/Aracne/article/view/133207>; consultado: noviembre de 2017.
- Chaparro, L., Terradas, J., 2009. Ecological services of urban forest in Barcelona. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals, Universitat Autònoma de Barcelona, Bellaterra, España.
- Chen, G., Hay, G., Carvalho, L., Wulder, M., 2012. Object-based change detection. *Int. J. Remote Sens.* 33, 4434-4457. DOI: 10.1080/01431161.2011.648285
- Congalton, R. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sens. Environ.* 37, 35-46. DOI: 10.1016/0034-4257(91)90048-B
- Dai, X., Guo, Z., Zhang, L., Wu, J., 2010. Spatio-temporal pattern of urban land cover evolution with urban renewal and expansion in Shanghai based on mixed-pixel classification for remote sensing imagery. *Int. J. Remote Sens.* 31, 6095-6114. DOI: 10.1080/01431160903376407
- Eastman, J., 2016. TerrSet: geospatial monitoring and modeling system, manual. Clark University, Worcester, MA.
- Félix, A. 2015. Impactos del crecimiento vertical en la expansión de la zona conurbada de Querétaro. Tesis de maestría. Facultad de Arquitectura, Universidad Autónoma de Nuevo León, San Nicolás de los Garza, México.
- Herold, M., Scepan, J., Clarke, C., 2002. The use of remote sensing and landscape metrics to describe structures and changes in urban land uses. *Environ. Plan.* 34, 1443-1458. DOI: 10.1068/a3496
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), 2010. Leyenda nacional de coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia, escala 1:100.000. Bogotá.
- Irani, F., Galvin, M., 2003. Strategic urban forests assessment: Baltimore, Maryland. En: Proc. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing 2003. Annual Conference, Technology: Converging at the Top of the World. Bethesda, MD. pp. 85-94.
- Kazmierczak, A., Carter, J., 2010. Adaptation to climate change using green and blue infrastructure. A database of case studies. University of Manchester, Manchester, UK.
- Lata, K., Sankar, R., Krishna, P., Badrinath, K., Raghavaswamy, V., 2001. Measuring urban sprawl: a case study of Hyderabad. *GIS Devel.* 5, 26-29.
- Moreno, V., Gracia, J., Villalba, J., 2002. Descripción general de los humedales de Bogotá, D.C. Sociedad Geográfica de Colombia, Academia de Ciencias Geográficas, Bogotá.
- Okujeni, A., 2014. Quantifying urban land cover by means of machine learning and imaging spectrometer data at multiple spatial scales. Tesis de doctorado. Mathematisch-Naturwissenschaftliche Fakultät, Humboldt-Universität zu Berlin, Berlín. DOI: 10.18452/17082
- Romero, J., 2010. Transformación urbana de la ciudad de Bogotá, 1990-2010: efecto espacial de la liberalización del comercio. *Perspect. Geogr.* 15, 85-112. DOI: 10.19053/01233769.1733
- Rosenfield, G., Fitzpatrick-Lins, K. 1986. A coefficient agreement as a measure of thematic classification accuracy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 52, 223-227.
- Secretaría Distrital de Hábitat, 2009. Agenda ambiental localidad 11, Suba. Bogotá.

- Sudhira, H., Ramachandra, T., Jagadish, K., 2004. Urban sprawl: metrics, dynamics and modeling using GIS. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf* 5, 29-39. DOI: 10.1016/j.jag.2003.08.002
- Sun, H., Forsythe, W., Waters, N., 2007. Modeling urban land use change and urban sprawl: Calgary, Alberta, Canada. *Netw. Spat. Econ.* 7, 353-376. DOI: 10.1007/s11067-007-9030-y
- UNODC, 2016. Colombia. Explotación de oro de aluvión, evidencias a partir de percepción remota. Observatorio de Drogas de Colombia Junio de 2016. Bogotá. 164 p.
- Urriza, G., Garriz, E. 2014. ¿Expansión urbana o desarrollo compacto? Estado de situación en una ciudad intermedia: Bahía Blanca, Argentina. *Rev. Univ. Geogr.* 23, 97-123.
- Yeh, A., Li, X., 2001. Measurement and monitoring of urban sprawl in a rapidly growing region using entropy. *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 67, 83-90.
- Zhou, J., Yu B., Qin J., 2014. Multi-level spatial analysis for change detection of urban vegetation at individual tree scale. *Remote Sen.* 6, 9086-9103. DOI: 10.3390/rs6099086