

Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá*

Urban Growth and Soil Waterproofing around the Forest Reserve Thomas van der Hammen in the City of Bogotá

Cristian Salas Pérez^a

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

csalasp@correo.udistrital.edu.co

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1568-1454>

DOI: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.cuis>

Daniel Coy Castro

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0035-5675>

Fecha de recepción: 02 Octubre 2018

Fecha de aprobación: 02 Diciembre 2018

Fecha de publicación: 30 Junio 2019

Karen Acuña Ramírez

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0653-1067>

Luisa Páez Cuervo

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2567-5878>

Erika Upegui

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0973-7140>

Resumen:

Bogotá ha tenido una rápida urbanización en las últimas décadas, caracterizada por la falta de planeación, la contaminación de cuencas y la generación de impactos ambientales. La reserva Thomas van der Hammen no ha sido ajena a estos procesos de urbanización. Sin embargo, esta área, ubicada al noroccidente de la ciudad, tiene una gran relevancia ambiental, pues es un corredor ecológico que conecta a los cerros orientales con el río Bogotá. En este trabajo se realiza un estudio multitemporal alrededor de la reserva usando técnicas de teledetección. Usando índices espectrales, como el IBI, y calculando la temperatura de superficie, se logró discriminar las áreas impermeabilizadas en el periodo comprendido entre el año 1989 y el 2018. Los resultados demuestran que las técnicas de teledetección para monitorear áreas impermeables son confiables, de manera que se pueden medir las intervenciones antrópicas en el tiempo. El monitoreo realizado sobre la reserva muestra que esta ha evitado que la urbanización en el norte de la ciudad haya conectado con el río Bogotá y generara una carga mayor para la cuenca al impermeabilizar esa zona de la ciudad.

Palabras clave: extracción de cubiertas, impermeabilización urbana, planeación urbana, teledetección, urbanización.

Abstract:

Bogotá has undergone a fast urban development in the last decades, being characterized by a lack of planning and basin contamination, and bringing about environmental impacts. The forest reserve Thomas van der Hammen has not stayed away from these urban development processes. This reserve located in the northwestern city, however, has a great environmental relevance as it is an ecologic corridor connecting the eastern mountains and the Bogotá River. This work consists in a multi-temporal study around this reserve by using remote sensing techniques. Based on spectral indexes such as the IBI and by calculating the surface temperature, this work managed to discriminate the areas that became waterproof in the term from 1989 to 2018. The results indicate that the remote sensing techniques used to monitor the waterproof areas are reliable. This way, the anthropic intervention in this reserve can be measured along the time. The monitoring performed in the reserve shows that the reserve itself has prevented the urban development from the northern city to reach the Bogotá River and to generate a higher load to the basin, by making waterproof this city area.

Notas de autor

^a Autor de correspondencia. Correo electrónico: csalasp@correo.udistrital.edu.co

Keywords: covering extraction, urban waterproofing, urban planning, remote sensing, urban development.

Introducción

La impermeabilización del suelo por actividades humanas, como la urbanización, altera la capacidad de infiltración del suelo y puede volverse un proceso irreversible por el uso de materiales como el asfalto o el concreto (Romero Díaz, Belmonte Serrato, Docampo Calvo y Ruiz Sinoga, 2011). Este proceso antropogénico altera las funciones ecológicas del suelo y genera pérdidas de ecosistemas, mayor presión para áreas no urbanizadas y riesgos de inundaciones (Scalenghe y Marsan, 2009). La urbanización es un proceso intenso contrario a la impermeabilización natural o por actividades agrícolas (Cerdà, Morera y Bodí, 2009); esta impermeabilización artificial es generalmente permanente (Baumhardt, Römken, Whisler y Parlange, 1990), y se encuentra asociada con la necesidad de nuevos espacios de vivienda. La expansión urbana puede traer pérdida de áreas verdes, ecosistemas o áreas destinadas a actividades agrícolas, además de la contaminación de los suelos (Chen, 2007), lo que tiene serias implicaciones para la planeación urbana en temas como la protección de áreas ambientales, inundaciones o islas de calor urbanas, por mencionar algunas.

Una de las mayores afectaciones que trae consigo la urbanización es el aumento de riesgo de inundaciones, debido a los cambios en los ciclos del agua, como la recarga de aguas subterráneas y el flujo base de las cuencas (Brun y Band, 2000); por consiguiente, aquellas zonas con cuencas altamente urbanizadas a sus alrededores tendrán una mayor probabilidad de inundación en época de lluvias. Se consideran superficies impermeables las carreteras, las calles, las aceras, los techos y, en general, las superficies construidas con cemento o asfalto; este es un tema que ha despertado interés en áreas de planeación, ingeniería o administración urbana alrededor del mundo por ser un fenómeno que genera impactos ambientales y sociales en la ciudad (Chitsazan, Aghazadeh, Mirzaee y Golestan, 2019; McCleery, Moorman y Peterson, 2014; Starke, Göbel y Coldewey, 2010).

Analizar la impermeabilización en una ciudad no solo permite evaluar el grado de urbanización y desarrollo sostenible de esta, sino que además puede ser un indicador de impactos y riesgos ambientales, como mencionan Arnold y Gibbons (1996), quienes advierten que las cubiertas impermeables deben ser reguladas con un planteamiento que proteja, entre otras cosas, los recursos hídricos de una ciudad. Otro fenómeno que está relacionado con las superficies impermeables es el cambio de temperatura del suelo altamente urbanizado, lo que influencia la creación de microclimas urbanos, conocidos como islas de calor, los cuales presentan una relación directa entre la temperatura de la superficie y uso del suelo urbano (Connors, Galletti y Chow, 2013).

La importancia de estudiar este fenómeno radica en la necesidad de determinar cuáles son las áreas de una ciudad con altos riesgos ambientales o sociales por las dinámicas de urbanización. El objetivo fundamental es generar información espacial del territorio que permita generar planes de crecimiento urbano sostenible. Esos estudios pueden ser desarrollados mediante satélites de observación terrestre, los cuales, desde la liberación de datos Landsat, abren la posibilidad de analizar el territorio desde el espacio. De este modo la teledetección se plantea como una herramienta de análisis espacial para monitorear este tipo de alteraciones ambientales en el tiempo (García, Pérez y Guerra, 2014; Munafò, Norero, Sabbi y Salvati, 2010; Weng, 2001; Xiao, Su, Zhang, Qi, Jiang y Wu, 2013), y convierte al monitoreo espacial en un tema estratégico para las ciudades. A comienzos del siglo XXI, y conforme ha avanzado la tecnología, el número de investigaciones referentes a superficies impermeables con metodologías basadas en sensores remotos (Munafò, Salvati y Zitti, 2013; Su, Zhang, Zhang, Zhi y Wu, 2011; Weng, 2012) ha aumentado; sin embargo, no se encuentran investigaciones que apliquen técnicas de procesamiento digital de imágenes para la detección de superficies impermeables en la ciudad de Bogotá.

Este estudio realiza un análisis multitemporal que cubre los años 1989-2018 de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen y sus alrededores, con el fin de determinar los patrones y las dinámicas espaciales de urbanización de esta área.

Materiales y métodos

Área de estudio

La Reserva Forestal Thomas van der Hammen se encuentra localizada en la zona norte de la ciudad de Bogotá, puntualmente en las localidades de Suba y Usaquén (figura 1), y forma parte de la estructura ecológica de la capital colombiana. Esta reserva cuenta con una extensión de 1395,16 ha (Corporación Autónoma Regional [CAR] de Cundinamarca, 2014), y tradicionalmente las actividades económicas que se llevan a cabo en ella son de índole agropecuaria y recreativas de bajo impacto. Los límites geográficos de la reserva son: los cerros orientales de Bogotá y, hacia el occidente, el río Bogotá. Cuenta con bosques y humedales, como los de Torca, Guaymaral y La Conejera, lo que lo convierte en un lugar estratégico para la conservación ecológica. La reserva cumple funciones como la regulación hídrica y el mantenimiento de la biodiversidad, entre otros servicios ecosistémicos (CAR de Cundinamarca, 2014). Este ecosistema se encuentra dentro de la Sabana de Bogotá, la cual tiene características propias en cuanto a su clima, biodiversidad, hidrología y suelos. Entre los valores ambientales de la reserva, los más importantes son: la conectividad entre el río Bogotá y los cerros orientales y la regulación hídrica a través de cuerpos de agua y zonas de recarga.

Mediante el acuerdo 011 del 2011, expedido por la CAR de Cundinamarca (2011), fue declarada como Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá Thomas van der Hammen (RFP TVDH). En este acuerdo se cita un concepto proferido por un grupo de expertos en el que explican que la reserva posee riquezas ecológicas y paisajísticas, lo que hace necesaria su recuperación y conservación. El uso principal que se encuentra en la reserva es el forestal, e igualmente se presentan actividades de conservación, investigación científica y recreación pasiva; además, como uso condicionado, se encuentran los usos de recreación activa, infraestructura de servicios domiciliarios, infraestructura de servicios de seguridad ciudadana, dotacional, residencial y agropecuario (CAR de Cundinamarca, 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, es pertinente mencionar que el uso eficiente de dicha zona depende de la recuperación y la conservación de los reguladores naturales presentes en el área.

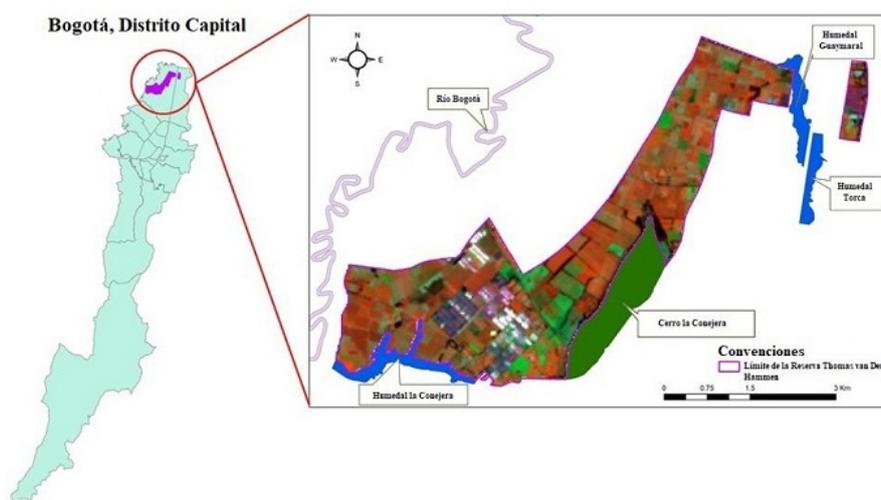


FIGURA 1.
Localización geográfica de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen
Fuente: elaboración propia, con base en datos de la Alcaldía de Bogotá

El efecto de retención de la urbanización que ha tenido la reserva puede evidenciarse en la figura 2, donde se presenta una imagen satelital de Landsat 8 de la zona urbana de Bogotá, y puede observarse (en tonos azules y turquesa) cómo la urbanización en la ciudad se ha desarrollado hasta el punto de construir cerca

del río Bogotá, lo cual genera grandes cargas de aguas residuales en épocas de lluvias. También es posible observar que al noroccidente de la ciudad (en tonos naranja y verde claro), donde se ubica la reserva, no ha sido urbanizado. Además, la imagen permite imaginar un escenario en el cual la reserva fuera urbanizada; la alteración de condiciones naturales a través de la urbanización podría llegar a degradar el ambiente, generando modificaciones en la temperatura, la contaminación y la insalubridad.

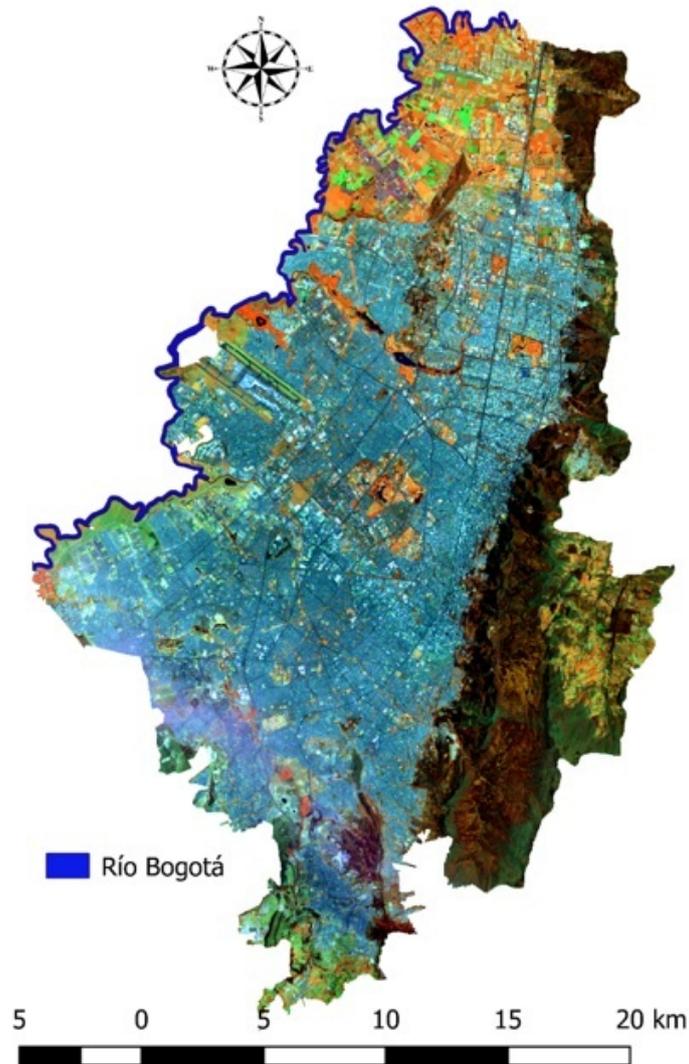


FIGURA 2.
Imagen correspondiente al área urbana de Bogotá en 2018
Fuente: Imagen Landsat 8, composición a color (NIR, SWIR1, RED)

Para un mejor entendimiento del efecto de urbanización alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, el análisis se realizará sobre las localidades de Suba y Usaquén, que corresponden al sector norte de la ciudad de Bogotá.

Métodos

Extracción de características espectrales a partir de imágenes satelitales

Las técnicas de teledetección permiten monitorear la superficie terrestre, especificando los cambios del suelo en un periodo de tiempo. Técnicas como la transformación Tasseled Cap (Crist y Cicone, 1984) pasan de seis bandas de una escena Landsat a tres (brillo, verdor y humedad), conteniendo la mayor información en estas tres bandas de salida y características físicas del suelo; esta técnica tiene gran uso para análisis de vegetación. Un método similar es el análisis de componentes principales (*principal component analysis* [PCA]), el cual simplifica la información de las bandas concentrándola en las primeras bandas de salida; este ha sido usado como evaluador de cambios en el suelo (Mas, 1999) o para fusionar imágenes mejorando la resolución espacial (Chavez, Sides y Anderson, 1991).

Otra de las técnicas más usadas es la clasificación de imágenes satelitales; en esta se le asigna a cada píxel de la escena una clase referente al área de interés del trabajo. Esta técnica se basa en la relación entre el valor físico detectado por el sensor que está asociado al píxel y la superficie u objeto en la imagen; es decir, este valor pasa a ser identificador dentro de una categoría, lo que genera un inventario de clases de suelo para la imagen (Chuvieco, 2016). Una desventaja de las técnicas de clasificación puede ser la subjetividad de la persona que realiza la clasificación.

Alternativo a las técnicas mencionadas, se encuentra el uso de índices como el *normal difference vegetation index* (NDVI) o el *normal difference built-up index* (NDBI), los cuales son simples operaciones aritméticas entre las bandas del sensor. El NDVI (ecuación 1) suele ser más usado para determinar contenido y concentración de vegetación; este es calculado operando las bandas del infrarrojo cercano, *near-infrared* (NIR), y la banda roja.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

El NDBI (ecuación 2) puede ser usado con el propósito de identificar las áreas urbanas impermeables. Para calcular este índice, basta con operar la banda correspondiente al infrarrojo de onda corta *short-wavelength infrared* (SWIR) con el infrarrojo cercano (NIR).

$$NDBI = \frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} \quad (2)$$

Al utilizar el NDBI para discriminar suelo urbanizado o impermeable se están usando las dos bandas con mayor repuesta espectral, como se ve en la figura 3. La respuesta espectral para construcciones de las bandas del Landsat 8 OLI-TIRS se encuentran en el SWIR1, NIR y la banda térmica. El resultado de calcular un índice como el NDBI dará una imagen unibanda con la capacidad de mapear las áreas construidas.

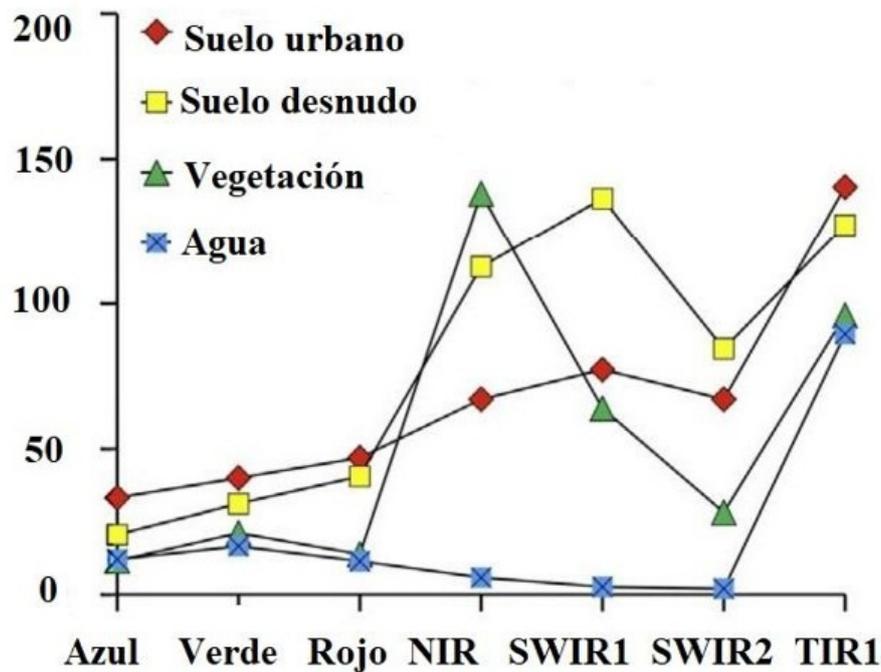


FIGURA 3.
Perfiles espectrales para Landsat 8
Fuente: adaptado de Estoque y Murayama (2015)

Sin embargo, Estoque y Murayama (2015) consideran que el NDBI no es capaz de discriminar la información con precisión en escenarios donde la vegetación seca se puede confundir con suelo urbano; para solucionar este inconveniente, Xu (2008) propone un nuevo índice de construcción, el *index-based built-up index* (IBI) (ecuación 3). Este índice se construye a partir del NDBI, del índice de vegetación ajustada al suelo (*soil adjusted vegetation index* [SAVI]) y del índice modificado de agua de diferencia normalizada (*modified normalized difference water index* [MNDWI]); de esta manera se consideran los tipos de suelo presentes en un área urbana (construcciones, vegetación y agua), donde el IBI busca mejorar la detección y el mapeo de cubiertas urbanas.

$$IBI = \frac{\frac{2(SWIR1)}{(SWIR1+NIR)} - \left[\frac{NIR}{(NIR+RED)} + \frac{GREEN}{(GREEN+SWIR1)} \right]}{\frac{2(SWIR1)}{(SWIR1+NIR)} + \left[\frac{NIR}{(NIR+RED)} + \frac{GREEN}{(GREEN+SWIR1)} \right]} \quad (3)$$

Finalmente, es importante tener presente que para calcular los índices espectrales debe aplicarse la corrección atmosférica para eliminar los aerosoles y convertir los niveles digitales de la imagen (ND) en valores de reflectancia, lo cual es ideal para un estudio multitemporal. Existen varios métodos para este proceso, entre los cuales se encuentra el *dark-object subtraction* (DOS), propuesto por Chavez (1996).

Extracción de temperaturas a partir de imágenes satelitales

Para calcular la temperatura, se usan los datos de los satélites Landsat 4 y 8 de las bandas térmicas, y a partir de estas se calcula la temperatura de superficie (ecuación 4).

$$T_s = \frac{BT}{1 + \left[\left(\frac{\lambda BT}{\rho} \right) \ln \ln \epsilon_\lambda \right]} \quad (4)$$

Donde T_s es la temperatura de la superficie terrestre en grados Kelvin, BT es la temperatura del cuerpo negro, λ es la longitud de onda de la banda térmica, $\rho = 1,438 \times 10^{-2} \text{ mK}$ es una constante y ϵ_λ es la emisividad del suelo.

Regresión múltiple

En estadística, la regresión lineal o el ajuste lineal es un modelo matemático utilizado para estimar la relación de dependencia entre una variable dependiente Y_i y las variables independientes X_j , que puede ser expresada como lo indica la ecuación 5 (Webster y Oliver, 2007), donde: Y_i es la variable dependiente, X_j corresponde a las variables independientes o regresores y B_0, B_1 representan los parámetros que miden la influencia significativa sobre las variables regresoras.

$$Y_i = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_pX_p \quad (5)$$

Metodología

El flujo metodológico se presenta en la figura 4. Esta metodología, basada en técnicas de teledetección, usó índices espectrales para discriminar el suelo urbanizado y asociar los valores altos de temperatura con los suelos con altas densidades urbanas.

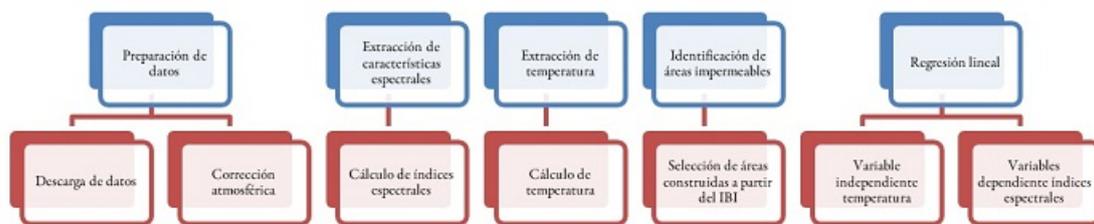


FIGURA 4.
Flujo de trabajo
Fuente: elaboración propia

En la primera etapa, preparación de datos, se descargaron los datos que correspondían a las imágenes Landsat, a través del sitio del servicio geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey [USGS]). Los datos fueron descargados en el primer nivel de procesamiento, es decir que los valores corresponden a niveles digitales (ND), por esto fue necesario realizar la corrección atmosférica usando el método DOS (Chavez, 1996).

La siguiente etapa se ocupó de calcular el IBI a partir de los valores de reflectancia de las imágenes. Para esto se usó la calculadora de ráster de QGIS.

Posteriormente se calculó la temperatura de superficie usando el *plugin* de QGIS Semi-Automatic Classification (SCP), desarrollado por Congedo (2019).

En la etapa siguiente, las áreas construidas fueron seleccionadas a partir de los valores altos del IBI y los valores de temperaturas acordes con las zonas urbanas, para identificar así las áreas impermeables.

Finalmente, la regresión lineal fue usada para establecer la relación entre la impermeabilización del suelo y la ausencia de vegetación, lo que podría representar un problema urbano en cuanto al aumento de la temperatura. Para este análisis se utilizó el *software* R.

Resultados y análisis

En lo que respecta la preparación de datos, se descargaron dos imágenes satelitales de los satélites Landsat 4 y 8 (tabla 1) con un periodo de 29 años de diferencia de captura. Teniendo como primera fecha el año de 1989 y como segunda fecha el de 2018. Estas imágenes fueron recortadas por el límite de las localidades de Suba y Usaquén, y posteriormente corregidas atmosféricamente.

TABLA 1.
Datos de captura de las imágenes

Sensor	Fecha	Path/Row	Azimuth solar	Elevación solar
Landsat 4 - TM	22/12/1989	008/057	132° 28' 56"	47° 38' 20"
Landsat 8 - OLI TIRS	17/03/2018	008/057	100° 24' 17"	61° 2' 3"

Fuente: elaboración propia, a partir de datos de la USGS

Luego, y con el fin de identificar las áreas urbanizadas y calcular su aumento desde el año 1989 hasta el 2018, el IBI fue calculado (figura 5). Para interpretar la figura, los tonos rojos, que corresponde a los valores bajos del índice IBI, representan las zonas sin urbanizar; es decir, donde hay presencia de coberturas vegetales. Mientras que los tonos grises a negros, que corresponden a valores más altos del índice IBI, representan las zonas con mayor presencia de zonas urbanizadas. Con este índice se logró diferenciar las construcciones de la vegetación, aunque puede presentar problemas con la presencia de suelo desnudo al confundirse con suelo urbanizado.

Fue posible identificar un considerable crecimiento urbano en este periodo de estudio, para la imagen de 2018 se ve que el límite de la urbanización es la reserva, esto implica una gran presión para esta zona. También fue posible identificar las áreas con mayor densidad urbana con el IBI, como queda evidenciado en los valores del índice, en el cual en 1989 el máximo valor fue de 0,229, mientras que en el 2018 fue de 1,17.

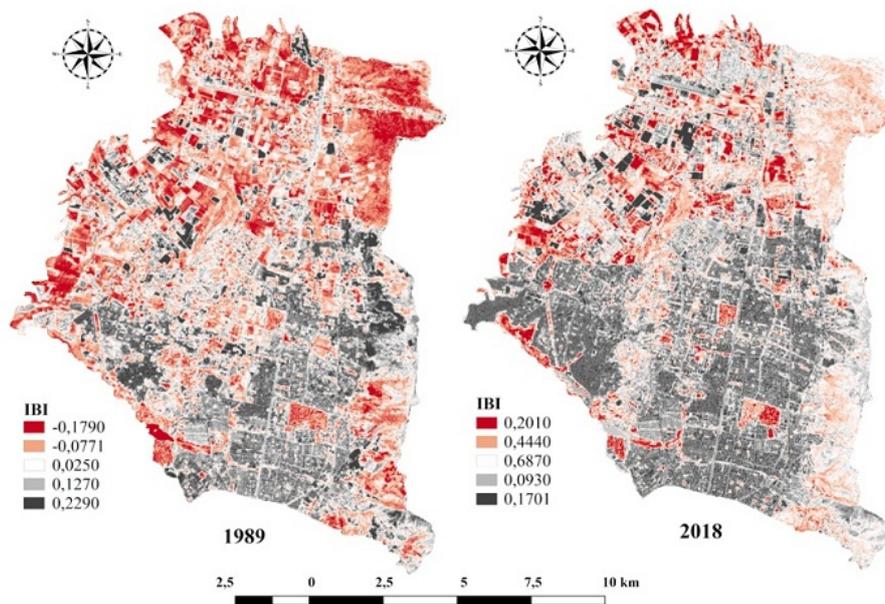


FIGURA 5.

Área urbanizada dentro de los límites de la reserva, índice IBI

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos de las imágenes satelitales

Posteriormente, y como análisis complementario, se calculó la temperatura de superficie para identificar las zonas en donde la urbanización se ha desarrollado. Las superficies impermeables tienen relación con el aumento de la temperatura de superficie en una ciudad, ya que el tipo de material que se emplea en la construcción absorbe el calor mucho más de lo que lo haría un suelo natural. Este hecho se puede ver en la figura 6, en la cual se evidencia un considerable aumento en la densidad urbana en algunas zonas, donde la temperatura pasó de tener valores cercanos a 15 °C a alcanzar valores de 34 °C. También se encontró que dentro de la reserva ha variado la temperatura de superficie, con valores cercanos a los registrados en el área urbana, esto puede estar relacionado con el uso actual que se permite dentro la reserva.

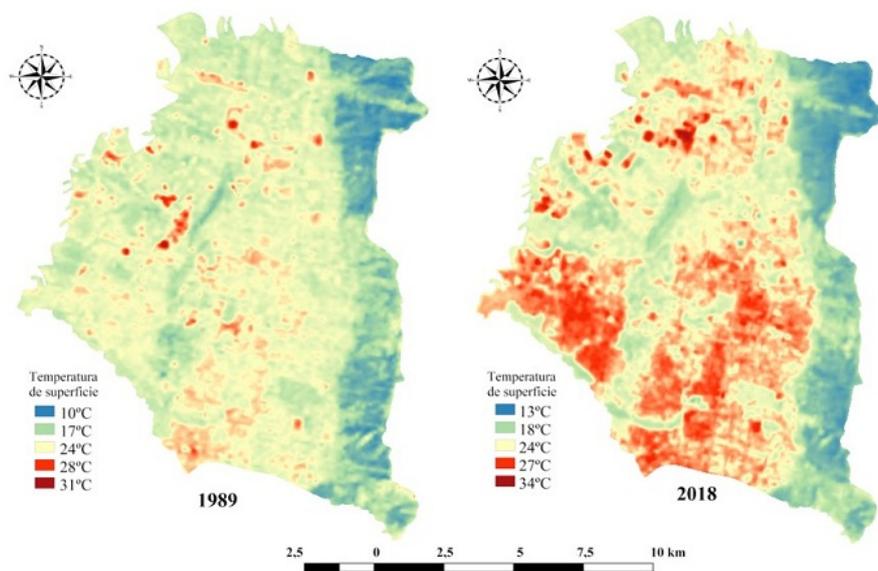


FIGURA 6.

Temperatura de superficie, en grados Celsius, dentro de los límites de la reserva

Fuente: elaboración propia, con base en cálculos de las imágenes satelitales

Con respecto a la temperatura, llama la atención que el incremento es considerable, especialmente si se tiene en cuenta que esta zona actualmente no es de las de mayor densidad de construcciones en la ciudad. Los valores de alta temperatura en el área rural corresponden a suelos de cultivos, los mismos que daban una respuesta espectral para el IBI similar a una construcción; esto se debe a que son parcelas sin cubierta vegetal, que, por lo tanto, absorben y emiten mayor temperatura.

En la etapa siguiente, con el índice IBI se extrajeron las construcciones para el año 1989 y 2018 (figura 7), el resultado deja ver que el aumento en el área urbana es considerable. Para el año 1989, según los cálculos hechos con la extracción, el área urbanizada era aproximadamente de 5120 ha, mientras que actualmente (año 2018) el área urbanizada es de 7610 ha, lo que demuestra que en el periodo de 29 años hubo un aumento del 33% en el área urbana alrededor de la Reserva Thomas Van Der Hammen.

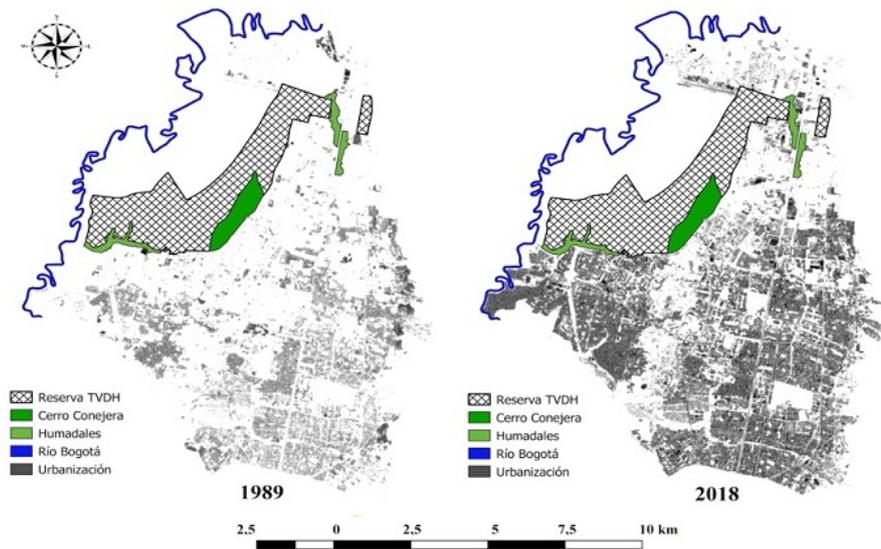


FIGURA 7.

Área urbanizada alrededor de la reserva, localidades de Suba y Usaquén, extraída a partir del IBI

Fuente: elaboración propia, a partir de procesamiento digital de las imágenes Landsat, usando los datos oficiales de la Alcaldía de Bogotá para áreas protegidas

Adicional al crecimiento de las zonas urbanas alrededor de la reserva (zonas grises en la figura 7), en la figura 8 se puede observar que existe un crecimiento considerable de construcciones dentro de la reserva, además de invernaderos, los cuales actualmente ocupan una gran área. Esto resulta preocupante, porque a la fecha es posible encontrar áreas construidas dentro de la reserva e invernaderos que pueden alterar en gran medida las condiciones del suelo. A este hecho se le puede sumar la presión que ejerce Bogotá por las dinámicas de expansión urbana y la demanda de nuevos espacios dado el aumento de la población, además de la ubicación estratégica de la reserva.

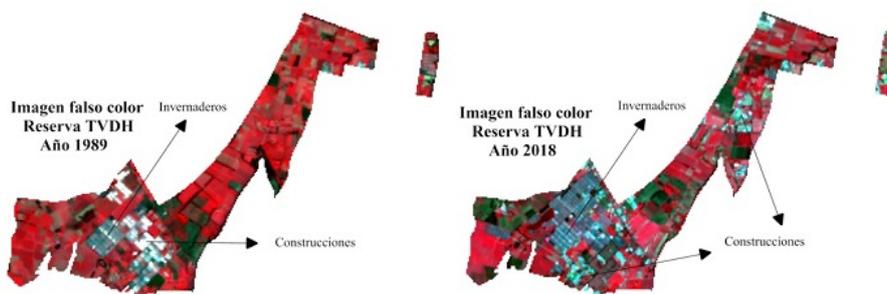


FIGURA 8.

Imágenes en composición de falso color estándar

Fuente: elaboración propia, con base en las imágenes satelitales

Con el fin de establecer la relación entre los índices espectrales y la temperatura, una primera aproximación se obtuvo al graficar la temperatura contra el IBI, seleccionando el año 2018, ya que en este año se presenta el crecimiento urbano. La figura 9 muestra esta relación, los puntos corresponden a los valores registrados en cada píxel de la imagen para las dos variables. Este resultado demuestra que es posible monitorear el crecimiento urbano apoyado en técnicas de teledetección.

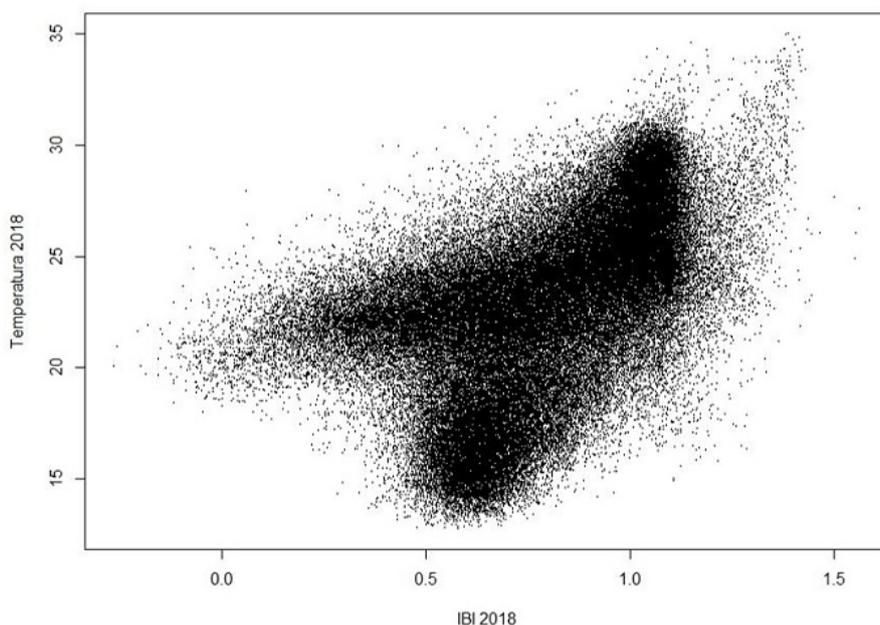


FIGURA 9.
Gráfico temperatura contra IBI, 2018
Fuente: elaboración propia

Finalmente, para confirmar la relación que pueden tener los índices espectrales y la temperatura de superficie, se utilizaron los datos de la imagen Landsat 8 para realizar una regresión múltiple, siendo la temperatura de superficie la variable respuesta y los índices IBI y NDVI las variables regresoras (tabla 2).

TABLA 2.
Regresión múltiple

Variable	Estimado	P-valor
Intercepto	26,85090	$2e^{-16}$
IBI	3,69944	$2e^{-16}$
NDVI	-8,26605	$2e^{-16}$
R cuadrado	0,4319	
R ajustado	0,4319	

Fuente: elaboración propia, calculado en R

El resultado de la regresión lineal, permite establecer que existe una relación positiva entre la temperatura y el IBI, y una relación negativa entre la temperatura y el NDVI.

Este resultado indica que al aumentar una unidad el índice NDVI, o sea establecer un área verde en la ciudad, tendría el efecto de reducir hasta en 8 °C la temperatura de superficie; mientras que un aumento en una unidad del IBI, o sea urbanizar un área, significaría un incremento de casi 4 °C en la temperatura terrestre. No obstante lo anterior, las variables regresoras no explican el 100% del comportamiento de la temperatura, aunque sí aportan.

Discusión

En esta investigación se confirma que las áreas urbanas alteran el clima local, esto se debe al cambio del uso en el suelo y a la eliminación de cobertura verde, en otras palabras, a impermeabilizar el suelo. A partir de las técnicas de teledetección, se pueden monitorear estos procesos antrópicos (García Alvarado, García Rodríguez y Pérez

González, 2018; Villa, Malucelli y Scalenghe, 2018), los cuales actualmente son considerados como uno de los mayores problemas urbanos (Jupová et al., 2017).

En las últimas décadas se puede ver que la ciudad de Bogotá ha cambiado el uso de sus suelos, mayormente por la expansión urbana, este hecho ha generado problemas de inundaciones al occidente de la ciudad, por la cuenca del río Bogotá. La metodología usada en esta investigación presenta una ventaja de costos y de tamaño de datos, ya que a la fecha existen satélites de observación terrestre con datos libres, como la constelación Landsat o Sentinel. El uso de índices espectrales para analizar suelos impermeables permite tener resultados confiables (Pérez y García, 2016), los cuales pueden ser usados como insumos para la planeación urbana. La importancia de realizar investigaciones de este tipo, que si bien tan solo dan una primera vista del problema, radica en la generación de cartografía temática y en la espacialización del fenómeno, fundamentales para generar mejores políticas urbanas.

En lo que respecta a la Reserva Thomas van der Hammen, el análisis de teledetección demuestra que su delimitación ha frenado el proceso de expansión urbana de Bogotá en el periodo de estudio, a saber, entre el año 1989 y el 2018, puesto que, fuera de la reserva, las zonas urbanas ya han llegado hasta el límite del río Bogotá, lo que evidentemente es una presión para la cuenca del río, con los problemas ambientales y sociales que esto conlleva. Igualmente, estadísticamente se ha demostrado la relación entre las zonas urbanas, las zonas con vegetación y la temperatura, lo que muestra que la reserva mantiene la temperatura de la superficie en valores que no permiten crear el fenómeno de islas de calor debido a la impermeabilización de las cubiertas.

Se sabe que existe una relación entre el suelo impermeabilizado y las altas temperaturas del suelo (He, 2019), esto se debe principalmente al tipo de material, pero también a la densidad urbana. Actualmente, se proponen techos y cubiertas ecológicas (Almeida, Simões, Tadeu, Palha y Almeida, 2019) para un mejor rendimiento energético de los edificios, lo que se convierte en un tema estratégico para la ciudad en temas ambientales y ecológicos, aunque el fenómeno de islas de calor también tiene consecuencias sobre la salud pública (Wang et al. 2019), puesto que, en periodos de altas temperaturas, estas pueden incrementarse en un contexto urbano debido a las características de los materiales impermeables, que absorben la temperatura y llegan a producir incluso noches calurosas. El crecimiento económico de una ciudad tiene una relación directa con su crecimiento urbano, por esta razón no sería posible limitar el crecimiento de una ciudad. El fenómeno de islas de calor puede intensificarse con la expansión urbana (Yang, Chen, Qian, Wu, Zheng y Huang, 2019), por lo que es necesario prestar atención a la planeación urbana desde este contexto. Actualmente las investigaciones se están centrando en el tipo de material que debe ser usado en cubiertas (Shi et al. 2019; Ulpiani, di Perna y Zinzi, 2019; Zinzi, Carnielo y Mattoni, 2018), con el objetivo de mitigar los efectos del cambio climático, ahorrar energía y mejorar la calidad del aire.

Conclusiones

Se demuestra que el uso de índices espectrales, como el IBI, permite extraer con buena precisión las superficies impermeables. En tan solo 29 años el área que rodea a la reserva tuvo un aumento del 33% de superficie urbanizada y un cambio considerable del uso de suelo dentro de la reserva.

El análisis estadístico basado en mínimos cuadrados ordinarios, aunque no sea el mejor para estudiar fenómenos espaciales, permite ver la correlación entre temperatura y el tipo de cubierta, y muestra la alteración climática que puede generar una superficie impermeable. Este es un resultado complementario, pero permite ver los patrones de temperatura de la ciudad, los cuales deben ser monitoreados y tomados en cuenta para la planificación urbana.

La importancia de la reserva es clara, por lo que debe ser protegida; al urbanizarse, Bogotá perdería un pulmón verde y la cuenca del río Bogotá, al noroccidente, recibiría una mayor carga de aguas urbanas, lo que afectaría ambientalmente a la ciudad y los municipios de la Sabana.

Los tipos de materiales urbanos tienen una función importante en la mitigación de problemas urbanos producidos por las condiciones climáticas, como las inundaciones o las islas de calor; esto último tiene una alta importancia actualmente ya que se trata de un cambio climático de tipo local influenciado por los rápidos procesos de urbanización con poca planeación con componentes ecológicos. Sumando el cambio climático global con el fenómeno de islas de calor, se tendría un fuerte impacto para las ciudades en las próximas décadas. En cuanto a la ciudad de Bogotá, será necesario que se inicie la discusión acerca de este tema, que es estratégico para temas ecológicos, de salud pública y cambio climático.

Referencias

- Almeida, R., Simões, N., Tadeu, A., Palha, P., y Almeida, J. (2019). Thermal behaviour of a green roof containing insulation cork board. An experimental characterization using a bioclimatic chamber. *Building and Environment*, 106179.
- Arnold Jr., C. L., y Gibbons, C. J. (1996). Impervious surface coverage: The emergence of a key environmental indicator. *Journal of the American Planning Association*, 62(2), 243–258.
- Baumhardt, R. L., Römkens, M. J. M., Whisler, F. D., y Parlange, J. Y. (1990). Modeling infiltration into a sealing soil. *Water Resources Research*, 26(10), 2497–2505.
- Brun, S. E., y Band, L. E. (2000). Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. *Computers, Environment and Urban Systems*, 24(1), 5–22.
- Cerdà, A., Morera, A. G., y Bodí, M. B. (2009). Soil and water losses from new citrus orchards growing on sloped soils in the western Mediterranean basin. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 34(13), 1822–1830.
- Chavez, P., Sides, S. C., y Anderson, J. A. (1991). Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data —Landsat TM and SPOT panchromatic. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(3), 295–303.
- Chavez, P. S. (1996). Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025–1035.
- Chen, J. (2007). Rapid urbanization in China: A real challenge to soil protection and food security. *Catena*, 69(1), 1–15.
- Chitsazan, M., Aghazadeh, N., Mirzaee, Y., y Golestan, Y. (2019). Hydrochemical characteristics and the impact of anthropogenic activity on groundwater quality in suburban area of Urmia city, Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 21(1), 331–351.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of satellite remote sensing: An environmental approach*. Boca Ratón: CRC.
- Congedo, L. (2019). *From GIS to Remote Sensing: User Manual of the Semi-Automatic Classification Plugin*. Recuperado de <https://fromgistors.blogspot.com/p/user-manual.html?spref=scp>
- Connors, J. P., Galletti, C. S., y Chow, W. T. (2013). Landscape configuration and urban heat island effects: Assessing the relationship between landscape characteristics and land surface temperature in Phoenix, Arizona. *Landscape Ecology*, 28(2), 271–283.
- Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca. (2011). Acuerdo 011 del 19 de julio del 2011, por medio del cual se declara la Reserva Forestal Regional Productora Del Norte De Bogotá “Thomas van der Hammen”, se adoptan unas determinantes ambientales para su manejo y se dictan otras disposiciones. Recuperado de <http://archivo.car.gov.co/node/2617#contentSec>
- Corporación Autónoma Regional (CAR) de Cundinamarca. (2014). Acuerdo 021 del 23 de septiembre del 2014, por medio del cual se adopta el Plan de Manejo Ambiental de la Reserva Forestal Regional Productora del Norte de Bogotá, D. C. “Thomas van der Hammen”. Recuperado de <http://archivo.car.gov.co/node/3089#contentSec>
- Crist, E. P., y Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data: The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing*, 3, 256–263.

- Estoque, R. C., y Murayama, Y. (2015). Classification and change detection of built-up lands from Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI/TIRS imageries: A comparative assessment of various spectral indices. *Ecological Indicators*, 56, 205–217.
- García, P., Pérez, M. E., y Guerra, A. (2014). Using TM images to detect soil sealing change in Madrid (Spain). *Geoderma*, 214, 135–140.
- García Alvarado, J. M., García Rodríguez, P., y Pérez González, M. E. (2018). Sellado de suelos a partir de teledetección y SIG en el Programa de Actuación Urbanística (PAU) del sudeste de Madrid (España). *Cuadernos Geográficos*, 57(1), 39–60.
- He, B. J. (2019). Towards the next generation of green building for urban heat island mitigation: Zero UHI impact building. *Sustainable Cities and Society*, 101647.
- Jupová, K., Bartaloš, T., Soukup, T., Moser, G., Serpico, S. B., Krylov, V., ... Rochard, N. (2017). Monitoring of green, open and sealed urban space. En *2017 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)* (pp. 1–4). Dubai: IEEE.
- Mas, J. F. (1999). Monitoring land-cover changes: A comparison of change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 20(1), 139–152.
- McCleery, R. A., Moorman, C. E., y Peterson, M. N. (eds.). (2014). *Urban wildlife conservation: Theory and practice*. Nueva York: Springer.
- Munafò, M., Norero, C., Sabbi, A., y Salvati, L. (2010). Soil sealing in the growing city: A survey in Rome, Italy. *Scottish Geographical Journal*, 126(3), 153–161.
- Munafò, M., Salvati, L., y Zitti, M. (2013). Estimating soil sealing rate at national level: Italy as a case study. *Ecological Indicators*, 26, 137–140.
- Pérez, E., y García, P. (2016). Monitoring soil sealing in Guadarrama river Basin, Spain, and its potential impact in agricultural areas. *Agriculture*, 6(1), 1–11.
- Romero Díaz, A., Belmonte Serrato, F., Docampo Calvo, A. M., y Ruiz Sinoga, J. D. (2011). Urbanismo expansivo: de la utopía a la realidad: comunicaciones: XXII. En Vicente Gozávez Pérez y Juan Antonio Marco Molina (eds.), *Congreso de Geógrafos Españoles, Universidad de Alicante, 2011*. Madrid: Asociación de Geógrafos Españoles.
- Scalenghe, R., y Marsan, F. A. (2009). The anthropogenic sealing of soils in urban areas. *Landscape and Urban Planning*, 90(1-2), 1–10.
- Shi, D., Zhuang, C., Lin, C., Zhao, X., Chen, D., Gao, Y., y Levinson, R. (2019). Effects of natural soiling and weathering on cool roof energy savings for dormitory buildings in Chinese cities with hot summers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200, 110016.
- Starke, P., Göbel, P., y Coldewey, W. G. (2010). Urban evaporation rates for water-permeable pavements. *Water Science and Technology*, 62(5), 1161–1169.
- Su, S., Zhang, Q., Zhang, Z., Zhi, J., y Wu, J. (2011). Rural settlement expansion and paddy soil loss across an ex-urbanizing watershed in eastern coastal China during market transition. *Regional Environmental Change*, 11(3), 651–662.
- Ulpiani, G., di Perna, C., y Zinzi, M. (2019). Water nebulization to counteract urban overheating: Development and experimental test of a smart logic to maximize energy efficiency and outdoor environmental quality. *Applied Energy*, 239, 1091–1113.
- Villa, P., Malucelli, F., y Scalenghe, R. (2018). Multitemporal mapping of peri-urban carbon stocks and soil sealing from satellite data. *Science of the Total Environment*, 612, 590–604.
- Wang, D., Ka-Lun Lau, K., Ren, C., Bernard III Goggins, W., Shi, Y., Chak Ho, H., ... Ng, E. (2019). The impact of extremely hot weather events on all-cause mortality in a highly urbanized and densely populated subtropical city: A 10-year time-series study (2006-2015). *Science of The Total Environment*, 690, 923–931. Recuperado de <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.039>
- Webster, R., y Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists*. 2.^a ed. Chichester: John Wiley and Sons.
- Weng, Q. (2001). Modeling urban growth effects on surface runoff with the integration of remote sensing and GIS. *Environmental Management*, 28(6), 737–748.

- Weng, Q. (2012). Remote sensing of impervious surfaces in the urban areas: Requirements, methods, and trends. *Remote Sensing of Environment*, 117, 34–49.
- Xiao, R., Su, S., Zhang, Z., Qi, J., Jiang, D., y Wu, J. (2013). Dynamics of soil sealing and soil landscape patterns under rapid urbanization. *Catena*, 109, 1–12.
- Xu, H. (2008). A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29(14), 4269–4276.
- Yang, Z., Chen, Y., Qian, Q., Wu, Z., Zheng, Z., y Huang, Q. (2019). The coupling relationship between construction land expansion and high-temperature area expansion in China's three major urban agglomerations. *International Journal of Remote Sensing*, 40(17), 6680–6699.
- Zinzi, M., Carnielo, E., y Mattoni, B. (2018). On the relation between urban climate and energy performance of buildings. A three-years experience in Rome, Italy. *Applied Energy*, 221, 148–160.

Notas

- * Artículo de investigación.
Este artículo hace parte del proyecto de investigación como modalidad de grado titulado Análisis espacial de islas de calor en la ciudad de Bogotá: los efectos de la urbanización, un estudio desde la teledetección, de Cristian Salas y Daniel Coy, en el proyecto curricular de Ingeniería Catastral y Geodesia de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, llevado a cabo durante el periodo 2018-2019. El proyecto fue desarrollado en el semillero de investigación GRSS del grupo de investigación GEFEM.

Licencia Creative Commons CC BY 4.0

Cómo citar este artículo: Salas Pérez, C., Coy Castro, D., Acuña Ramírez, K., Páez Cuervo, L., y Upegui, E. (2019). Crecimiento urbano e impermeabilización del suelo alrededor de la Reserva Forestal Thomas van der Hammen, en la ciudad de Bogotá. *Ambiente y Desarrollo*, 23(44). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.ayd23-44.cuis>