

¿Es detectable empíricamente la protección normativa del territorio? Análisis de las tendencias de temperatura y vegetación del área norte de Bogotá con sensores remotos

Is regulatory protection of the territory empirically detectable? Analysis of temperature and vegetation trends in the northern area of Bogota with remote sensing.

Luis Inostroza* y Richard Lemoine-Rodriguez**

Recibido: 24/08/2023. Aceptado: 6/12/2023. Publicado: 15/02/2024.

Resumen. Este trabajo presenta un análisis de las tendencias de desarrollo urbano del sector norte de Bogotá, en un área de 6930 hectáreas que incluye el Plan de Ordenamiento Zonal del Norte (POZN) y parte de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH). El plan propuesto por la Alcaldía mediante el Decreto 088 de 2017 intenta dar coherencia a un desarrollo urbano que ha ocurrido de facto y con importantes consecuencias ecológicas y sociales mientras que la RTVH intenta proteger las características ecológicas de este sector entre los cerros y el río Bogotá. El método consistió en analizar series de tiempo de temperatura de la superficie y de vegetación mediante técnicas de teledetección e indicadores radiométricos para identificar los cambios estructurales que ha experimentado el sector en términos de sus componentes biofísicos. Los resultados del análisis ponen en evidencia que el proceso de urbanización instalado en el sector norte de Bogotá es el determinante de las tendencias del espacio biofísico observadas, más allá de las figuras de protección legal que existen que incluyen el POZN y la RTVH. En el caso de la RTVH, el marco de protección no ha sido efectivo para preservar las características ecológicas que justificaron su creación. La inclusión de evidencia empírica como la mostrada en este trabajo en la planificación del desarrollo

urbano es clave para avanzar en la protección activa del medio ambiente, más allá del discurso normativo.

Palabras clave: teledetección, EVI, temperatura de la superficie de la tierra, planificación urbana, reserva Thomas van der Hammen, análisis multitemporal.

Abstract. This article analyzes the trends in urban development in an area of 6930 hectares in the northern sector of Bogotá that includes the Northern Zonal Management Plan (POZN, in Spanish) and part of the Thomas Van der Hammen Nature Reserve (RTVH, in Spanish). The plan established by the Mayor's Office through Decree 088 of 2017 seeks to manage an urban development trend that has occurred de facto, with important ecological and social consequences, while the RTVH intends to protect the ecological characteristics of this sector located between the hills and the Bogotá River. The method consisted of analyzing time series of surface temperature and vegetation using remote sensing techniques and radiometric indicators to identify the structural changes experienced by the sector in terms of its biophysical components. The results of the analysis show

* Mendel University in Brno, Faculty of Regional Development and International Studies, Zemědělská 1665/1, Černá Pole, 613 00 Brno-sever, República Checa y Universidad Autónoma de Chile, Chile. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6303-4529>. Email: luis.inostroza@mendelu.cz. Autor de correspondencia.

** Geolinguual Studies, University of Würzburg, Alemania y Earth Observation Center, German Aerospace Center, Alemania. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3679-6958>. Email: richard.lemoine-rodriguez@uni-wuerzburg.de

that the urbanization process taking place in the northern sector of Bogotá is the driver of the observed trends in the biophysical space beyond the legal protection instruments currently in force, including POZN and RTVH. In the case of RTVH, the protection framework has been insufficient to preserve the ecological characteristics that led to its creation. The inclusion of empirical evidence in urban development

planning, such as that shown in this work, is key to advancing the active protection of the environment beyond the regulatory discourse.

Keywords: remote sensing, EVI, land surface temperature, urban planning, Thomas van der Hammen reserve, multi-temporal analysis

INTRODUCCIÓN

La crisis socioecológica del siglo XXI, cruzada por una evidente crisis climática y social, requiere de nuevos modelos de planificación y monitoreo que permitan impulsar un desarrollo urbano realmente sostenible (Seto *et al.*, 2016). La planificación urbana se enfrenta al gran dilema de conciliar las necesidades de una población creciente que demanda mejores estándares y calidad de vida con la necesidad de proteger una naturaleza que se encuentra amenazada local y globalmente (Grimm *et al.*, 2008; United Nations, 2015). La planificación urbana tradicional se encuentra en crisis (Seto *et al.*, 2016), y requiere nuevos y frescos enfoques basados en evidencia científica que le permitan enfrentar los enormes desafíos socioecológicos que el siglo XXI impone a la ciudad y sus habitantes, mediante la inclusión del análisis del clima urbano, de los servicios ecosistémicos y la incorporación de soluciones basadas en naturaleza, aspectos que deben ser urgentemente incluidos tanto en la planificación urbana que desarrollan instituciones públicas y privadas de manera práctica, como también ser incorporados de manera explícita y formal en las redes académicas y currículos de las carreras profesionales *ad hoc*.

La ciencia puede jugar un rol fundamental para enfrentar los retos de la sustentabilidad urbana, al poseer la capacidad de informar los posibles efectos de distintas alternativas de desarrollo, permitiendo explorar medidas que minimicen los efectos indeseados de políticas públicas, planes y proyectos que podrían estar basados en consideraciones infundadas o incluso sesgadas de la realidad. La ciencia puede ser una herramienta que informe a las instituciones locales, y aporte evidencia empírica e información ecológica clave para la toma de decisiones de los actores públicos y privados.

Las ciudades latinoamericanas se expanden a velocidades muy altas que rondan los 20 m² por minuto, alterando sus ecosistemas aledaños (Artmann *et al.*, 2019b). Bogotá, a pesar de presentar una expansión urbana compacta, ha experimentado un importante crecimiento en su vector norte con efectos directos en el medio biofísico (Gomez-Rodríguez y Beltrán-Vargas, 2018; Inostroza *et al.*, 2013; Salas-Pérez *et al.*, 2019). Este desarrollo urbano es espontáneo, no planificado, intenso y también informal (Inostroza, 2017) y produce cambios importantes en los ecosistemas, tanto en términos de la intensidad y calidad de la vegetación existente como de la densidad y características del espacio construido (Inostroza *et al.*, 2013). Es importante identificar cuáles son las tendencias de cambio en términos de la evolución del espacio biofísico analizando el desarrollo urbano como un proceso continuo y sobre evidencia empírica (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). El análisis de dinámicas de cambio con sensores remotos puede hacer una potente contribución para monitorear el desarrollo urbano y sus implicaciones (Figura 1; Inostroza *et al.*, 2013; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2020). En la última década, un número creciente de trabajos científicos ha demostrado que el uso de imágenes de satélite y métodos de análisis geostatístico permite identificar las tendencias y la heterogeneidad espacial de distintas dinámicas interrelacionadas de las ciudades, tales como la expansión física urbana, los cambios en la cobertura vegetal y la evolución de las islas de calor urbano (K. Huang *et al.*, 2019; Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a). En un escenario ideal, la información generada mediante este tipo de estudios debe ser considerada por los tomadores de decisiones para planear el desarrollo de las ciudades con base en evidencia empírica.

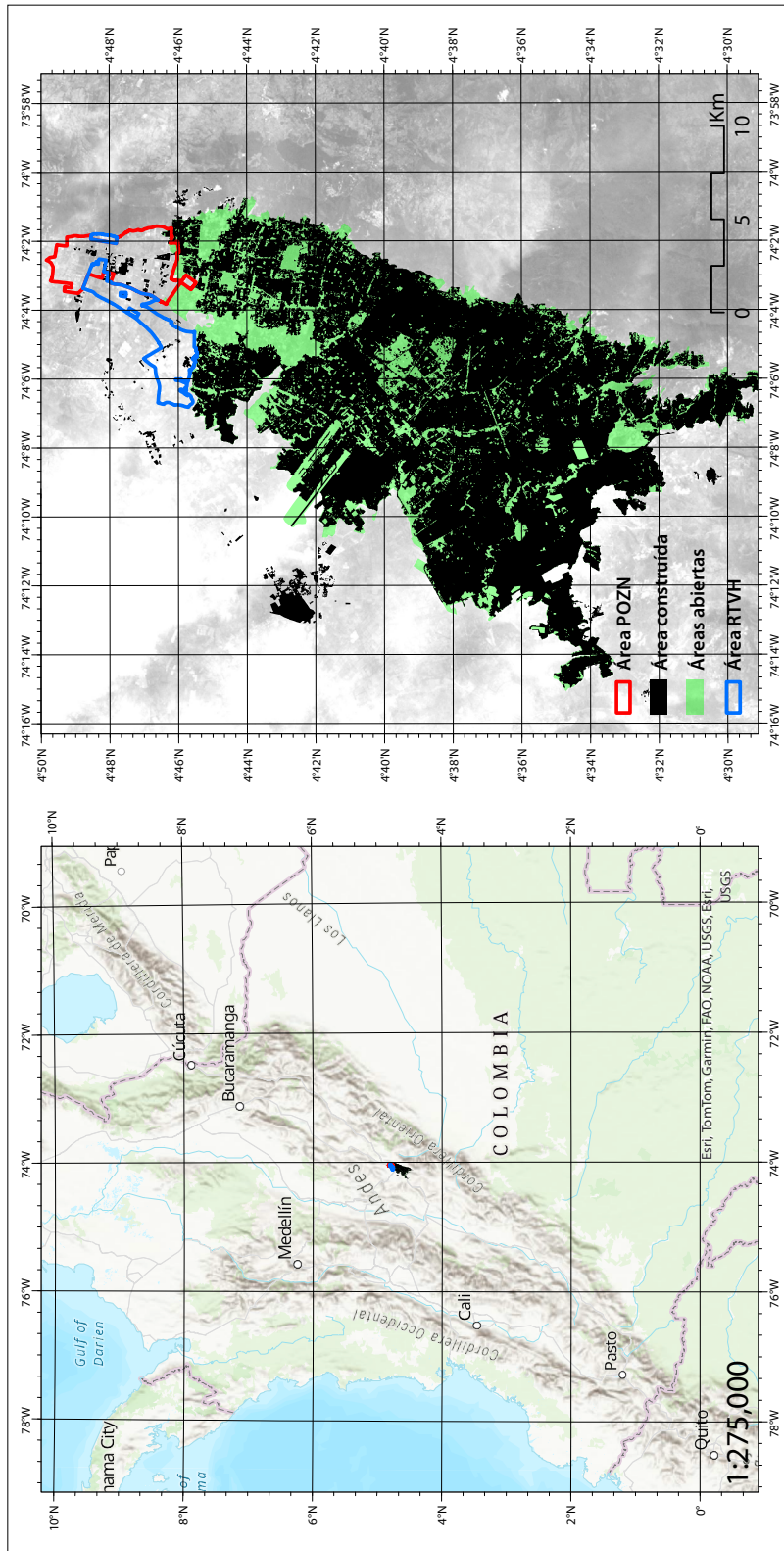


Figura 1. Expansión urbana experimentada por Bogotá entre los años 1988 y 2010, que muestra la relación entre el área de estudio (POZN y RTVH) y el resto de Bogotá. Fuente: elaboración propia sobre imágenes satelitales LANDSAT.

Este trabajo presenta un análisis de las tendencias de desarrollo del sector norte de Bogotá, en un área de 6930 hectáreas, que incluyen una extensión de 1873 ha planificadas por la alcaldía de Bogotá, a través del Plan de Ordenamiento Zonal del Norte (POZN), y parte de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH). El plan propuesto por la alcaldía, mediante el decreto 088 de 2017, intenta dar coherencia a un desarrollo urbano que ha ocurrido *de facto* y con importantes consecuencias ambientales y sociales, mientras que la RTVH intenta proteger las características ecológicas de este sector entre los cerros y el río Bogotá. En su origen, la RTVH fue inspirada en las ideas de Thomas Van der Hammen, quien propiciaba formas de conservación ecológica típicas del siglo XX mediante la protección y generación de corredores ecológicos que mantuvieran la funcionalidad de los ecosistemas.

OBJETO DEL ANÁLISIS

El análisis presentado tiene como objetivo evaluar las tendencias de desarrollo del área norte de Bogotá. El objetivo específico es determinar las diferencias y similitudes que han experimentado las áreas correspondientes al Plan de Ordenamiento Zonal Norte (POZN) y el área de la reserva natural Thomas Van der Hammen (RTVH).

MÉTODO

El análisis de la evolución del espacio biofísico mediante técnicas de teledetección abarcó un periodo de 22 años (2000-2021). Este análisis permite utilizar las tendencias en la intensidad de la vegetación (análisis fenológico, siguiendo Zewdie *et al.*, 2017) y del espacio construido, a fin de analizar los cambios experimentados en el área de estudio, cubriendo un total de 6930.5 ha (Figura 2; AOI), incluyendo la totalidad del POZN y la parte norte de la RTVH. El análisis se llevó a cabo en el ambiente para análisis estadístico R (R Core Team, 2020).

Preprocesamiento de datos de temperatura y vegetación (AOI MODIS)

Para analizar el clima y la vegetación locales se utilizaron 2 indicadores radiométricos: el EVI (Enhanced Vegetation Index) y Land Surface Temperature (Temperatura de la Superficie Terrestre, TST). El EVI fue representado mediante el producto Terra MODIS Vegetation Indices (NDVI&EVI, MOD13A2). El EVI es un indicador de la intensidad y verdor de la vegetación, que ha demostrado ser efectivo para su uso en ambientes urbanizados (Clinton y Gong, 2013; Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a; Peng *et al.*, 2012). La TST también refleja el efecto de la urbanización de manera indirecta a través de los cambios en la temperatura de la superficie, donde los valores más altos corresponden a áreas urbanizadas y los más bajos a áreas con cobertura vegetal (Oke *et al.*, 2017).

Para representar las temperaturas en el área de estudio de forma espacialmente explícita, se emplearon imágenes MODIS MOD11A2 diurnas, que incluyen valores de TST promedio por pixel en intervalos de 8 días con 1 km de resolución espacial. Se emplearon todas las escenas disponibles para el periodo 2000-2021, que derivaron en un volumen total de 1004 imágenes. Las imágenes fueron filtradas con base en las bandas de calidad de los datos (*i.e.*, QA), con el fin de incluir en nuestro análisis solo pixeles con un error ≤ 2 °K.

Las dinámicas espaciotemporales de la vegetación del área de estudio fueron analizadas mediante el producto MODIS MOD13A2, que contiene el valor del índice de vegetación mejorado EVI de mejor calidad por pixel con base en intervalos de 16 días a una resolución de 1 km alcanzando un volumen de 496 imágenes para nuestro periodo de estudio. Los criterios empleados para seleccionar el valor final de cada pixel son: baja presencia de nubes, bajo ángulo de toma y el valor de EVI más elevado.

Los productos MODIS de TST y EVI fueron transformados de su proyección nativa sinusoidal al sistema de proyección de coordenadas PCS_Carmagbog. Los números digitales contenidos en las imágenes MOD11A2 fueron reescalados para obtener valores de TST en kelvin, los cuales fueron finalmente transformados a grados centígrados. Los números digitales de los productos MOD13A2

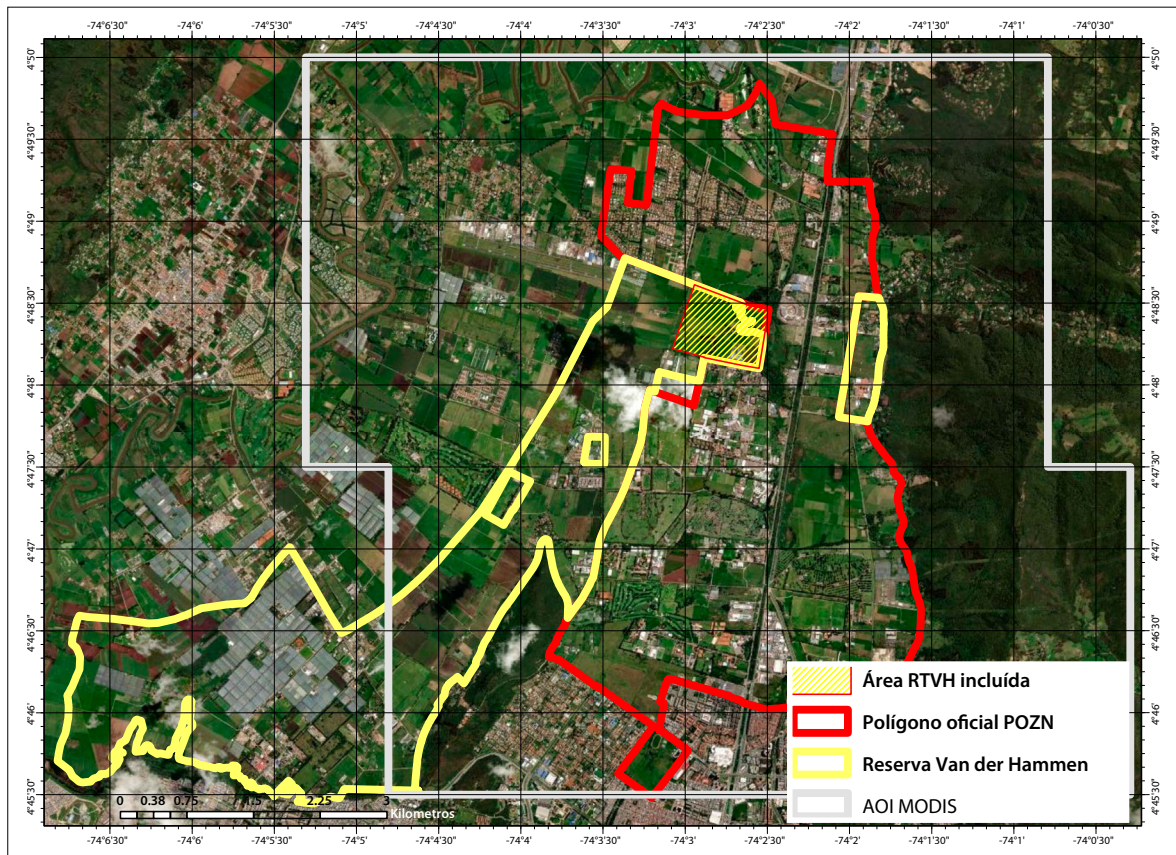


Figura 2. Extensión total del área de estudio y desglose de áreas. Fuente: elaboración propia.

fueron reescalados para obtener valores de EVI en el rango de -1 a 1. Para generar datos a intervalos consistentes que representaran la evolución tanto de los valores de TST como de EVI a través del tiempo, se calcularon promedios anuales por pixel para ambos indicadores, obteniendo un volumen final de 22 imágenes para cada serie de tiempo representando el periodo 2000-2021.

Análisis de tendencias de temperatura y vegetación

Se analizaron las tendencias de TST tanto a nivel de pixel como de polígono, tomando el AOI MODIS (Figura 2) como una unidad espacial. La tendencia a escala del polígono del POZN fue analizada mediante una regresión lineal, empleando el promedio de la TST de cada año como variable dependiente y el tiempo como variable explicativa. Además, se

estimó la correlación de Pearson entre cada variable en los polígonos del POZN y RTVH.

Para analizar a detalle las tendencias espaciotemporales de TST y EVI, se aplicaron regresiones lineales para cada indicador, definiendo modelos similares a los del paso anterior, pero esta vez de forma espacialmente explícita. Para esto, se definió un modelo independiente por pixel, es decir, cada pixel representó una serie de tiempo. Así, se obtuvieron los valores de pendiente y valores de significancia estadística (i.e., p) de TST y EVI por pixel correspondientes al periodo 2000-2021.

Distribución espacial de tendencias de temperatura

La evolución espaciotemporal de las TST fue explorada a través de un método de detección de tendencias de valores agrupados espacialmente

en el periodo 2000-2021. Para esto, los datos de TST fueron analizados con las estructuras de un cubo de espacio-tiempo, empleando el paquete LSTtools de R (Lemoine-Rodríguez y Mas, 2020; R Core Team, 2020). El cubo de espacio-tiempo es la representación multidimensional de la serie de tiempo de TST, donde las coordenadas representan la dimensión espacial, las fechas correspondientes a cada año representan la dimensión temporal y los valores del promedio de TST anual de cada pixel son el indicador dinámico que se evalúa (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). La finalidad de este método es producir una clasificación que combina estadísticas espaciales (*i.e.*, detección de puntos calientes y fríos; análisis de *hot/cold spots*) y temporales (prueba de tendencias de Mann-Kendall) para reflejar las tendencias espaciotemporales de la TST, siguiendo a (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Esto brinda mayor poder explicativo sobre la evolución de la TST que los enfoques tradicionales que solo incluyen la detección de puntos calientes y fríos o solo se enfocan en el análisis de tendencias temporales, por separado. Como parte de este método, primero se detectaron los grupos de pixeles con valores extremos de TST altos (*i.e.*, *hot spots*), bajos (*i.e.*, *cold spots*) y promedio para cada año, empleando la prueba de Getis-Ord G_i^* con base en un nivel de significancia de $p < 0.05$ (Anselin, 1995). Posteriormente, se empleó cada pixel como una serie de tiempo para identificar tendencias monotónicas significativas ($p < 0.05$) en los valores de TST durante el periodo 2020-2021 (Kendall, 1975; Sen, 1968). Este método calcula la proporción de años en los que cada pixel perteneció a las clases de valores extremos altos y bajos, incluyendo así la dimensión temporal de manera explícita en el análisis (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Los pixeles fueron clasificados en áreas sin tendencia (pixeles que presentaron valores extremos altos o bajos en $< 90\%$ de los años), valores en incremento (pixeles con tendencia positiva), valores en disminución (pixeles con tendencia negativa), valores altos sin cambio (pixeles con valores extremos altos en $> 90\%$ de los años del periodo de estudio y sin tendencia temporal), valores bajos sin cambios (pixeles con valores extremos bajos en $> 90\%$ de los años del periodo de estudio y sin tendencia temporal), valores altos nuevos (pixeles con valores

extremos altos solo en 2021) y valores bajos nuevos (pixeles con valores extremos bajos solo en 2021). Estas son todas las posibilidades de clasificación en que pueden agruparse los pixeles del área de estudio. En los resultados se presentan únicamente las clases que fueron detectadas durante el periodo analizado.

RESULTADOS

Macrotendencias de temperatura y vegetación

La Figura 3 muestra los resultados de los cálculos de temperatura anuales promedio para el periodo 2000-2021. Se observan 3 tipos de tendencias por pixel en la TST: 1) valores de temperatura bajos, sin tendencia de cambio significativa concentrados al nororiente del área de estudio (AOI-MODIS) y que corresponden a áreas cercanas al sistema orográfico de los Andes; 2) un área central diagonal al anterior sin tendencia espacial ni temporal significativa, y 3) el área sur occidente con valores de temperatura altos también sin tendencia temporal. La mayor temperatura de esta área puede obedecer tanto a su mayor grado de urbanización como a su mayor cercanía a Bogotá y su respectiva isla de calor.

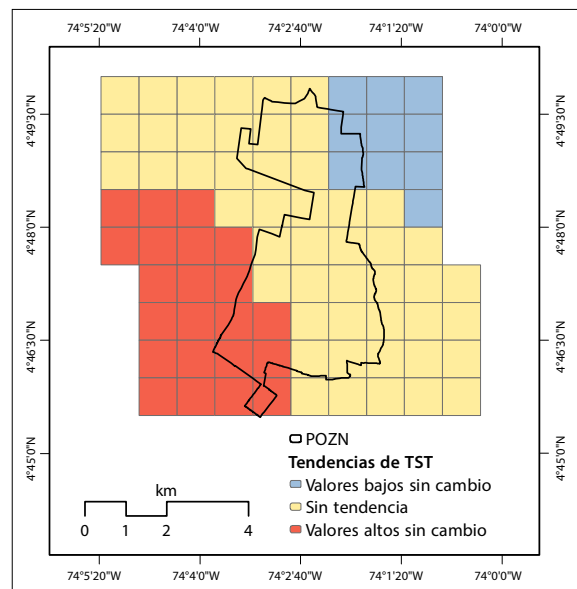


Figura 3. Macrotendencias en la temperatura de la superficie terrestre (TST) en el área del POZN y circundante. Fuente: elaboración propia.

Sin considerar las áreas circundantes, el ajuste lineal de tendencias de temperatura multitemporales para el polígono de estudio total muestra una ligera pendiente positiva, de incremento. Al igual que en el caso anterior, esta tendencia de incremento posiblemente se debe a los crecientes grados de urbanización que ha experimentado el sector durante las últimas dos décadas.

Al interior del polígono del POZN los pixeles muestran valores de pendiente de la TST general-

mente bajos, siendo algunos de los más altos los que no muestran una tendencia significativa. Los valores de pendiente de TST más altos (i.e., aumento de temperaturas) se encuentran al sur y norte del polígono del POZN, algunos de ellos siendo significativos. Por el contrario, los valores más bajos se distribuyen al centro del polígono y en su zona este y oeste. Dichas tendencias obedecen a dinámicas de desarrollo específicas que afectan los cambios en las temperaturas de manera diferencial (Figura 4).

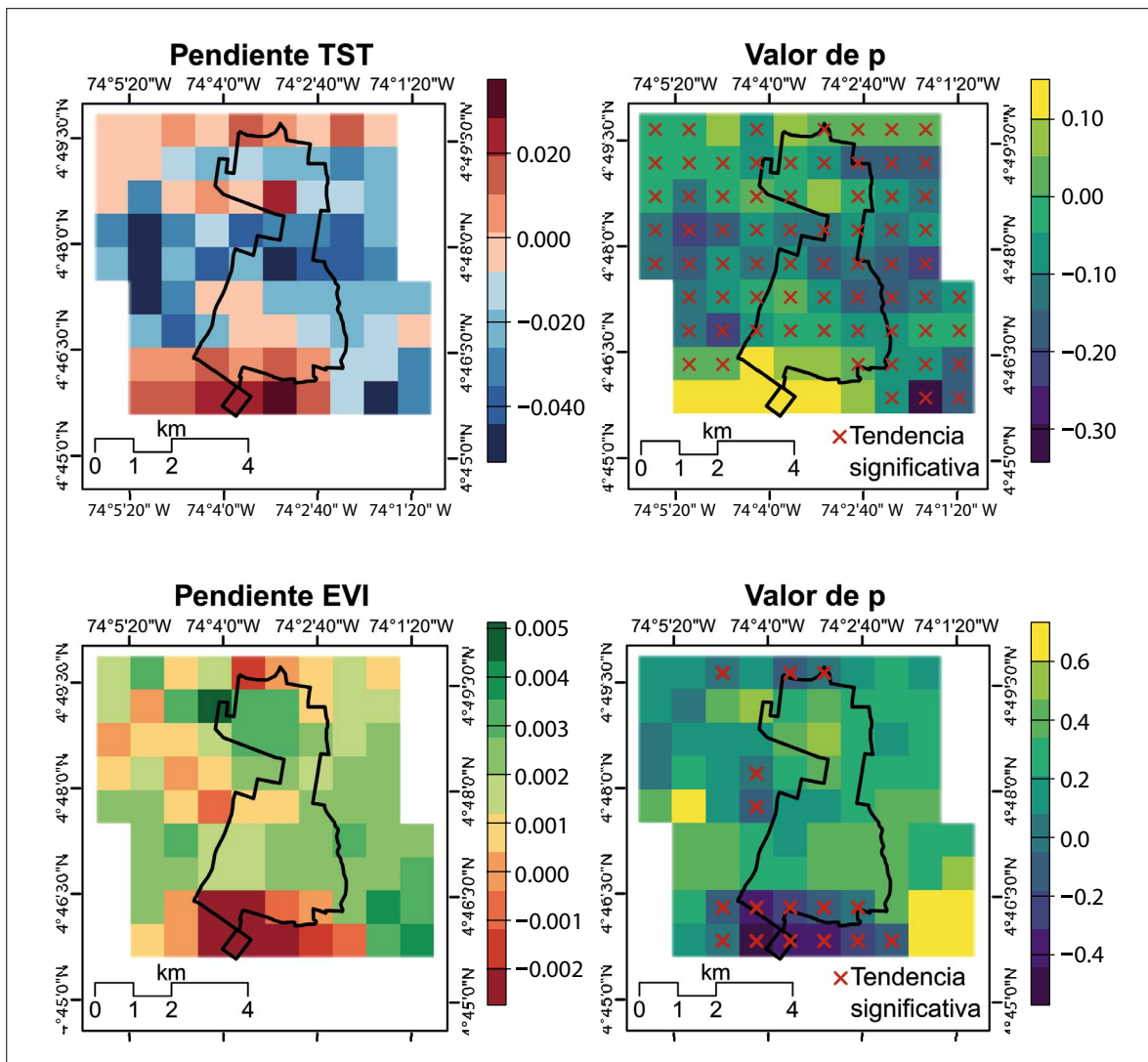


Figura 4. Tendencia multitemporal en la temperatura de la superficie terrestre (TST, arriba) e intensidad de la vegetación (EVI, abajo) en el área del POZN y circundante. Se resaltan los pixeles con valores de $p < 0.05$ en los mapas correspondientes (paneles de la derecha). Fuente: elaboración propia.

Al observar las tendencias en la intensidad de la vegetación reflejadas por el indicador EVI se muestra claramente una relación con las dinámicas de las temperaturas a nivel pixel. Las mayores pendientes significativas negativas (i.e., reducción de la vegetación) se encuentran al norte y al sur del polígono POZN, cercanas al área urbana consolidada de Bogotá. Lo valores de significancia estadística (p-value) son mayormente significativos en la zona sur del polígono de estudio (Figura 4).

Al comparar las tendencias tanto de temperatura como de intensidad de la vegetación de los polígonos del POZN y RTVH se observa una alta correlación en cada unidad espacial. Las temperaturas medidas al interior de ambos polígonos siguen las mismas fluctuaciones (Figura 5). Mientras que la intensidad de la vegetación, si bien es ligeramente mayor al interior del polígono RTVH, presenta tendencias a largo plazo acopladas a la temperatura. En efecto, la mayor intensidad de la vegetación existente en el polígono RTVH manifiesta no obstante las mismas fluctuaciones temporales que la vegetación al interior del polígono del POZN, con una correlación

significativa de 0.87 ($p > 0.001$). La TST también exhibe una tendencia sumamente similar entre el POZN y RTVH, con una correlación significativa de 0.92 ($p < 0.001$). Este acoplamiento evidencia que ambas áreas están sometidas a dinámicas similares de cambio de la configuración del espacio biofísico, derivadas de procesos de urbanización que no muestran diferencias significativas que reflejen la contrastante normativa que rige sobre ambas áreas.

DISCUSIÓN

El patrón de desarrollo urbano latinoamericano es fragmentado y disperso (Inostroza *et al.*, 2013; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2019), lo que afecta radicalmente los ecosistemas internos y externos de las ciudades, alterando su estructura y funciones primordiales, así como su biodiversidad (Inostroza, 2022). Con un comportamiento tan dinámico, las consecuencias, impactos y transformaciones inducidas en los ecosistemas, ya sea de manera directa o indirecta, son evidentes y de gran magnitud, y

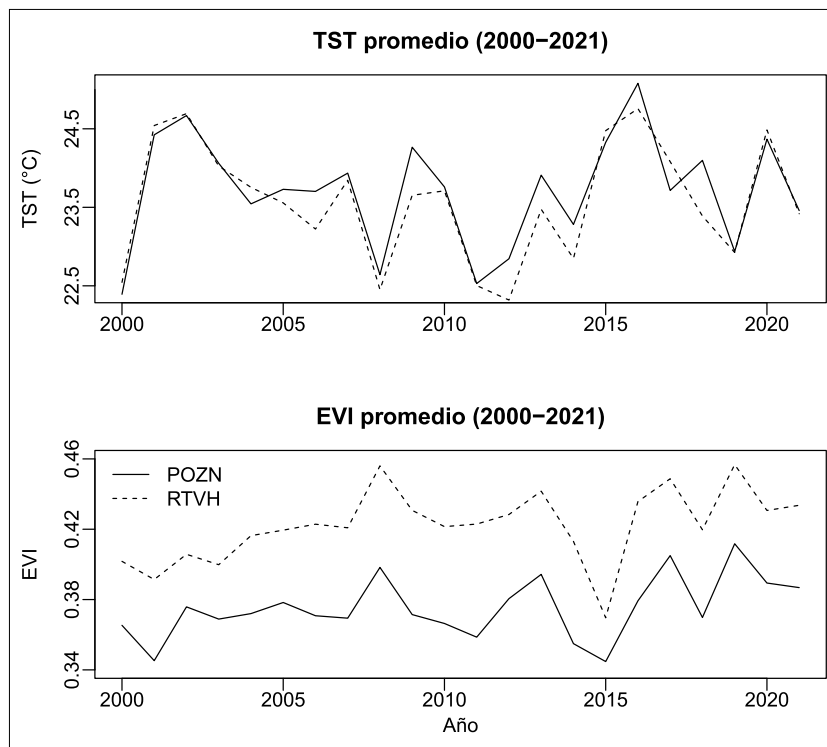


Figura 5. Comparación de tendencias de temperatura (arriba) y de vegetación (abajo) con ajuste lineal multitemporal entre las áreas del POZN y RTVH. Fuente: elaboración propia.

abarcan diversas escalas y áreas de influencia (Jones *et al.*, 2022). La rápida expansión urbana y la fragmentación producen incrementos significativos en la segregación socio-espacial y pérdida crítica de áreas con vegetación nativa (Barrera *et al.*, 2018; Lemoine-Rodríguez *et al.*, 2019). El desarrollo urbano fragmenta, aísla e incluso degrada los ecosistemas naturales, homogeneizando su composición de especies e alterando sus sistemas hidrológicos, energéticos y de flujos de materia y nutrientes (Alberti, 2005). El actual paradigma de la ciudad compacta, que se ha consolidado como la meta de la planificación urbana, tampoco es la panacea, ya que eventualmente limita el espacio para la infraestructura verde urbana, con lo cual se producen asimetrías (*trade-offs*) en términos de la forma urbana que es necesario resolver (Artmann *et al.*, 2019a; Baró *et al.*, 2017). Esto es muy claro en cuanto al rol hegemónico del automóvil, cuya dictadura en la planificación urbana lleva la dispersión a escalas absurdas (J. Huang *et al.*, 2007). Sin embargo, a escalas mayores se ha observado que el desarrollo urbano compacto produce menos impactos ecológicos que el modelo de sub-urbanización tipo disperso (denominado *sprawl*; Zhong *et al.*, 2022).

Nuestro trabajo analiza las tendencias del espacio biofísico del vector de desarrollo norte de Bogotá con técnicas de teledetección. Los resultados muestran que las áreas estudiadas (POZN y RTVH) presentan tendencias de urbanización incrementales y similares, medidas con indicadores radiométricos *ad hoc*. Estas conclusiones son corroboradas por trabajos previos realizados por Gomez-Rodríguez y Beltrán-Vargas (2018) y Salas-Pérez *et al.* (2019) utilizando dos imágenes Landsat y por Hurtado *et al.* (2020) que utilizó 7 imágenes de diversos sensores. Nuestro aporte metodológico y analítico es la utilización de técnicas multitemporales que incluyen una cantidad mayor de imágenes (1 044 imágenes de TST y 496 de EVI, agregadas en 22 escenas anuales), lo que permite establecer que las tendencias presentadas son robustas en el horizonte temporal analizado (2000-2021). Además, en este estudio integramos el análisis de tendencias de TST y de vegetación con base en unidades aisladas (píxeles) y contextualizadas espacialmente con sus píxeles adyacentes (polígonos). Esto permitió

captar tanto la heterogeneidad de las tendencias de cada píxel como su efecto combinado en la tendencia general de cada polígono. Esto combinado con la identificación empírica de grupos de píxeles con tendencias espaciotemporales de TST particulares permite una interpretación más robusta de los cambios de temperatura y su relación con la vegetación a través del tiempo (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a, 2022b).

Aunque nuestros resultados muestran que la TST incrementa como consecuencia de la disminución en la vegetación, hay diversos factores que influyen este fenómeno y que deben considerarse en estudios posteriores. Distintas estructuras vegetales afectan el clima local de forma diferente. Por ejemplo, el aporte de la cubierta arbórea para mitigar las temperaturas es mucho mayor que el de la vegetación herbácea, por lo que el reemplazo de estas cubiertas representa diferentes implicaciones en términos de la intensidad del aumento de TST (Lemoine-Rodríguez, Inostroza, Falfán *et al.*, 2022; Stewart y Oke, 2012). En estudios posteriores estos dos tipos de cubiertas pueden ser diferenciados para lograr un análisis más detallado de la relación entre la disminución de distintas cubiertas vegetales y el aumento de TST. Otro aspecto a considerar es la configuración espacial de los parches tanto urbanizados como de vegetación (Deng *et al.*, 2009). A medida que disminuye la vegetación debido al establecimiento de infraestructura urbana, emergen diversos patrones espaciales. En este proceso, los patrones de urbanización más densificados suelen corresponder a mayor aumento de TST (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022a; Stewart & Oke, 2012). A escala más detallada, la magnitud a la cual las temperaturas aumentan también está relacionada a los materiales específicos con los que son construidas las edificaciones (Palme *et al.*, 2018). Debido a estos factores, se pueden presentar discordancias entre los cambios de TST y el EVI, ya que este índice de vegetación captura la composición vegetal pero no la configuración espacial ni los materiales específicos del tejido urbano y sus alrededores.

La falta de eficiencia normativa

Mantener la integridad ecológica de los ecosistemas urbanos en un contexto de altas tasas de expansión

y fragmentación urbana es uno de los desafíos más importantes de la planificación urbana latinoamericana. Para enfrentar este desafío es indispensable la incorporación sistemática de conocimiento científico que permita proteger el valor ecológico de los ecosistemas regionales a través de un trabajo conjunto entre ciencia y política que reproduzca círculos virtuosos de aprendizaje recíproco (Rozas-Vásquez *et al.*, 2017). La incorporación de estándares paramétricos que aseguren una rica estructura ecológica de infraestructura verde y azul con diversidad de especies y adecuado manejo ecológico que incluya mínima poda de césped y descomposición de biomasa *in situ* (Inostroza, 2022), fomentar la agricultura urbana en espacios intersticiales y vacíos (Azunre *et al.*, 2019), en distribuciones espaciales adecuadas (Zepp *et al.*, 2021), son medidas necesarias y urgentes. Sin embargo, todavía se requieren mayores esfuerzos tanto conceptuales como operacionales para facilitar la aplicabilidad del conocimiento ecológico en la planificación urbana real, esa que desarrollan planificadores y empresas en sus computadores y que luego se implementa y construye a través de proyectos concretos en lugares específicos. El presente trabajo tuvo como objetivo ilustrar como pueden evaluarse los resultados de los planes de desarrollo urbano implementados previamente, con el fin de identificar su efectividad mediante datos empíricos y adaptar los futuros planes con base en las tendencias detectadas.

En el presente estudio el análisis con sensores remotos evidencia que ambas áreas manifiestan tendencias de cambio de la configuración del espacio biofísico altamente similares, las que obedecen al proceso de urbanización instalado en el área norte de Bogotá que ha sido documentado en trabajos previos (Inostroza, 2017; Inostroza *et al.*, 2013). El vector de urbanización del área norte de Bogotá es potente y también ha sido analizado en el caso específico de las dinámicas biofísicas al interior de la RTVH (Hurtado *et al.*, 2020; Salas-Pérez *et al.*, 2019) y de cambios de usos del suelo y provisión de servicios ecosistémicos (Gomez-Rodriguez y Beltrán-Vargas, 2018). Las tendencias identificadas tanto en trabajos previos como en el nuestro no reflejan la normativa de protección que rige sobre

la RTVH, evidenciando que existe una discordancia entre la realidad biofísica que experimenta el sector y la normativa que lo regula. Esta situación no es particular de Bogotá y ha sido analizada en otros contextos latinoamericanos mediante otros enfoques y análisis cuantitativos (Daunt *et al.*, 2021). La planificación discursiva practicada en Latinoamérica requiere reforzarse con trabajos de monitoreo recurriendo a técnicas como las presentadas en este trabajo, que aportan evidencia para la toma de decisiones que eviten pérdidas de los valores ecológicos existentes.

La RTVH forma parte de la estructura ecológica principal bogotana con un uso predominante de reserva forestal, junto a actividades de conservación e investigación y recreativas de bajo impacto. También existen en el sector diversas infraestructuras junto a usos residenciales y agropecuarios (Salas-Pérez *et al.*, 2019). De acuerdo con la percepción de expertos locales, “*existe una riqueza ecológica y paisajística en la Zona Norte de Bogotá para la dinámica ecológica regional, en virtud de lo cual la recuperación y conservación de la misma debe ser un objetivo prioritario*” (CAR de Cundinamarca, 2011, p. 1). Sin embargo, esta situación no se ve reflejada en nuestro análisis y requiere no solamente la revisión de los paradigmas de conservación existentes sino fundamentalmente la inclusión de formas activas de protección, que involucren a la ciudadanía de maneras más activas sobre la base de la identificación, cuantificación y valoración de los beneficios que dichas áreas proveen a las poblaciones locales, tarea que se está llevando a cabo en otras latitudes sobre la base de la ciencia de los servicios ecosistémicos (SE) (Inostroza *et al.*, 2017).

Limitaciones del análisis

Los desafíos técnicos que este tipo de análisis presenta para áreas geográficas como la Bogotana son importantes, por razones climáticas que producen prolongados lapsos de tiempo con altas coberturas nubosas que dificultan la obtención sistemática y periódica de datos radiométricos. Las dificultades en la obtención de imágenes satelitales de alta calidad, con cobertura de nubes no superiores al 3%, constituyeron una restricción importante en la recolección de información. La alta cobertura nubosa

sobre el área de estudio en prolongados periodos de tiempo dificultó la obtención del volumen de datos en alta resolución espacial necesario para un análisis multitemporal estadísticamente robusto con las técnicas presentadas. Por esta razón no fue posible utilizar imágenes satelitales de alta resolución disponibles mediante los sensores Landsat (de 30 metros de resolución por pixel), pues la densidad y periodicidad de datos disponibles no es suficiente. La mayor frecuencia de tomas del sensor MODIS (datos diarios agregados en promedios de 8 y 16 días) permitió un mayor volumen de datos y se optó por esta base de datos, sobre la cual se desarrolló el análisis. De este modo, fue posible identificar tendencias de cambio monotónicas de una forma estadísticamente robusta (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Sin embargo, en áreas con mayor disponibilidad de imágenes Landsat de alta calidad (baja cobertura de nubes), se sugiere emplear este tipo de datos para realizar un análisis con mayor resolución espacial.

El espacio biofísico bogotano y sus tendencias. Mas allá de los mitos

El análisis multitemporal de indicadores radiométricos evidencia los cambios estructurales que ha experimentado el sector norte de Bogotá en términos de sus componentes biofísicos. Este tipo de análisis permite extraer conclusiones científicas validadas en evidencia empírica sobre los procesos de cambio que experimenta la superficie de la tierra y que se construyen utilizando la información radiométrica (espectrográfica) que emite la superficie terrestre y que es capturada por sensores remotos que orbitan el planeta de manera regular almacenando información cuantitativa de manera sistemática. Este enfoque permite analizar los cambios en series de tiempo consistentes, dada la periodicidad de la información disponible. El método utilizado es verdaderamente multitemporal, es decir, incluye el tiempo como una variable fundamental en los cambios de la superficie terrestre tal como se introduce en Wentz *et al.* (2018) y se aplicó en Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp (2022a, 2022b). La multitemporalidad real se logra al utilizar un gran volumen de imágenes satelitales con técnicas de análisis cuantitativo adecuadas.

Es un análisis que permite extraer conclusiones estructurales de los cambios experimentados en un periodo largo de tiempo y difiere de otros tipos de análisis que incluyen solo uno o algunos pocos momentos de toma de datos y que, por esta razón, pueden eventualmente esconder las tendencias estructurales subyacentes. Esto es particularmente importante en el caso de indicadores como la TST, que exhibe una gran variabilidad temporal (Lemoine-Rodríguez, Inostroza y Zepp, 2022b). Futuros estudios podrían avocarse al análisis de distintas representaciones temporales de la TST y sus tendencias. Por ejemplo, agregando los datos en series semanales, mensuales o estacionales, lo que permitiría identificar otras tendencias de la TST influenciadas por ciclos temporales específicos. Esto es especialmente importante en el caso de las estaciones del año, las cuales afectan de forma importante la temperatura.

CONCLUSIÓN

El proceso de urbanización pone en jaque los actuales sistemas de gobernanza y planificación con el surgimiento de nuevos patrones de desarrollo que escapan a las estructuras de planificación y ordenamiento territorial heredadas del siglo pasado, y construidas fundamentalmente sobre percepciones estéticas y consideraciones economicistas más que sobre fundamentos científicos y ecológicos. Es necesario incorporar nuevas formas de planificación que no solo reconozcan y cuantifiquen, sino que principalmente incorporen los diversos valores de la naturaleza en la planificación urbana, de manera conceptualmente clara y operativamente robusta, idealmente sobre la base de indicadores biofísicos espacialmente explícitos. Este desafío se enfrenta con profundas barreras disciplinares que requieren la reconceptualización e integración de las disciplinas que diseñan y proyectan la ciudad, con las que la estudian desde el punto de vista científico. Esta integración requiere ser conceptual y operacional para romper las brechas que existen entre ambos mundos y que hoy siguen corriendo en paralelo. Para que una transformación de esta magnitud pueda ocurrir, se requieren importantes

cambios en los sistemas educativos y curriculares existentes en las universidades a fin de educar a los futuros profesionales del desarrollo urbano con los conocimientos que demanda el siglo XXI, específicamente en relación con la revalorización práctica y operacional de la naturaleza y su inmensa contribución a nuestro bienestar a fin de dotarlos con herramientas prácticas que les permitan valorar esta contribución al bienestar humano.

El presente análisis con sensores remotos proporciona una descripción científica del desarrollo urbano norte de Bogotá que puede ayudar a construir una toma de decisiones basadas en evidencia empírica, más allá de percepciones asistemáticas propensas a sesgos.

El análisis con sensores remotos permite extraer dos conclusiones importantes. La primera es que las tendencias del espacio biofísico de los polígonos POZN y RTVH son prácticamente equivalentes. Esto tanto para los indicadores de temperatura de superficie como de intensidad de la vegetación. Esta es una conclusión sorprendente, si se considera que ambas áreas poseen un espíritu y una normativa completamente distinta, las que a la luz de la evidencia que presenta este trabajo han quedado subyugadas a las tendencias estructurales de desarrollo urbano experimentadas por el vector norte de Bogotá.

La segunda conclusión es que estas tendencias son de incremento para las temperaturas y de disminución de la intensidad de la vegetación. Esto significa que el proceso de urbanización instalado en el sector norte de Bogotá es el determinante de las tendencias del espacio biofísico observadas, más allá de las figuras de protección legales que allí existen, como es el caso de la RTVH, la que no ha sido efectiva en la protección de las características ecológicas que ameritan su existencia. Esto deja en evidencia que mecanismos actuales tales como la simple declaración de sitios como reservas naturales no es suficiente para controlar sus cambios biofísicos cuando estos se ven influenciados por las dinámicas del desarrollo urbano. Generar información empírica y espacialmente explícita que evidencie las tendencias efectivas del espacio biofísico es el primer paso hacia nuevas soluciones que se ajusten a los retos actuales del desarrollo urbano.

AGRADECIMIENTOS

PROBOGOTÁ REGIÓNw es el titular de los derechos de propiedad intelectual del proyecto de investigación que origina los resultados presentados en esta publicación.

REFERENCIAS

- Alberti, M. (2005). The effects of urban patterns on ecosystem function. *International Regional Science Review*, 28(2), 168–192. <https://doi.org/10.1177/0160017605275160>
- Anselin, L. (1995). Local Indicators of Spatial Association—LISA. *Geographical Analysis*, 27(2), 93–115. <https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1995.tb00338.x>
- Artmann, M., Inostroza, L. y Fan, P. (2019a). Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree? *Ecological Indicators*, 96, 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.059>
- Artmann, M., Inostroza, L. y Fan, P. (2019b). Urban sprawl, compact urban development and green cities. How much do we know, how much do we agree? *Ecological Indicators*, 96. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.10.059>
- Azunre, G. A., Amponsah, O., Peparah, C., Takyi, S. A. y Braimah, I. (2019). A review of the role of urban agriculture in the sustainable city discourse. *Cities*, 93, 104–119. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.006>
- Baró, F., Gómez-Baggethun, E. y Haase, D. (2017). Ecosystem service bundles along the urban-rural gradient: Insights for landscape planning and management. *Ecosystem Services*, 24, 147–159. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.02.021>
- Barrera, F. De, Henríquez, C., Coulombié, F., Dobbs, C. y Salazar, A. (2018). Periurbanization and conservation pressures over remnants of native vegetation : impact on ecosystem services for a Latin-American capital city. *Change and Adaptation in Socio-Ecological Systems*, 4(1), 21–32.
- 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.
- Clinton, N., y Gong, P. (2013). MODIS detected surface urban heat islands and sinks: Global locations

- and controls. *Remote Sensing of Environment*, 134, 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.03.008>
- Daunt, A. B. P., Inostroza, L. y Hersperger, A. M. (2021). The role of spatial planning in land change: An assessment of urban planning and nature conservation efficiency at the southeastern coast of Brazil. *Land Use Policy*, 111(xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105771>
- Deng, J. S., Wang, K., Hong, Y. y Qi, J. G. (2009). Spatio-temporal dynamics and evolution of land use change and landscape pattern in response to rapid urbanization. *Landscape and Urban Planning*, 92(3–4), 187–198. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2009.05.001>
- Gomez-Rodríguez, D., y Beltrán-Vargas, J. (2018). Modelación Dinámica de Bienes y Servicios Ecosistémicos. *Colombia Forestal*, 21(2), 188–204. revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/colfor/index
- Grimm, N. B., Faeth, S. H., Golubiewski, N. E., Redman, C. L., Wu, J., Bai, X. y Briggs, J. M. (2008). Global change and the ecology of cities. *Science*, 319(5864), 756–760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Huang, J., Lu, X. X. y Sellers, J. M. (2007). A global comparative analysis of urban form: Applying spatial metrics and remote sensing. *Landscape and Urban Planning*, 82(4), 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.010>
- Huang, K., Li, X., Liu, X. y Seto, K. C. (2019). Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. *Environmental Research Letters*, 14(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab4b71>
- Hurtado, L., Pulido, D. M., y Lizarazo, A. (2020). Análisis Multitemporal en la Cobertura del Suelo para la Reserva Forestal Thomas Van der Hammen - Bogotá. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 56, 71–86.
- Inostroza, L. (2017). Informal urban development in Latin American urban peripheries. Spatial assessment in Bogotá, Lima and Santiago de Chile. *Landscape and Urban Planning*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.03.021>
- Inostroza, L. (2022). Biodiversity and Region: A Unitary System. The Paradigm Shift in 21st Century Urban Development. En M. A. Mejía y J. D. Amaya-Espinel (Eds.), *BIODIVERSITIES BY 2030. Transforming Cities with Biodiversity*. Instituto de Investigaciones de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Inostroza, L., Baur, R. y Csaplovics, E. (2013). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A dynamic quantification and characterization of spatial patterns. *Journal of Environmental Management*, 115, 87–97.
- Inostroza, L., König, H. J., Pickard, B. y Zhen, L. (2017). Putting ecosystem services into practice: Trade-off assessment tools, indicators and decision support systems. *Ecosystem Services*, 26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2017.07.004>
- Jones, L., Reis, S., Hutchins, M., Miller, J., He, B., Xu, C., Hagen-zanker, A., Yu, J., Lin, T., Jia, H., Seifert-d, L., Loiselle, S., Russel, D., Sabel, C. E., Fletcher, D., Fitch, A. e Inostroza, L. (2022). Airsheds, watersheds and more – The flows that drive intra-extra-urban connections, and their implications for nature-based solutions (NBS). *Nature-Based Solutions*, 2(October). <https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2022.100040>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods*. Griffin.
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L., Falfán, I. y MacGregor-Fors, I. (2022). Too hot to handle? On the cooling capacity of urban green spaces in a Neotropical Mexican city. *Urban Forestry & Urban Greening*, 74, 127633. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2022.127633>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. y Zepp, H. (2020). The global homogenization of urban form. An assessment of 194 cities across time. *Landscape and Urban Planning*, 204. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2020.103949>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. y Zepp, H. (2022a). Does urban climate follow urban form? Analysing intraurban LST trajectories versus urban form trends in 3 cities with different background climates. *Science of the Total Environment*, 830. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154570>
- Lemoine-Rodríguez, R., Inostroza, L. y Zepp, H. (2022b). Intraurban heterogeneity of space-time land surface temperature trends in six climate-diverse cities. *Science of the Total Environment*, 804, 150037. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150037>
- Lemoine-Rodríguez, R., MacGregor-Fors, I. y Muñoz-Robles, C. (2019). Six decades of urban green change in a neotropical city: a case study of Xalapa, Veracruz, Mexico. *Urban Ecosystems*, 22(3), 609–618. <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00839-9>
- Lemoine-Rodríguez, R. y Mas, J.-F. (2020). *LSTtools: An R package to process thermal data derived from Landsat and MODIS images* (v0.0.2). <https://doi.org/10.5281/zenodo.4010732>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A. y Voogt, J. A. (2017). *Urban Climates*. Cambridge University press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Palme, M., Inostroza, L. y Salvati, A. (2018). Technomass and cooling demand in South America: A superlinear relationship? *Building Research and Information*, 46(8), 864–880. <https://doi.org/10.1080/09613218.2018.1483868>
- Peng, S., Piao, S., Ciaia, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F. M., Nan, H., Zhou, L. y Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global

- big cities. *Environmental Science and Technology*, 46(2), 696–703. <https://doi.org/10.1021/es2030438>
- R Core Team. (2020). *R: A language and environment for statistical computing* (3.6.1). R Foundation for Statistical Computing.
- Rozas-Vásquez, D., Fürst, C., Geneletti, D. y Muñoz, F. (2017). Multi-actor involvement for integrating ecosystem services in strategic environmental assessment of spatial plans. *Environmental Impact Assessment Review*, 62, 135–146. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2016.09.001>
- 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>
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389. <https://doi.org/10.2307/2285891>
- Seto, K. C., Solecki, W. D. y Griffith, C. A. (2016). *The Routledge Handbook of Urbanization and Global Environmental Change*. Routledge.
- United Nations. (2015). *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. UN.
- Wentz, E. A., York, A. M., Alberti, M., Conrow, L., Fischer, H., Inostroza, L., Jantz, C., Pickett, S. T. A., Seto, K. C. y Taubenböck, H. (2018). Six fundamental aspects for conceptualizing multidimensional urban form: A spatial mapping perspective. *Landscape and Urban Planning*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.07.007>
- Zepp, H., Falke, M., Gunther, F., Gruenhagen, L., Inostroza, L., Zhou, W., Huang, Q. y Dong, N. (2021). China's Ecosystem Services Planning: Will Shanghai Lead the Way? *Erkundung*, 75(4), 271–293.
- Zewdie, W., Csaplovics, E. y Inostroza, L. (2017). Monitoring ecosystem dynamics in northwestern Ethiopia using NDVI and climate variables to assess long term trends in dryland vegetation variability. *Applied Geography*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2016.12.019>
- Zhong, J., Jiao, L., Droin, A., Liu, J., Lian, X. y Taubenböck, H. (2022). Greener cities cost more green: Examining the impacts of different urban expansion patterns on NPP. *Building and Environment*, 100358. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109876>