


Análisis de la estructura del arbolado urbano en la Ciudad de México mediante aprendizaje profundo

Analysis of Urban Tree Structure in Mexico City Using Deep Learning

Juan Manuel Núñez^a

^aCentro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad (Centrus), Universidad Iberoamericana, , juan.nunez@ibero.mx

How to cite: Núñez, J.M. (2025). Estructura del arbolado urbano en la Ciudad de México mediante aprendizaje profundo. En libro de actas: *XVII Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo*. 19-20 de junio 2025, Valencia. <https://doi.org/10.4995/SIIU2025.2025.19946>

Abstract

This study presents a detailed mapping of urban tree vegetation in Mexico City using deep learning, estimating canopy height with a resolution of 1 meter. Data from the 2017-2020 period, downloaded from Meta's sustainability platform, were integrated with the local green space inventory in a GIS environment. Using the ArcGIS Pro segmentation algorithm, individual trees were delineated from local maxima in the height surface, generating key metrics such as average diameter and height. The analysis revealed spatial patterns of urban tree cover, showing high concentrations in Chapultepec, Aragón, and the Sierra de Santa Catarina, while the peripheral areas in the east exhibited low density and fragmentation of the tree cover. Significant inequalities in access to green spaces were identified, highlighting the need for ecological restoration strategies to address disparities in urban vegetation distribution. The methodology employed, based on advanced data and GIS, is replicable in other cities with similar challenges, providing tools for sustainable green space planning, climate change mitigation, and improvement of urban life quality.

Keywords: green spaces; urban ecosystem services; deep learning; environmental equity

Resumen

Este estudio presenta un mapeo detallado de la vegetación arbórea urbana en la Ciudad de México mediante aprendizaje profundo, estimando la altura del dosel forestal con una resolución de 1 metro. Se integraron datos del periodo 2017-2020, descargados de la plataforma de sostenibilidad de Meta, con el inventario local de áreas verdes en un entorno SIG. Utilizando el algoritmo de segmentación de ArcGIS Pro, se delimitaron árboles individuales a partir de máximos locales en la superficie de altura, generando métricas clave como diámetro y altura promedio. El análisis reveló patrones espaciales de cobertura arbórea urbana, mostrando concentraciones elevadas en Chapultepec, Aragón y la Sierra de Santa Catarina, mientras que las zonas periféricas del oriente presentan baja densidad y fragmentación del arbolado. Se identificaron desigualdades significativas en el acceso a espacios verdes, destacando la necesidad de estrategias de restauración ecológica para mitigar inequidades en la distribución de la vegetación urbana. La metodología utilizada, basada en datos avanzados y SIG, es replicable en otras ciudades con desafíos similares, ofreciendo herramientas para la planificación sostenible de áreas verdes, la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad de vida en entornos urbanos.

Palabras clave: áreas verdes; servicios ecosistémicos urbanos; aprendizaje profundo; equidad ambiental

Bloque temático: CIUDAD. Morfología urbana

1. Introducción

El mapeo de la cobertura arbórea en entornos urbanos ha cobrado relevancia en los últimos años debido a su papel fundamental en la planificación urbana, la gestión ambiental, la mitigación y adaptación del cambio climático. La vegetación urbana no solo mejora la calidad del aire y reduce el efecto de isla de calor, sino que también contribuye a la captura de carbono, la conservación de la biodiversidad y el bienestar de la población urbana (Neyns y Canters, 2022; Nowak et al., 2013; Escobedo et al., 2011). En este contexto, la Ciudad de México, una de las metrópolis más grandes y complejas del mundo, enfrenta importantes desafíos en la gestión de su infraestructura verde, lo que hace indispensable el uso de herramientas precisas y actualizadas para el monitoreo de su cobertura arbórea (Núñez, 2021).

Los avances recientes en tecnologías de percepción remota y aprendizaje profundo han permitido el desarrollo de métodos innovadores para el mapeo de la vegetación con una resolución sin precedentes (Pu, 2023; Matyukira y Mhangara, 2024). En particular, el trabajo de Tolan et al. (2024) ha demostrado la viabilidad de generar mapas de altura de dosel de muy alta resolución utilizando imágenes RGB y modelos de aprendizaje profundo auto-supervisados. Este enfoque, que combina datos de sensores ópticos y LiDAR aéreo, ha permitido la creación de mapas con una resolución espacial inferior a un metro, superando las limitaciones de los métodos tradicionales basados en datos de menor resolución, como los proporcionados por Sentinel-2 o GEDI (Lang et al., 2022; Potapov et al., 2021). Estos productos de alta resolución no solo permiten la identificación de árboles individuales, sino que también facilitan la cuantificación de métricas clave, como la altura promedio y el diámetro de copa, proporcionando una caracterización más detallada de la estructura de la vegetación arbórea urbana (Pu, 2023).

En entornos urbanos, los mapas de altura de dosel ofrecen diversas aplicaciones, como la evaluación de la estructura de la vegetación arbórea, la identificación de áreas con déficit de vegetación y la planificación de nuevos espacios verdes. Además, la altura del dosel es un indicador clave para estimar la biomasa y el carbono almacenado en los árboles urbanos, lo que resulta esencial para evaluar el impacto de la vegetación en la mitigación del cambio climático (Harris et al., 2021). Estos mapas pueden integrarse en herramientas de planificación urbana para diseñar estrategias que maximicen beneficios ambientales, como la reducción del efecto de isla de calor y la mejora de la calidad del aire (Brandt et al., 2020).

La posibilidad de contar con estos mapas en ciudades como la Ciudad de México representa una oportunidad clave para optimizar la gestión de la infraestructura verde. Por ejemplo, las autoridades pueden utilizar estos datos para identificar zonas con baja cobertura arbórea, planificar la reforestación y monitorear la salud de la vegetación existente (McPherson et al., 2016). Asimismo, esta información permite evaluar el impacto de la vegetación arbórea urbana en la mitigación del cambio climático, estimando el carbono almacenado y la capacidad de los árboles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (Nowak & Crane, 2002; Nowak y Greenfield, 2018). Más allá de su utilidad para la gestión gubernamental, estos mapas pueden contribuir a la conservación de la biodiversidad y fomentar la participación ciudadana en iniciativas ambientales (Jim & Chen, 2003; Tzoulas et al., 2007). También pueden servir como herramienta para investigadores y profesionales en ecología urbana, facilitando el estudio de la relación entre la vegetación y los servicios ecosistémicos, como la regulación del clima, la reducción de la temperatura y la contaminación, así como la mejora de la salud pública (Nowak et al., 2006; Ziter et al., 2019; Donovan et al., 2013).

En este estudio, se explora el potencial del aprendizaje profundo y la percepción remota de alta resolución para el mapeo detallado de la estructura de la vegetación arbórea en la Ciudad de México. Los resultados obtenidos no solo proporcionan una herramienta valiosa para la gestión de la infraestructura verde, sino que también abren nuevas líneas de investigación en ecología urbana y planificación sostenible. A continuación, se presentan los objetivos del trabajo y los métodos utilizados para la generación de los mapas, seguidos de un análisis detallado de los resultados y sus implicaciones para la gestión ambiental y urbana. La sección final ofrece las conclusiones del trabajo, así como los siguientes pasos.

2. Objetivos

Este estudio tiene como objetivo desarrollar una metodología para la segmentación de árboles urbanos a partir de datos de altura del dosel forestal generados con modelos de aprendizaje profundo (Tolan et al., 2024). La integración de estos datos en un entorno de sistemas de información geográfica (SIG) permitirá obtener información detallada sobre la distribución, densidad y estructura de la vegetación arbórea en la Ciudad de México. Para ello, se proponen los siguientes objetivos particulares:

- I. Desarrollar una metodología para la segmentación y mapeo detallado de la estructura de la vegetación arbórea urbana en la Ciudad de México mediante la aplicación de técnicas de segmentación de imágenes en un entorno SIG, utilizando como insumo los datos de altura del dosel forestal generados con modelos de aprendizaje profundo (Tolan, 2024).
- II. Identificar patrones espaciales de cobertura arbórea en la Ciudad de México, evaluando la densidad y fragmentación del arbolado urbano en distintas alcaldías. Este análisis permitirá determinar las zonas con alta concentración de vegetación y aquellas con déficit de infraestructura verde, proporcionando información clave para la planificación y conservación de los espacios naturales dentro del entorno urbano.
- III. Evaluar la equidad en el acceso a espacios verdes mediante el análisis de la distribución de la vegetación arbórea en relación con la densidad poblacional y las condiciones socioeconómicas de las distintas zonas de la ciudad. Este enfoque busca identificar desigualdades en la provisión de servicios ecosistémicos derivados de la vegetación urbana y proponer estrategias para mejorar la accesibilidad a áreas verdes en sectores con menor cobertura arbórea.

3. Materiales y métodos

3.1. Área de estudio y materiales

El área de estudio de este trabajo corresponde a la zona urbana de la actual Ciudad de México, antes conocida como el Distrito Federal. Con una extensión aproximada de 1 485 km² y una población superior a los 9 millones de habitantes (INEGI, 2020). Así, la Ciudad de México, una de las urbes más grandes y densamente pobladas del mundo, posee una estructura territorial compleja, dividida en dos grandes categorías de uso del suelo: suelo urbano y suelo de conservación. El primero abarca cerca del 59% del territorio, concentrando la mayor parte de la infraestructura, las viviendas y las actividades económicas. Por otro lado, el suelo de conservación representa el 41% restante y alberga ecosistemas estratégicos esenciales para la regulación ambiental y la provisión de servicios ecosistémicos.

Dentro del suelo urbano, las áreas verdes desempeñan un papel fundamental en la mitigación del cambio climático y la mejora de la calidad de vida (Maldonado-Bernabé et al., 2019; Núñez, 2021). No obstante, su distribución es desigual entre alcaldías, lo que genera disparidades en el acceso a estos espacios. En contraste, el suelo de conservación protege amplias zonas naturales, principalmente en el sur de la ciudad, donde se localizan extensos bosques esenciales para el equilibrio ecológico metropolitano (Núñez y Romero, 2016).

La adecuada gestión de esta infraestructura verde es clave para reducir los efectos del cambio climático, mejorar la calidad del aire y proporcionar servicios ecosistémicos a la población (Jim & Chen, 2003; Nowak et al., 2013).

3.2. Métodos empleados

Este estudio presenta un enfoque híbrido de inteligencia artificial y percepción remota que combina aprendizaje profundo para la generación de mapas de altura de dosel forestal de muy alta resolución y métodos de segmentación de imágenes para la delimitación de árboles individuales para la Ciudad de México, a partir de máximos locales en la superficie de altura. El proceso de generación se basó en dos enfoques principales: (1) la utilización de los mapas de altura de dosel generados por Tolan et al. (2024) y (2) la aplicación de un algoritmo de segmentación basado en máximos locales para la delimitación de árboles individuales. A continuación, se describen en detalle estos métodos.

3.2.1. Mapas de altura de dosel de muy alta resolución

El modelo empleado se basa en transformadores de visión (Vision Transformers, ViT) y aprendizaje auto-supervisado (Self-Supervised Learning, SSL), lo que permite extraer características de imágenes satelitales de Maxar con una resolución de 0.59 m. Estas características son interpretadas por un decodificador convolucional, es decir, una red neuronal especializada que transforma la información aprendida por el modelo en una imagen final que representa la altura del dosel. Este proceso da lugar a la generación de un Modelo de Altura del Dosel (Canopy Height Model, CHM), que permite identificar la estructura vertical de la vegetación urbana con gran precisión (Tolan et al., 2024; Oquab et al., 2023; Ranftl et al., 2021).

Los datos generados fueron validados utilizando información LiDAR aérea independiente y comparados con otros productos existentes, como los de Lang et al. (2022) y Potapov et al. (2021). Los resultados globales mostraron una alta precisión en la estimación de la altura del dosel, con un Error Absoluto Medio (MAE) de 2.8 m y un Error Medio (EM) de 0.6 m, adecuada para el monitoreo de la vegetación en ciudades, donde la altura de los árboles varía típicamente entre 5 y 20 metros. Sin embargo, se reporta una saturación en las predicciones para árboles de más de 30 metros, lo que podría afectar la precisión en ciertas zonas (Tolan et al., 2024). Adicionalmente, la resolución submétrica de los mapas (0.59 m) permite la identificación de árboles individuales, lo que resulta particularmente relevante en entornos urbanos, donde la vegetación suele estar dispersa e intercalada con infraestructura.

3.2.2. Algoritmo de segmentación basado en máximos locales

Una vez obtenido el Modelo de Altura del Dosel (MAD) de Tolan et al. (2024), se aplicó un algoritmo de segmentación basado en **máximos locales** (*Find Local Peaks or Valleys*) para la delimitación de árboles individuales. Este método, implementado en ArcGIS Pro, identifica los picos locales en el MAD, los cuales corresponden a las copas de los árboles, permitiendo la extracción de métricas estructurales clave como la altura promedio y el diámetro de copa.

La segmentación precisa de copas de árboles individuales es esencial para la gestión forestal y estudios ambientales. La aplicación de algoritmos basados en máximos locales ha demostrado ser efectiva en diversos estudios. Por ejemplo, Tiede et al. (2005) desarrollaron un algoritmo para identificar copas de árboles individuales utilizando datos LiDAR, logrando detectar árboles dominantes con una precisión del 72.2%. Además, Ke y Quackenbush (2011) compararon tres métodos de detección y delineación de copas de árboles a partir de imágenes de alta resolución, encontrando que el método de crecimiento de regiones proporcionó las mayores precisiones, con una exactitud del productor y del usuario alcanzando el 70%.

Es importante considerar que la eficacia del método "Find Local Peaks or Valleys" puede variar según la resolución de los datos y las características del área de estudio. En algunos casos, la combinación

con otros métodos, como el algoritmo "watershed" o la aplicación directa sobre nubes de puntos, puede mejorar los resultados. La elección del enfoque adecuado depende de factores como la densidad del bosque, la resolución de los datos y los objetivos específicos del estudio (Gu, Grybas, & Congalton, 2020).

Para la aplicación del método de segmentación, el Modelo de Altura del Dosel (MAD) de la Ciudad de México se dividió en teselas de 15 × 150 metros. Esta subdivisión permitió la ejecución individual del algoritmo *Find Local Peaks or Valleys* en cada sección, optimizando el procesamiento y análisis de los datos. La segmentación por teselas facilita la obtención de estadísticas específicas para diferentes patrones y densidades de vegetación arbórea urbana, permitiendo una evaluación más detallada de la estructura y distribución del arbolado en la ciudad. Además, esta estrategia reduce la carga computacional, mejorando la eficiencia en el procesamiento de grandes volúmenes de datos y evitando errores asociados a la segmentación en áreas extensas y heterogéneas.

4. Resultados

Se obtuvieron datos de altura del dosel para la Ciudad de México a través del conjunto de datos The Global Canopy Height Maps. Este producto proporciona información detallada sobre la presencia y altura del dosel a nivel mundial, con un 80% de los datos adquiridos entre 2018 y 2020, lo que garantiza una representación actualizada del estado de la vegetación en el área de estudio (HRCH de WRI, 2023). La descarga y procesamiento de estos datos se realizó mediante la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando los límites administrativos de la Ciudad de México como área de interés. La integración de este producto en un entorno SIG permitió la extracción de métricas clave relacionadas con la cobertura arbórea, facilitando su posterior segmentación e identificación individual de árboles urbanos. Se generaron un total de 67, 221 teselas de 150 × 150 m que cubren la totalidad del suelo urbano de la Ciudad de México. Cada una de ellas fueron analizadas individualmente para la segmentación del MAD mediante el algoritmo *Find Local Peaks or Valleys* disponible en ArcGISPro versión 3.2.2. Se obtuvieron un total de $4\,303\,735 \pm 800\,588$ copas de arbolado urbano para la Ciudad de México, con una altura promedio de 11.75 ± 2.6 m y un valor promedio de diámetro de copa de 8.8 ± 4.8 m. Esta variación en el número de copas, se originó por el hecho de segmentar el MAD en celdas de 150 × 150 m, lo que implica que algunos árboles pueden ubicarse en los bordes de las celdas, por lo que algunos árboles pueden quedar parcialmente dentro o fuera de la celda analizada, modificando el conteo final de copas detectadas. Si bien la opción de segmentar

La Figura 1 muestra la distribución espacial del arbolado urbano en la Ciudad de México, evidenciando un gradiente de cobertura que disminuye progresivamente del norponiente hacia el suroriente de la ciudad. Este patrón se superpone con la alta concentración de vegetación en los bosques urbanos de Chapultepec, Aragón y Tlalpan, así como en menor medida en las zonas elevadas de la Sierra de las Cruces, en poniente, hacia la Sierra de Santa Catarina, al suroriente de la ciudad. Así, las zonas más urbanizadas del oriente de la ciudad presentan una menor presencia de arbolado, lo que resalta la relación inversa entre la densidad de vegetación y el desarrollo urbano en la ciudad.

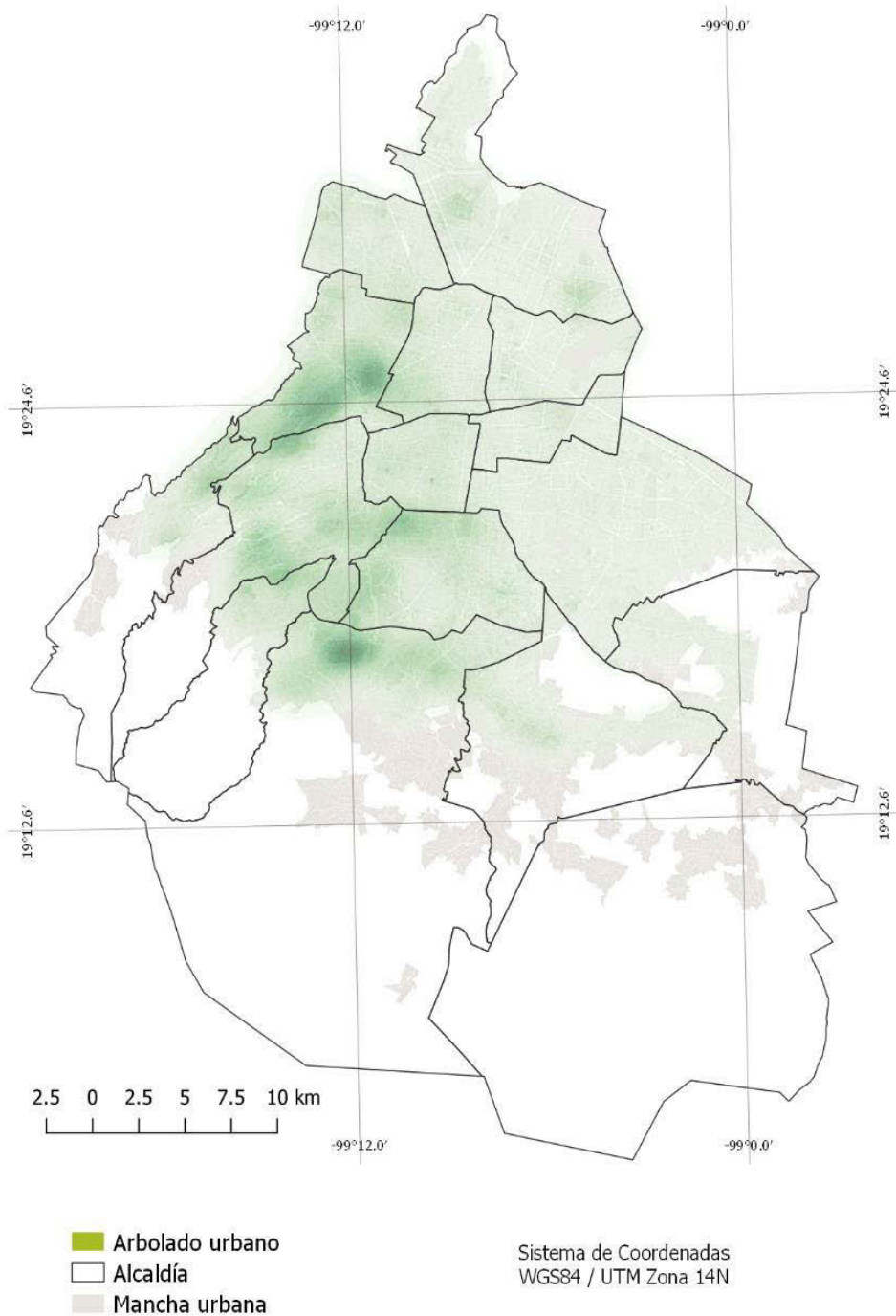


Fig. 1 Distribución espacial del arbolado urbano de la Ciudad de México. Fuente: Elaboración propia

En promedio, la Ciudad de México cuenta con 4.7 árboles por cada 10 habitantes en su suelo urbano. Sin embargo, este valor esconde desigualdades significativas en la distribución del arbolado entre alcaldías. Como se muestra en la Tabla 1, la disponibilidad de árboles varía considerablemente entre demarcaciones.

Tabla 1. Disponibilidad de arbolado urbano en la Ciudad de México por alcaldía.

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos de arbolado urbano y el Censo de Población y Vivienda para la Ciudad de México (INEGI, 2020). Milpa Alta presenta cero árboles urbanos, ya que la totalidad de la alcaldía se encuentra dentro de la categoría de Suelo de Conservación

Alcaldía	Población	Número de árboles	Árboles por cada 10 habitantes
Azcapotzalco	432,205	203,947	4.7
Coyoacán	614,447	508,083	8.3
Cuajimalpa de Morelos	217,686	159,812	7.3
Gustavo A. Madero	1,173,351	307,645	2.6
Iztacalco	404,695	103,188	2.5
Iztapalapa	1,835,486	285,751	1.6
La Magdalena Contreras	247,622	134,205	5.4
Milpa Alta	152,685	0*	0.0
Álvaro Obregón	759,137	679,476	9.0
Tláhuac	392,313	49,936	1.3
Tlalpan	699,928	540,430	7.7
Xochimilco	442,178	152,318	3.4
Benito Juárez	434,153	211,671	4.9
Cuauhtémoc	545,884	226,112	4.1
Miguel Hidalgo	414,470	623,446	15.0
Venustiano Carranza	443,704	117,715	2.7
Total	9,209,944	4,303,735	4.7

Por ejemplo, la alcaldía Miguel Hidalgo presenta la mayor disponibilidad con 15 árboles por cada 10 habitantes, lo que sugiere una mayor cobertura de infraestructura verde en su territorio. En el extremo opuesto, Iztapalapa, la alcaldía más poblada de la ciudad, cuenta con apenas 1.6 árboles por cada 10 habitantes, a pesar de tener cuatro veces más población que Miguel Hidalgo. Otras alcaldías con baja disponibilidad de arbolado urbano son Tláhuac (1.3 árboles/10 habitantes) e Iztacalco (2.5 árboles/10 habitantes). Este patrón refleja desigualdades en el acceso a áreas verdes dentro de la ciudad, lo que puede influir en la calidad ambiental y los servicios ecosistémicos que recibe cada población. Alcaldías con mayor cobertura arbórea, como Álvaro Obregón (9.0 árboles/10 habitantes) y Tlalpan (7.7 árboles/10 habitantes), presentan una disponibilidad de arbolado muy superior a la de zonas con menor infraestructura verde.

La disparidad en la distribución del arbolado resalta la importancia de estrategias de reforestación y planeación urbana equitativa, especialmente en zonas con baja cobertura arbórea, para mejorar el acceso a los beneficios ambientales y mitigar los efectos del cambio climático a nivel local.

5. Conclusiones

Los resultados muestran una distribución desigual del arbolado urbano en la Ciudad de México, con alta concentración en parques y áreas protegidas, mientras que las zonas urbanizadas tienen menor cobertura. Esta disparidad no solo limita el acceso equitativo a la infraestructura verde, sino que repercute directamente en la calidad ambiental y en la provisión de servicios ecosistémicos esenciales.

No obstante, la comprensión del arbolado urbano va más allá de su mera cobertura superficial. Su configuración responde a dinámicas históricas, sociales y urbanísticas que han generado patrones

contrastantes en la forma y funcionalidad del paisaje vegetal urbano. En este sentido, la estructura, densidad y localización del arbolado determinan su capacidad para influir en la regulación del microclima, particularmente en la mitigación del aumento de la temperatura superficial y el efecto de isla de calor urbano.

El uso de aprendizaje profundo y análisis espacial de alta resolución ha permitido caracterizar atributos del dosel arbóreo —como la altura, el volumen y la distribución— que no suelen ser considerados en los inventarios tradicionales. Esta aproximación ofrece una base más robusta y detallada para diagnosticar vacíos en la cobertura arbórea y para orientar acciones de planeación urbana fundamentadas en evidencia.

Ante este escenario, es necesario avanzar hacia una visión cualitativa del verde urbano, en la que los criterios térmicos, ecológicos y funcionales se incorporen de forma explícita en los procesos de evaluación y diseño. Las estrategias de restauración y reforestación deberán enfocarse prioritariamente en aquellas zonas con alta densidad poblacional y limitada presencia de vegetación estructurada, atendiendo tanto a los principios de equidad socioambiental como a los desafíos de adaptación climática que enfrenta la ciudad.

Bibliografía

- Brandt, M., Tucker, C. J., Kariryaa, A., Rasmussen, K., Abel, C., Small, J., ... & Fensholt, R. (2020). An unexpectedly large count of trees in the West African Sahara and Sahel. *Nature*, 587(7832), 78-82.
- Donovan, G. H., Butry, D. T., Michael, Y. L., Prestemon, J. P., Liebhold, A. M., Gatzliolis, D., & Mao, M. Y. (2013). The relationship between trees and human health: evidence from the spread of the emerald ash borer. *American journal of preventive medicine*, 44(2), 139-145.
- Dubayah, R., Blair, J. B., Goetz, S., Fatoyinbo, L., Hansen, M., Healey, S., ... & Tang, H. (2020). The Global Ecosystem Dynamics Investigation: High-resolution laser ranging of the Earth's forests and topography. *Science of Remote Sensing*, 1, 100002.
- Escobedo, F. J., Kroeger, T., & Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159(8-9), 2078-2087. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.01.010>
- Harris, N. L., Gibbs, D. A., Baccini, A., Birdsey, R. A., De Bruin, S., Farina, M., ... & Tyukavina, A. (2021). Global maps of twenty-first century forest carbon fluxes. *Nature Climate Change*, 11(3), 234-240.
- High Resolution Canopy Height Maps de WRI y Meta se consultó el 17 de enero de 2025 desde Google Earth Engine. Meta y World Resources Institute
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *Panorama sociodemográfico de Ciudad de México: Censo de Población y Vivienda 2020*. INEGI.
- Jim, C. Y., & Chen, W. Y. (2003). Comprehensive greenspace planning based on landscape ecology principles in compact Nanjing city, China. *Landscape and Urban Planning*, 65(3), 95-116. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(02\)00244-X](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(02)00244-X)
- Lang, N., Jetz, W., Schindler, K., & Wegner, J. D. (2022). A high-resolution canopy height model of the Earth. arXiv preprint arXiv:2204.08322.
- Mcperson, E. G., Van Doorn, N. S., & Peper, P. J. (2016). Urban tree database and allometric equations. *General Technical Report PSW-GTR-253*. USDA Forest Service.
- Maldonado-Bernabé, G.; Chacalo-Hilu, A.; Nava, I.; Meza, R. M. & Zaragoza, A. Y. (2019), "Cambios en la superficie de áreas verdes de la Ciudad de México entre 1990-2015", *Polibotánica*, (48), Ciudad de México, Instituto Politécnico Nacional, pp. 205-230, doi.org/10.18387/polibotanica.48.15
- Matyukira, C., & Mhangara, P. (2024). Advances in vegetation mapping through remote sensing and machine learning techniques: a scientometric review. *European Journal of Remote Sensing*, 57(1), 2422330.

- Neyns, R., & Canters, F. (2022). Mapping of urban vegetation with high-resolution remote sensing: A review. *Remote sensing*, 14(4), 1031.
- Nowak, D. J., & Crane, D. E. (2002). Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental Pollution*, 116(3), 381-389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). "Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States." *Urban Forestry & Urban Greening*, 4(3-4), 115-123. https://www.fs.usda.gov/nrs/pubs/jrnl/2006/ne_2006_nowak_002.pdf
- Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2013). Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*, 193, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2014.05.028>
- Nowak, D. J., & Greenfield, E. J. (2018). Declining urban and community tree cover in the United States. *Urban forestry & urban greening*, 32, 32-55.
- Núñez, J. M. (2021). Análisis espacial de las áreas verdes urbanas de la Ciudad de México. *Economía, sociedad y territorio*, 21(67), 803-833.
- Núñez, J. M., & Romero, M. M. (2016). Imperativos para una trayectoria de sustentabilidad: áreas arboladas y planeación territorial. En A. Mohar-Ponce (Coord.), *Tendencias territoriales determinantes del futuro de la Ciudad de México* (pp. 311-339). Consejo Económico y Social de la Ciudad de México.
- Oquab, M., Darcet, T., Moutakanni, T., Vo, H., Szafraniec, M., Khalidov, V., ... & Bojanowski, P. (2023). DINOv2: Learning robust visual features without supervision. arXiv preprint arXiv:2304.07193.
- Potapov, P., Li, X., Hernandez-Serna, A., Tyukavina, A., Hansen, M. C., Kommareddy, A., ... & Hofton, M. (2021). Mapping global forest canopy height through integration of GEDI and Landsat data. *Remote Sensing of Environment*, 253, 112165.
- PU, R. (2021). Mapping tree species using advanced remote sensing technologies: a state-of-the-art review and perspective. *Journal of remote sensing*.
- Ranftl, R., Bochkovskiy, A., & Koltun, V. (2021). Vision transformers for dense prediction. In *International Conference on Computer Vision*.
- Tolan, J., Yang, H. I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H. V., Brandt, J., ... & Couprie, C. (2024). Very high resolution canopy height maps from RGB imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 300, 113888.
- Tzoulas, K., Korpela, K., Venn, S., Yli-Pelkonen, V., Kaźmierczak, A., Niemela, J., & James, P. (2007). Promoting ecosystem and human health in urban areas using Green Infrastructure: A literature review. *Landscape and Urban Planning*, 81(3), 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.02.001>
- Ziter, C. D., Pedersen, E. J., Kucharik, C. J., & Turner, M. G. (2019). Scale-dependent interactions between tree canopy cover and impervious surfaces reduce daytime urban heat during summer. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7575-7580.