

La huella social del carbono urbano: suelo, vegetación y desigualdad en la Ciudad de México

Rogelio O. Corona-Núñez^{1, 2 *} e Isela Jasso-Flores¹

¹ Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

² Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Cuajimalpa

* Dirección para correspondencia: r.o.corona_nunez@ciencias.unam.mx

Durante mucho tiempo se pensó que la naturaleza terminaba donde comenzaba la ciudad, los ecosistemas se asociaban con bosques, selvas o áreas naturales protegidas, y las ciudades con espacios construidos para satisfacer necesidades humanas. Hoy sabemos que esa separación es artificial. Las ciudades son sistemas socioecológicos cuyo crecimiento transforma sus procesos ecológicos (Pataki *et al.*, 2011). Entre ellos, el almacenamiento de carbono permite observar la relación entre urbanización, vegetación y suelo (Pataki *et al.*, 2011; Velasco *et al.*, 2016).

El carbono urbano comprende el carbono almacenado en los componentes de los ecosistemas de las ciudades, incluida la vegetación y el suelo. Un almacén de carbono es un componente del ecosistema que retiene carbono durante un periodo determinado. La vegetación constituye uno de estos almacenes, ya que incorpora carbono atmosférico mediante la fotosíntesis y lo almacena en su biomasa (Velasco *et al.*, 2016). El suelo representa otro almacén, en el que el carbono orgánico puede estabilizarse y permanecer durante largos periodos (Canedoli *et al.*, 2020). Aunque ambos almacenes forman parte del mismo sistema, la urbanización

puede afectarlos de manera diferente. Construir una ciudad implica más que sustituir vegetación por edificios y vialidades. La impermeabilización del suelo también puede reducir el carbono almacenado bajo la superficie (Cotler *et al.*, 2024). El carbono almacenado en los suelos urbanos puede variar entre distintos usos del suelo, reflejando parte de la heterogeneidad producida por la transformación urbana (Canedoli *et al.*, 2020). Considerar ambos almacenes permite interpretar estas diferencias como parte de la huella ecológica de la urbanización (Figura 1).



Figura 1. La ciudad como sistema socioecológico. Interacciones entre vegetación, suelo, agua y atmósfera mediante procesos hidrológicos, intercambio de gases, actividad biológica y ciclo de nutrientes.

Lo que revela el carbono de la Ciudad de México

Las ciudades suelen analizarse desde sus dimensiones sociales, económicas o políticas: dónde vive la población, cómo crece la mancha urbana, cuáles son sus niveles de ingreso y cómo se distribuyen la infraestructura y los servicios públicos. Estos procesos también tienen una dimensión ecológica: las distintas formas de ocupación y transformación del territorio se relacionan con diferencias en la vegetación, las características de los suelos urbanos y sus procesos ecológicos esenciales (Pataki *et al.*, 2011; Cotler *et al.*, 2024).

Estas diferencias constituyen una expresión de la desigualdad urbana. Las disparidades entre barrios no se limitan a la vivienda, la infraestructura o las condiciones socioeconómicas, sino que también se manifiestan en la distribución de la vegetación (Ayala-Azcárraga *et al.*, 2023) y en las características y funciones ecológicas de los suelos urbanos (Cotler *et al.*, 2024). Esta distribución desigual resulta relevante para el análisis de la justicia ambiental, aunque no constituye por sí misma una medida de justicia o injusticia. Su evaluación requiere considerar también cómo se distribuyen los beneficios y riesgos ambientales, así como las formas de reconocimiento y participación de las poblaciones involucradas.

El carbono almacenado en la vegetación y el suelo permite cuantificar una parte de la dimensión ecológica del territorio y reconocer diferencias en su distribución espacial. Considerar ambos almacenes permite analizar cómo su distribución se relaciona con la densidad poblacional, la posición en el gradiente

urbano y las condiciones socioeconómicas (Jasso-Flores *et al.*, 2026). Las diferencias en la cantidad de carbono almacenado reflejan características ecológicas del territorio, pero su interpretación social requiere considerar otros aspectos, como el acceso de la población a la vegetación y a los beneficios ambientales asociados. Este enfoque permite reconocer no solo cuánto carbono se almacena, sino también dónde se concentra y cómo varía espacialmente, así como la manera en que estos patrones se relacionan con la ocupación y transformación del territorio. Los resultados provienen de investigaciones propias realizadas en el territorio de la Ciudad de México como entidad político-administrativa, integrado por sus 16 alcaldías (Jasso-Flores *et al.*, 2025, 2026). Este territorio incluye áreas urbanizadas, rurales y forestales, así como áreas pertenecientes al suelo de conservación, categoría territorial establecida para la protección de ecosistemas y sus funciones ambientales. Los análisis se realizaron a distintas escalas y sus fuentes y procedimientos se detallan en Jasso-Flores y colaboradores (2025 y 2026). El contenido de carbono de la vegetación aérea se estimó a partir de la altura y el diámetro de los árboles registrados en muestreos forestales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). Estas estimaciones se combinaron con imágenes satelitales Landsat e información climática de WorldClim y topográfica para modelar espacialmente su distribución. Para el suelo se utilizó información del carbono almacenado en los primeros 30 cm, complementada mediante modelación con datos de vegetación, clima y topografía para representar áreas naturales, rurales,

periurbanas y urbanas. Ambos almacenes se expresaron en MgC ha^{-1} (megagramos de carbono por hectárea; 1 Mg = 1 tonelada métrica).

A escala de alcaldía, las estimaciones se relacionaron con datos del INEGI y el CONAPO sobre densidad poblacional, PIB per cápita, Índice de Desarrollo Social e Índice de Marginación, así como con características de la forma y estructura urbana. La centralidad se definió a partir de la distancia promedio de cada alcaldía al Zócalo, utilizada como indicador de un gradiente centro-periferia dentro de la Ciudad de México. En este análisis, el término periferia se refiere a las alcaldías y sectores más alejados del Zócalo. A escala local, se utilizó una tipología oficial de usos habitacionales que distingue entre zonas rurales y periurbanas y, dentro de las zonas urbanas, entre niveles socioeconómicos bajo-medio y medio-alto-alto, de acuerdo con el tamaño y la plusvalía de los predios y la superficie construida (Jasso-Flores *et al.*, 2026). Las relaciones encontradas corresponden a asociaciones estadísticas y, aunque algunas fueron estadísticamente significativas, no implican por sí mismas una relación causal directa. En la Ciudad de México coexisten zonas densamente pobladas y altamente urbanizadas con áreas rurales, forestales y de conservación (Vela Correa *et al.*, 2012; Jasso-Flores *et al.*, 2025). Esta heterogeneidad revela tres patrones principales: el carbono varía con la densidad poblacional, la distancia al centro de la ciudad y las condiciones socioeconómicas, mostrando distintas dimensiones de la relación entre la forma urbana y el funcionamiento ecológico (Figura 2).

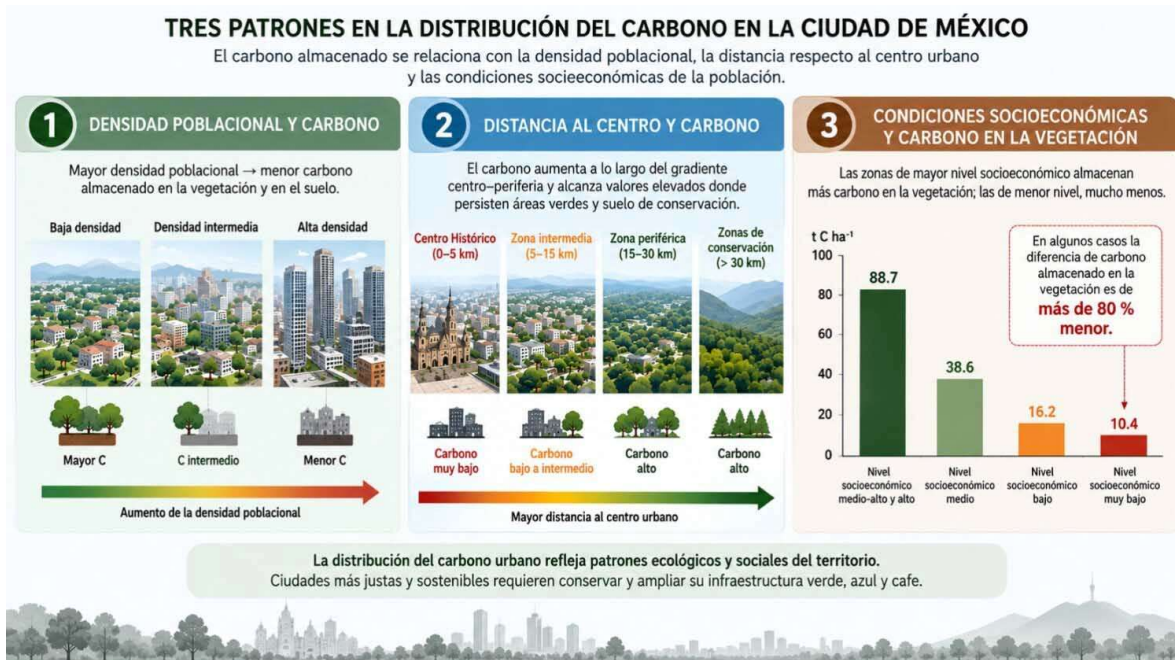


Figura 2. Patrones de distribución del carbono en la Ciudad de México. El carbono se relaciona negativamente con la densidad poblacional; el de la vegetación aumenta hacia la periferia y es mayor en zonas de nivel socioeconómico medio-alto y alto. Estas asociaciones no implican causalidad directa.

El primer patrón corresponde a la densidad poblacional: observamos una relación negativa y estadísticamente significativa entre la densidad de población y el carbono almacenado en la vegetación y el suelo. Estas zonas también presentan, en términos generales, una ocupación más intensa del territorio, mayor presencia de infraestructura y menor disponibilidad de superficies con vegetación y suelo no sellado (Figura 2).

El segundo patrón corresponde a la centralidad. El carbono almacenado en la vegetación presenta sus valores más bajos cerca del Centro Histórico y aumenta hacia sectores más alejados, con los valores más altos entre 15 y 30 kilómetros del

Zócalo. En cambio, el carbono almacenado en el suelo muestra variaciones mucho menores a lo largo de este gradiente. Este patrón coincide espacialmente con una mayor presencia de vegetación y de suelo de conservación hacia la periferia, así como con el proceso histórico de expansión de la ciudad (Jasso-Flores *et al.*, 2025) (Figura 2). El tercer patrón corresponde a las condiciones socioeconómicas. Las zonas habitacionales de nivel medio-alto y alto presentan los mayores almacenes de carbono en la vegetación, mientras las de nivel bajo y medio registran los menores. Este patrón coincide con desigualdades previamente documentadas en la distribución de áreas verdes (Ayala-Azcarraga *et al.*, 2023), mientras nuestros resultados muestran que estas diferencias también se expresan en el carbono almacenado en la vegetación (Jasso-Flores *et al.*, 2026) (Figura 2).

Estos patrones representan tendencias generales, pero no explican por completo la heterogeneidad urbana. Milpa Alta muestra que la relación entre urbanización y almacenamiento de carbono no es necesariamente lineal. Aunque es una alcaldía periférica, de baja densidad poblacional y con todo su territorio clasificado como suelo de conservación, su almacén promedio de carbono total, que incluye el carbono de la vegetación y del suelo, es de $60.5 \text{ Mg C ha}^{-1}$, similar al registrado en alcaldías sin suelo de conservación, como Cuauhtémoc, Benito Juárez e Iztacalco, cuyo promedio es de $58.4 \text{ Mg C ha}^{-1}$. Esta comparación sugiere que la clasificación del suelo, por sí sola, no basta para explicar la cantidad de carbono almacenado en un territorio, ya que en el suelo de conservación coexisten áreas forestales, agrícolas, pastizales y otros usos. También intervienen la cobertura

vegetal, los usos del suelo y la historia de transformación del paisaje. Así, territorios con grados de urbanización muy distintos pueden presentar cantidades similares de carbono almacenado (Jasso-Flores *et al.*, 2026).

El carbono que no vemos

Cuando pensamos en el carbono almacenado en una ciudad, solemos pensar en los árboles. Sin embargo, al cuantificar el carbono de la vegetación y del suelo en la Ciudad de México encontramos una diferencia notable. En promedio, el carbono almacenado en los primeros 30 cm del suelo supera en más de veinte veces al almacenado en la vegetación aérea. Una parte sustancial del carbono urbano se encuentra, por tanto, bajo nuestros pies.

¿Cómo llega tanto carbono al suelo? Las plantas capturan CO₂ mediante la fotosíntesis y parte del carbono incorporado a sus tejidos llega al suelo a través de hojas, ramas y raíces muertas. Allí, la materia orgánica es transformada por los organismos del suelo; una fracción regresa a la atmósfera como CO₂ y otra permanece almacenada durante años o décadas, dependiendo de las características del suelo y las condiciones ambientales (Pataki *et al.*, 2011; Canedoli *et al.*, 2020).

Este almacén no es inalterable. El sellado y la remoción del suelo, así como prácticas que reducen los aportes de materia orgánica, pueden disminuir su almacenamiento de carbono (Canedoli *et al.*, 2020; Cotler *et al.*, 2024) (Figura 3).

Es por eso que comprender la distribución del carbono urbano requiere considerar tanto el carbono almacenado en la vegetación como el almacenado en el suelo.



Figura 3. Carbono de la vegetación y del suelo en paisajes urbanos. Ambos almacenes responden de manera distinta a la urbanización. La vegetación refleja la cobertura actual, mientras el suelo integra procesos acumulados y transformaciones del territorio.

Vegetación y suelo no almacenan carbono en la misma proporción en toda la ciudad. Zonas con abundante arbolado pueden presentar poco carbono en el suelo y sitios con menor cobertura vegetal conservar cantidades importantes bajo la superficie. Por ello, la vegetación visible no permite inferir directamente el carbono del suelo (Canedoli *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2024; Jasso-Flores *et al.*, 2026). Incrementar el arbolado aporta múltiples beneficios, pero no sustituye la conservación del suelo. En la Ciudad de México, ignorarlo significa excluir el principal almacén de carbono del territorio analizado (Figura 3).

Planificar más allá de lo verde

Paradójicamente, el principal almacén de carbono analizado es también uno de los componentes menos considerados en la planificación urbana. El suelo suele tratarse como la superficie sobre la que crece la ciudad, no como parte de su funcionamiento ecológico (Cotler *et al.*, 2024). Esta omisión es consistente con procesos históricos de urbanización documentados en la Ciudad de México, donde la expansión urbana priorizó vivienda, vialidades y servicios públicos (Corona-Núñez *et al.*, 2026), mientras que los componentes ecológicos tuvieron una consideración limitada en la planificación, quedando relegados a parques, reservas o espacios considerados "vacíos" (Jasso-Flores *et al.*, 2025). Las estrategias frente al cambio climático han privilegiado la infraestructura verde, aunque el funcionamiento urbano también depende del agua y del suelo. Proponemos integrar estos componentes mediante tres infraestructuras ecológicas complementarias: verde, azul y café (Figura 4).

La infraestructura verde corresponde a árboles, jardines, parques y otros espacios vegetados que capturan carbono, regulan la temperatura, proporcionan hábitat y mantienen la biodiversidad (Pataki *et al.*, 2011; Velasco *et al.*, 2016; Corona-Núñez *et al.*, 2026). Estas funciones dependen del agua y de suelos capaces de sostener la vegetación, almacenar nutrientes y mantener procesos biológicos (Cotler *et al.*, 2024).



Figura 4. Infraestructuras ecológicas verde, azul y café. Vegetación, agua y suelo constituyen infraestructuras complementarias cuya integración incorpora procesos ecológicos e hidrológicos a la planificación urbana.

La infraestructura azul integra el agua al funcionamiento de la ciudad. En lugar de tratar la lluvia como un volumen que debe desalojarse, favorece su infiltración y reduce la escorrentía, contribuyendo a recuperar parte de la dinámica hidrológica limitada por la impermeabilización del territorio (Pataki *et al.*, 2011; Cotler *et al.*, 2024).

Proponemos el concepto de infraestructura café como la red de espacios y sistemas de suelo que se conservan, recuperan o diseñan deliberadamente para mantener sus funciones dentro de la ciudad. Incluye suelos no sellados y áreas permeables, suelos de parques, jardines, áreas agrícolas y de conservación, así como intervenciones como la despavimentación, los pavimentos permeables, la

restauración, la biorremediación y el uso de suelos estructurales bajo superficies urbanas. A diferencia del suelo urbano, que comprende los suelos presentes en el territorio urbanizado, la infraestructura café supone incorporar deliberadamente estos espacios y sus funciones a la planificación y la gestión urbana.

Su planificación considera las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, así como su condición, localización y aptitud, para determinar qué espacios deben conservarse o recuperarse, qué intervenciones son pertinentes y qué usos resultan compatibles. Aunque la impermeabilización, la compactación y la remoción pueden alterar sus propiedades y procesos, los suelos urbanos pueden conservar o recuperar funciones como el almacenamiento de carbono, la infiltración y regulación del agua, el soporte de la vegetación y la dinámica de nutrientes (Cotler *et al.*, 2024). La infraestructura café propone así pasar de considerar el suelo únicamente como una superficie disponible para la urbanización a incorporarlo en la planificación como un componente de la infraestructura urbana que contribuye al funcionamiento de la ciudad y al bienestar de sus habitantes, en articulación con las infraestructuras verde y azul (Figura 4). Buena parte del conocimiento sobre el funcionamiento ecológico urbano proviene de ciudades de Norteamérica, Europa y Australia, mientras América Latina permanece comparativamente poco estudiada. Esta brecha resulta especialmente relevante en una región donde la expansión urbana avanza rápidamente y transforma territorios caracterizados por fuertes desigualdades socioeconómicas y por la coexistencia de áreas densamente construidas con espacios agrícolas, forestales y de conservación (Jasso-Flores *et*

al., 2025; Corona-Núñez *et al.*, 2026). El crecimiento de las ciudades puede avanzar así más rápido que nuestra capacidad para comprender sus efectos sobre los procesos ecológicos. La Ciudad de México muestra la necesidad de cerrar esta brecha y generar conocimiento sobre cómo las distintas formas de ocupación dejan huellas medibles en la vegetación, el suelo y el carbono.

Reflexión final: ciudades verdes, azules y cafés

La transformación del territorio urbano responde a procesos sociales, económicos y de planificación que modifican la vegetación, el agua y el suelo y, con ello, los procesos ecológicos que sostienen el funcionamiento de la ciudad. Estos cambios tienen consecuencias para la sociedad al alterar las condiciones ambientales en las que viven sus habitantes. El carbono urbano permite observar parte de esta transformación al mostrar cómo las formas de ocupación dejan una huella sobre y bajo la superficie.

No solo importa qué componentes ecológicos conserva una ciudad, sino dónde se conservan, quiénes se benefician de ellos, quiénes enfrentan los costos de su transformación y quiénes participan en las decisiones sobre el territorio. Incorporar estas preguntas permite vincular la conservación del suelo, la vegetación y el agua con las condiciones ambientales que experimentan cotidianamente sus habitantes.

Reconocer que la vegetación, el agua y el suelo forman parte de un mismo sistema permite ampliar la planificación más allá de lo verde e integrar las infraestructuras verde, azul y café. El futuro urbano no depende solo de lo que construimos sobre el territorio, sino también de lo que decidimos conservar sobre, a través y debajo de él.

Referencias

Ayala-Azcarraga C, Diaz D, Fernandez T *et al.* (2023). Uneven Distribution of Urban Green Spaces in Relation to Marginalization in Mexico City. *Sustainability* 15(16):12652. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151612652>.

Canedoli C, Ferrè C, El Khair DA *et al.* (2020). Soil organic carbon stock in different urban land uses: high stock evidence in urban parks. *Urban Ecosystems* 23(1):159-171. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11252-019-00901-6>.

Corona-Núñez RO, Jasso-Flores I, Ramas Arauz FE *et al.* (2026). Urban structural and infrastructural inequalities shape fine-scale carbon footprints of diet, housing, and transportation: Evidence from the Metropolitan Area of Mexico City. *Sustainable Cities and Society* (120):107933. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2026.107933>

Cotler H, Cram S, Prado B *et al.* (2024). Soil Ecosystem Services in Urban Parks as a Basis for Better Urban Planning: The Case of Mexico City. *Spanish Journal of Soil Science* 14:13398. DOI: <https://doi.org/10.3389/sjss.2024.13398>.

Guo H, Du E, Terrer C *et al.* (2024). Global distribution of surface soil organic carbon in urban greenspaces. *Nature Communications* 15:806. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44887-y>.

Jasso-Flores RI, Carmona D, González S and Corona-Núñez RO (2026). Carbon and nitrogen content in Mexico City: evidence of the influence of urban social structure. *ESTOA. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism* 15(30):1-14. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v015.n030.a05>.

Jasso-Flores RI, Escobar-Chanona L and Corona-Núñez RO (2025). The colonial and the porfiriato urbanization: inheritance of urban (un)sustainability in Mexico City. *ESTOA. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism* 14(27):83-96. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v014.n027.a05>.

Pataki DE, Carreiro MM, Cherrier J *et al.* (2011). Coupling biogeochemical cycles in urban environments: ecosystem services, green solutions, and misconceptions. *Frontiers in Ecology and the Environment* 9(1):27-36. DOI: <https://doi.org/10.1890/090220>.

Vela Correa G, López Blanco J y Rodríguez Gamiño ML (2012). Niveles de carbono orgánico total en el Suelo de Conservación del Distrito Federal, centro de México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 77:18–30

Velasco E, Roth M, Norford L and Molina LT (2016). Does urban vegetation enhance carbon sequestration? *Landscape and Urban Planning* 148:99–107. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.12.003>.

Manuscrito aceptado