

Árboles en áreas urbanas como indicadores de contaminación atmosférica^φ

Diana Laura Tejada-Luna¹, Laura Sánchez-Castillo^{2‡}, Edmar Meléndez-Jaramillo²

Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales desafíos ambientales, y de salud pública, en el mundo ya que contribuye con cerca de 5.2 millones de muertes anualmente (Huang *et al.* 2024). El incremento en la dimensión de las ciudades, la cantidad de vehículos, las emisiones industriales, y otras actividades humanas, liberan grandes cantidades de partículas y compuestos químicos que deterioran la calidad del aire (Querol 2008; Wallington *et al.* 2022; Wen *et al.* 2024). Si bien esta contaminación puede pasar inadvertida al ojo humano, sus efectos son visibles y tangibles porque afectan la salud de millones de personas diariamente, alteran el funcionamiento de los ecosistemas y causan un deterioro rápido de la calidad de vida de los habitantes de zonas urbanas (Ma *et al.* 2021; Da silva *et al.* 2023; Saxena 2025).

Todos los días, millones de personas transitan por calles, parques, avenidas y espacios comunes rodeados por árboles, y éstos decoran hogares y hacen más frescos los espacios como un refugio en épocas de calor extremo. La gente utiliza la sombra de los árboles para descansar y algunos de ellos forman parte de nuestros recuerdos de vida. Sin embargo, ignoramos que los árboles llevan a cabo una función mucho más importante y compleja en nuestras vidas. Mientras estamos ocupados esperando en el tráfico de las ciudades con nuestras actividades diarias, los árboles interactúan activa y constantemente con el aire y capturan y absorben

^φ1División de estudios de posgrado. Facultad de Ingeniería y Ciencias. Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario, C.P. 87120 Ciudad Victoria, Tamaulipas, México; ² Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Autónoma de Tamaulipas, Centro Universitario, C.P. 87120 Ciudad Victoria, Tamaulipas, México; [‡] Autor correspondiente: laura.sanchez@uat.edu.mx
DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.7187>



partículas y gases contaminantes y a su vez registra la huella de la contaminación atmosférica de la ciudad (Grylls y van Reeuwijk 2022; Mandal *et al.* 2023). El objetivo de este artículo es explorar cómo los árboles en zonas urbanas registran la contaminación atmosférica, cómo pueden aportar información valiosa para la ciencia y por qué conservar la diversidad de árboles en la ciudad debe ser una prioridad para asegurar el bienestar de áreas urbanas presentes y futuras.

Mucho más que sombra: servicios ambientales de los árboles en la ciudad

Cuando nos referimos a los árboles urbanos, se considera un espacio agradable para pasar la tarde y caminar, un espacio fresco para descansar en un día caluroso, y en algunas estaciones del año un espectáculo digno de una fotografía familiar. Sin embargo, la importancia de cada especie de árbol en zonas urbanas va mucho más allá que proporcionar sombra o embellecer espacios. Los árboles son organismos complejos que desempeñan funciones esenciales para la vida, lo cual los posiciona como una pieza clave para la sostenibilidad de los espacios urbanos (Grote *et al.* 2016).

El conocimiento popular de los beneficios de los árboles en zonas urbanas se centra en uno solo: la captación de dióxido de carbono (CO₂) por fotosíntesis y la liberación del oxígeno, y de esta manera contribuir a la mitigación del cambio climático y mejorar la calidad del aire de ciudades. Sin embargo, sus copas y follaje también poseen una función reguladora al interceptar la radiación solar y reducir la temperatura, ayudando a disminuir la isla de calor urbana, un fenómeno que es cada vez más frecuente en ciudades con muchos habitantes debido a la abundancia de estructuras y calles de concreto y asfalto (Wong *et al.* 2021; Yin *et al.* 2024; Lin y Li 2025).

Los árboles funcionan como barreras activas naturales frente al ruido y viento (Fletcher *et al.* 2022). Además, interceptan el agua de lluvia y ayudan a reducir el riesgo de erosión del suelo con sus raíces (Berland *et al.* 2017; Sánchez-Castillo *et al.* 2025). Sus flores, frutos y troncos proporcionan refugio y alimento para aves, insectos polinizadores, y otros organismos, que a su vez tienen una función en los ecosistemas, lo que perpetúa la conservación de la biodiversidad en ambientes urbanos (Basile *et al.* 2025). Los árboles ofrecen un servicio ecosistémico poco conocido, pero de suma importancia para las grandes ciudades.

Los árboles pueden fungir como indicadores ambientales, esto es como dispositivos de monitoreo ambiental al registrar datos de calidad de la atmósfera (Islam *et al.* 2026). Los árboles permanecen durante décadas en un mismo lugar y se encuentran expuestos de forma continua a las condiciones ambientales que los rodean (Cindoruk *et al.* 2020). Su exposición constante les permite integrar los efectos de la contaminación a lo largo del tiempo y los convierten en una especie de “memoria viva” del ambiente urbano (Polyakova *et al.* 2022).

“El conocimiento popular de los beneficios de los árboles en zonas urbanas se centra en uno sólo: la captación de dióxido de carbono (CO₂) por fotosíntesis y la liberación del oxígeno, y de esta manera contribuir a la mitigación del cambio climático y mejorar la calidad del aire de ciudades.”

Los árboles: archivos vivos de la calidad del aire

Un bioindicador es un organismo, planta o animal, cuya presencia o ausencia y estado físico puede señalar alguna condición del entorno. Por tanto, un bioindicador de la contaminación atmosférica es aquel organismo que registra información sobre los riesgos para ecosistemas y humanos (Anze *et al.* 2007). Las hojas de los árboles tienen una función importante en captar la luz del sol para la fotosíntesis. Sin embargo, cada hoja actúa como un enlace entre el árbol y la atmósfera por el intercambio continuo de gases, agua y partículas, registrando en este proceso la presencia de contaminantes en el aire (Lee *et al.* 2024).

Cada vez que un automóvil circula por las calles, o que una industria emite gases, o que el viento levanta polvo, millones de partículas microscópicas en suspensión, entre ellas el material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}), pasan entre las copas de los árboles y son retenidas entre la rugosidad, ceras o tricomas (pequeños pelos) y demás estructuras de la hoja que favorecen su captura, creando así un filtro natural que reduce las partículas que permanecen en el aire. Sin embargo, los árboles no solo retienen partículas contaminantes en sus estructuras, sino que en sus hojas se produce un intercambio activo a través de unos poros diminutos en la superficie de las hojas llamados estomas. Estas estructuras permiten el ingreso de dióxido de carbono (CO₂) indispensable para el desarrollo de los árboles y este ingreso no ocurre en solitario, sino que contaminantes gaseosos lo acompañan (Fig. 1), entre los cuales se encuentran ozono (O₃), azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (NO_x), que alteran el funcionamiento normal de sus células cuando se encuentran presentes en concentraciones elevadas (Xu *et al.* 2018; Ghosh *et al.* 2023).

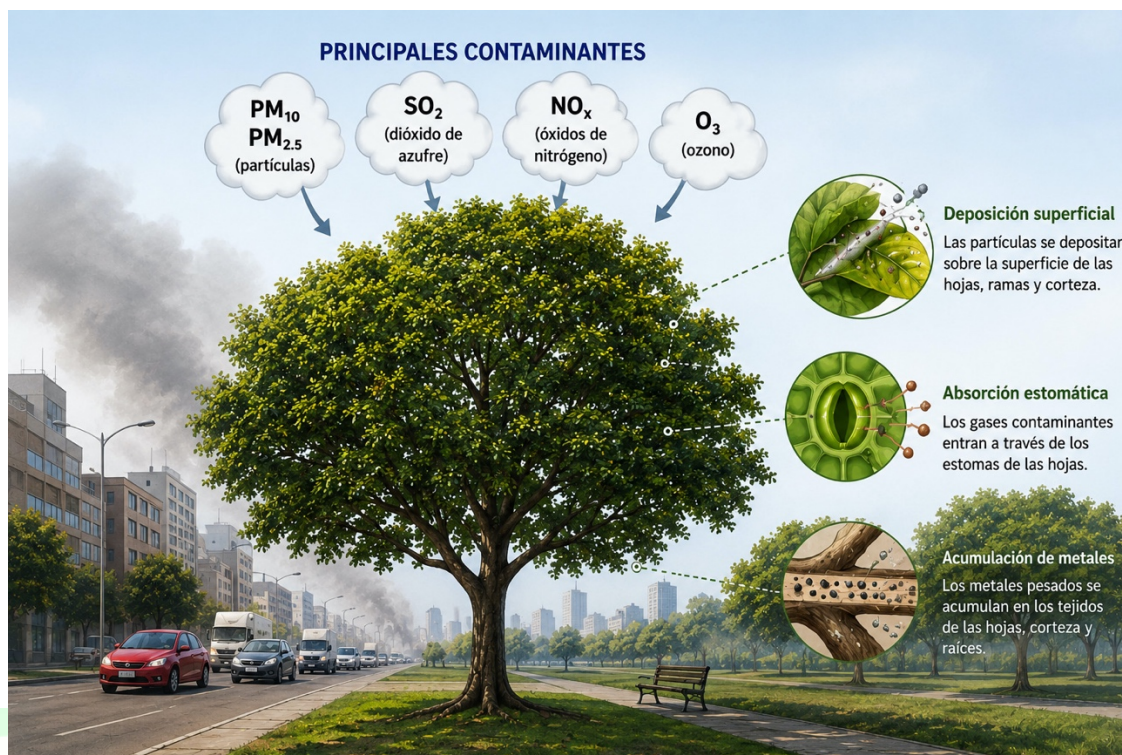


Figura 1. Intercambio gaseoso a través de los estomas y entrada de contaminantes atmosféricos en las hojas de los árboles

La exposición continua a estos contaminantes genera en los árboles cambios que se pueden registrar a simple vista o mediante técnicas de laboratorio. En algunos casos, las señales que podemos observar son: clorosis (*i.e.*, amarillamiento de las hojas), necrosis (*i.e.*, muerte del tejido), deformaciones y manchas (Fig. 2). Estos cambios también pueden registrarse solo a nivel microscópico y pueden validarse con análisis especializados. Por ejemplo, las estomas pueden modificar su tamaño o densidad y la cutícula puede hacerse más gruesa como mecanismo de protección (Chen *et al.* 2022). Además de estas respuestas, las hojas y la corteza acumulan elementos químicos de la contaminación atmosférica, entre los cuales se incluyen plomo (Pb), cadmio (Cd), cobre (Cu), zinc (Zn), níquel (Ni) y cromo (Cr), los cuales pueden provenir de residuos de procesos industriales, combustión de combustibles fósiles y del desgaste de frenos y neumáticos.

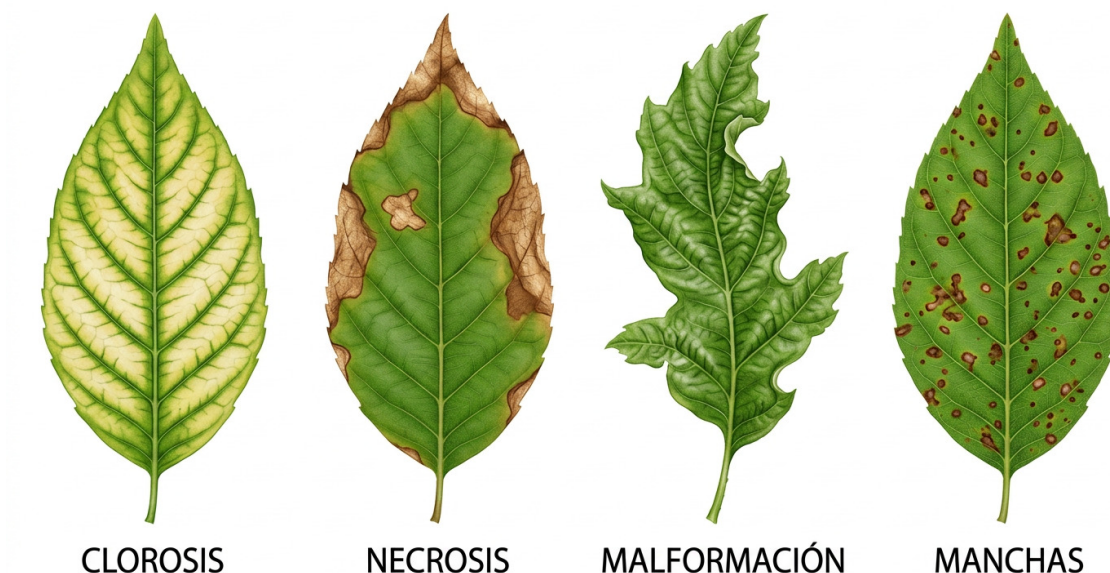


Figura 2. Alteraciones que pueden presentar las hojas de los árboles frente a los contaminantes atmosféricos

Estos elementos químicos pueden ser medidos en laboratorio con técnicas especializadas, como la espectrofotometría de absorción atómica o la espectrometría de masas (Herrera-Mendoza *et al.* 2026). De esta manera, los árboles pueden actuar como bitácoras vivas que identifican zonas de alta contaminación, evalúan el impacto del tráfico vehicular en las ciudades o miden las emisiones de actividades industriales, convirtiéndose en una herramienta científica de gran valor, capaz de complementar las redes existentes de monitoreo y proporcionar información fidedigna e histórica para la gestión ambiental de las ciudades.

*“...los árboles no solo retienen partículas
contaminantes en sus estructuras, sino que en sus
hojas se produce un intercambio activo a través de
unos poros diminutos presentes en la superficie de las
hojas llamados estomas.”*

Aplicaciones para ciudades más saludables

La aplicación de esta información no solo queda en el ámbito académico, el conocimiento de dónde y cómo se acumulan los contaminantes atmosféricos permite generar herramientas útiles para mejorar la vida de la gente de las ciudades (Patel *et al.* 2023). Es decir, los árboles

no solo contribuyen a reducir la contaminación, sino que también ayudan a comprenderla y a diseñar estrategias para enfrentarla (Sánchez-Castro *et al.* 2023).

Mediante un biomonitoreo, que es el uso de organismos como bioindicadores, se puede cuantificar la calidad del aire en un sitio dado para un contaminante en específico, o un grupo de contaminantes, y se pueden identificar zonas con mayor carga contaminante conocidas como “puntos calientes” (hotspots). Por el análisis de hojas y corteza, es posible detectar zonas de mayor acumulación de partículas o metales pesados y tener una visión amplia de las actividades asociadas (*e.g.*, avenidas con mayor tráfico, industrias, actividad comercial) con mayor cantidad de contaminantes (Dadea *et al.* 2017).

En cuanto a las áreas urbanas de países en desarrollo, en donde la infraestructura es un reto y el monitoreo automatizado es inaccesible, un biomonitoreo de los árboles urbanos puede implementarse con costos relativamente bajos cubriendo varios sitios (Rahman *et al.* 2025). Esta información es valiosa para una planificación urbana y el diseño de infraestructura verde y puede permitir que el gobierno priorice la plantación de árboles en sitios estratégicos con especies adecuadas capaces de tolerar y capturar contaminantes atmosféricos (Isinkaralar *et al.* 2024; Didur *et al.* 2025).

Varios estudios han demostrado que la exposición prolongada a contaminantes atmosféricos incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otros problemas de salud, especialmente en niños, adultos mayores y personas con enfermedades crónicas (Herrera-Mendoza *et al.* 2024). Un biomonitoreo de árboles urbanos puede ser relevante para la salud pública y para establecer programas de vigilancia epidemiológica, y eventualmente desarrollar políticas públicas que reduzcan la exposición de la población a contaminantes atmosféricos (Sawidis *et al.* 2011; Mazari *et al.* 2020).

El biomonitoreo mediante árboles urbanos puede contribuir a la eficacia de las políticas ambientales de las ciudades con una comparación simple del antes y después de implementar las medidas, como la modernización del transporte público, la disminución de emisiones industriales o creación de áreas verdes, y establecer la efectividad de las acciones en la calidad del aire (Drava *et al.* 2020; Simon *et al.* 2021). Ante el crecimiento acelerado de las ciudades y los desafíos impuestos por el cambio climático, los árboles representan una solución basada en la naturaleza con diversos beneficios, por lo que integrar programas de biomonitoreo utilizando árboles permitirá construir ciudades que dispongan de medidas de resiliencia y sean saludables y sostenibles.

“En cuanto a las áreas urbanas de países en vías de desarrollo, en donde la infraestructura es un reto y el monitoreo automatizado es inaccesible, un biomonitoreo de los árboles urbanos puede implementarse con costos relativamente bajos cubriendo varios sitios.”

Conclusión

Los árboles en áreas urbanas son mucho más que un elemento ornamental, o proveedor de sombra, ya que representan una oportunidad como herramienta natural para comprender la calidad del aire. Su capacidad para capturar y registrar contaminantes atmosféricos los convierte en valiosos bioindicadores que podrían complementar sistemas de monitoreo de la calidad del aire y generar información útil no solo para la academia sino también para la gestión ambiental de las ciudades y políticas en materia de salud pública. Reconocer y aprovechar este servicio ecosistémico de los árboles fortalece la construcción de ciudades saludables, resilientes y sostenibles, donde las áreas verdes no solo embellecen el paisaje, sino que son aliadas para proteger el bienestar de la sociedad.

Referencias

- Anze R, Franken M, Zaballa M, Pinto MR, Zeballos G, Cuadros MDLA, Canseco ADLR, Estellano VH y Del Granado S. 2007. Bioindicadores en la detección de la contaminación atmosférica en Bolivia. *Revista Virtual REDESMA* 1(1):53-74.
- Basile M, Augustinus BA y Brockerhoff EG. 2025. Urban tree canopy cover over 30% and native trees enhance bird insectivory and tree biosecurity. *Biological Conservation* 310:111387.
- Berland A, Shiflett SA, Shuster WD, Garmestani AS, Goddard HC, Herrmann DL y Hopton ME. 2017. The role of trees in urban stormwater management. *Landscape and Urban Planning* 162:167-177.
- Chen D, Yin S, Zhang X, Lyu J, Zhang Y, Zhu Y y Yan J. 2022. A high-resolution study of PM_{2.5} accumulation inside leaves in leaf stomata compared with non-stomatal areas using three-dimensional X-ray microscopy. *Science of the Total Environment* 852:158543.
- Cindoruk SS, Sakin AE y Tasdemir Y. 2020. Levels of persistent organic pollutants in pine tree components and ambient air. *Environmental Pollution* 256:113418.
- Da Silva Júnior FMR, De Moura FR, De Lima Brum R y Tavella R. 2023. Air pollution: a look beyond big cities. *Integrated Environmental Assessment and Management* 19(2):295-297.
- Dadea C, Russo A, Tagliavini M, Mimmo T y Zerbe S. 2017. Tree species as tools for biomonitoring and phytoremediation in urban environments: a review with special regard to heavy metals. *Arboriculture and Urban Forestry* 43(4):155-167.
- Didur I, Tkachuk O, Pantsyрева H, Chabanuk Y, Pankova S, Hutsol H, Mazur O y Kovka N. 2025. Bioindication characteristics of trees in solid protection forest strips depending on intensive agriculture. *Journal of Ecological Engineering* 26(6):315-328.
- Drava G, Ailuno G y Minganti V. 2020. Trace element concentrations measured in a biomonitor (tree bark) for assessing mortality and morbidity of urban population: a new promising approach for exploiting the potential of public health data. *Atmosphere* 11(8):783.
- Fletcher DH, Garrett JK, Thomas A, Fitch A, Cryle P, Shilton S y Jones L. 2022. Location, location, location: modelling of noise mitigation by urban woodland shows the benefit of targeted tree planting in cities. *Sustainability* 14(12):7079.

- Ghosh S, Dutta R y Mukhopadhyay S. 2023. A review on seasonal changes in particulate matter accumulation by plant bioindicators: effects on leaf traits. *Water, Air, & Soil Pollution* 234:529.
- Grote R, Samson R, Alonso R, Amorim J, Cariñanos P *et al.* 2016. Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14(10):543-550.
- Grylls T y van Reeuwijk M. 2022. How trees affect urban air quality: it depends on the source. *Atmospheric Environment* 290:119275.
- Herrera-Mendoza MDP, Sánchez-Castillo L, Meléndez-Jaramillo E, Osorio-Hernández E, Delgado-Martínez R y Rodríguez-Morán H. 2026. Soil properties and bioavailability of heavy metals in soils of orange orchards in north-eastern Mexico. *BioRisk* 24:119-131.
- Herrera-Mendoza MDP, Sánchez-Castillo L y Meléndez-Jaramillo E. 2024. ¿Metales pesados en su mesa? origen y consecuencias. *Voces del Suelo, Agricultura y Medioambiente* 2(4):44-51.
- Huang W, Xu H, Wu J, Ren M, Ke Y y Qiao J. 2024. Toward cleaner air and better health: current state, challenges, and priorities. *Science* 385(6707):386-390.
- Isinkaralar K, Isinkaralar O, Koc I, Cobanoglu H y Canturk U. 2024. Accumulation analysis and overall measurement to represent airborne toxic metals with passive tree bark biomonitoring technique in urban areas. *Environmental Monitoring and Assessment* 196:689.
- Islam R, Islam MS, Roy S, Zaman SU, Nahian S y Salam A. 2026. Roadside trees as bioindicators: air pollution tolerance and physiological responses in Dhaka, Bangladesh. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 116:84.
- Lee J, Kwak MJ y Woo SY. 2024. Adsorption of particulate matter and uptake of metal and non-metal elements from PM in leaves of *Pinus densiflora* and *Quercus acutissima*: a comparative study. *Frontiers in Forests and Global Change*. 6:1301533.
- Lin H y Li X. 2025. The role of urban green spaces in mitigating the urban heat island effect: a systematic review from the perspective of types and mechanisms. *Sustainability* 17(13):6132.
- Ma X, Zhang T, Ji C, Zhai Y, Shen X y Hong J. 2021. Threats to human health and ecosystem: looking for air-pollution related damage since 1990. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145:111146.
- Mandal M, Popek R, Przybysz A, Roy A, Das S y Sarkar A. 2023. Breathing fresh air in the city: implementing avenue trees as a sustainable solution to reduce particulate pollution in urban agglomerations. *Plants* 12(7):1545.
- Mazari K y Filippelli GM. 2020. Using deciduous trees as bioindicators of trace element deposition in a small urban watershed, Indianapolis, IN, USA. *Journal of Environmental Quality* 49(1):163-171.
- Patel KS, Pandey PK, Martín-Ramos P, Corns WT, Varol S, Bhattacharya P y Zhu Y. 2023. A review on arsenic in the environment: bio-accumulation, remediation, and disposal. *RSC Advances* 13(22):14914-14929.
- Polyakova GG, Senashova VA, Podolyak NM, Podolyak EM y Kudryasheva NS. 2022. Suburban pine forests as bioindicators of air pollution. *Journal of Biomedical Research & Environmental Sciences* 3(11):1389-1392.
- Querol X. 2008. Calidad del aire, partículas en suspensión y metales. *Revista Española de Salud Pública* 82(5):447-453.
- Rahman SU, Han JC, Zhou Y, Huang Y, Ali F, Zhao X, Alharbi SA y Alfarraj S. 2025. Biomonitoring and bioremediating potential of commonly grown tree species against

- trace elements with seasonal and site allocation: a region-based study. *BioMetals* 38(6):1747-1776.
- Sánchez-Castillo L, Meléndez-Jaramillo E, Chicas SD, Segura-Martínez MTDJ y Gonzalez-Delgado M. 2025. Mechanical properties of thin roots of tree species for shallow landslide protection along an altitudinal gradient. *BioRisk* 23:93-109.
- Sánchez-Castro I, Molina L, Prieto-Fernández MÁ y Segura A. 2023. Past, present and future trends in the remediation of heavy-metal contaminated soil-Remediation techniques applied in real soil-contamination events. *Heliyon* 9(6):e16692.
- Sawidis T, Breuste J, Mitrović M, Pavlović P y Tsigaridas K. 2011. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution* 159(12):3560-3570.
- Saxena V. 2025. Water quality, air pollution, and climate change: investigating the environmental impacts of industrialization and urbanization. *Water, Air, & Soil Pollution* 236:73.
- Simon E, Molnár V, Lajtos D, Bibi D, Tóthmérész B y Szabó S. 2021. Usefulness of tree species as urban health indicators. *Plants* 10(12):2797.
- Wallington TJ, Anderson JE, Dolan RH y Winkler SL. 2022. Vehicle emissions and urban air quality: 60 years of progress. *Atmosphere* 13(5):650.
- Wen Z, Ma X, Xu W, Si R, Liu L *et al.* 2024. Combined short-term and long-term emission controls improve air quality sustainably in China. *Nature Communications* 15(1):5169.
- Wong NH, Tan CL, Kolokotsa D y Takebayashi H. 2021. Greenery as a mitigation and adaptation strategy to urban heat. *Nature Reviews Earth & Environment* 2:166-181.
- Xu Y, Xu W, Mo L, Heal MR, Xu X y Yu X. 2018. Quantifying particulate matter accumulated on leaves by 17 species of urban trees in Beijing, China. *Environmental Science and Pollution Research* 25:12545-12556.
- Yin Y, Li S, Xing X, Zhou X, Kang Y, Hu Q y Li Y. 2024. Cooling benefits of urban tree canopy: a systematic review. *Sustainability* 16(12):4955.

Tejada-Luna DL, Sánchez-Castillo L, Meléndez-Jaramillo E. 2026. Árboles en áreas urbanas como indicadores de contaminación atmosférica. *Bioagrociencias* 19 (2): 77-85.

DOI: <http://doi.org/10.56369/BAC.7187>