DOI: 10.29298/rmcf.v17i98.1639

Artículo de investigación

Cuantificación de servicios ecosistémicos y valoración económica del arbolado urbano en Tapachula, Chiapas

Quantification of ecosystem services and economic valuation of the urban forest in *Tapachula*, state of *Chiapas*

Vincenzo Bertolini[1], Tomás Martínez-Trinidad[2]*, Carlos Mario Almeida-Cerino[1], Oscar Jáuregui Ortiz[3], Raúl de Jesús Jáuregui Rodriguez[3]

Fecha de recepción/Reception date: 10 de febrero de 2026.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 1 de junio de 2026.

[1]El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Unidad Tapachula. México.

[2]Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. México.

[3]Agro-Foresterya y Desarrollo S. C. México.

*Autor por correspondencia; correo-e: tomtz@colpos.mx

*Corresponding author; e-mail: tomtz@colpos.mx

Resumen

El arbolado urbano provee múltiples servicios ecosistémicos que contribuyen a mitigar los impactos ambientales asociados a la urbanización. En este contexto, el objetivo del presente estudio fue estimar la cobertura arbórea y evaluar los principales servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la ciudad de Tapachula, Chiapas, mediante el uso de las herramientas informáticas *i-Tree Canopy* e *i-Tree Eco.* La cobertura de copa se estimó a partir de la clasificación de 2 003 puntos aleatorios sobre imágenes satelitales correspondientes al año 2022, mientras que la evaluación de los servicios ecosistémicos se realizó con base en un inventario previo de 2 477 árboles. Los resultados indicaron que la ciudad reunió una cobertura arbórea de 31.36 % sobre una superficie total de 66.23 km^2. El arbolado urbano almacenó un total estimado de 150.35 kt de carbono y un secuestro anual de 5.98 kt, equivalente a 21.95 kt de CO_2 por año. Asimismo, se estimó una remoción anual total de 173.04 t de contaminantes atmosféricos, con un valor económico asociado aproximado de 9.35 millones de pesos mexicanos. En términos hidrológicos, el arbolado contribuyó de manera significativa a la reducción del escurrimiento superficial y a los flujos de evapotranspiración e intercepción. El arbolado de Tapachula constituye un componente funcional clave de la infraestructura verde urbana; además, el uso de la plataforma *i-Tree* es un recurso útil para su evaluación y gestión en ciudades tropicales.

Palabras clave: Beneficios ambientales, captura de carbono, contaminación atmosférica, *i-Tree Eco*, valor de reemplazo, zonas urbanas.

Abstract

Urban trees provide multiple ecosystem services that help mitigate the environmental impacts associated with urbanization. The objective of this study was to estimate tree canopy cover and to evaluate the main ecosystem services provided by the urban forest of the city of *Tapachula*, *Chiapas*, using the i-Tree Canopy and i-Tree Eco tools. Canopy cover was estimated by classifying 2 003 random points over 2022 satellite imagery, while ecosystem services were assessed using a previous inventory of 2 477 trees. The city showed a tree canopy cover of 31.36 % over a total area of 66.23 km^2. Urban trees stored an estimated total of 150.35 kt of carbon and showed an annual sequestration of 5.98 kt, equivalent to 21.95 kt of CO_2 per year. In addition, a total annual removal of 173.04 t of atmospheric pollutants was estimated, with an associated economic value of approximately 9.35 million Mexican pesos. In hydrological terms, urban trees contributed significantly to the reduction of surface runoff and to evapotranspiration and interception fluxes. The results indicate that the urban forest of *Tapachula* represents a key functional component of urban green infrastructure and that the use of i-Tree suite constitutes an appropriate framework to support urban forest evaluation and management in tropical cities.

Keywords: Environmental benefits, carbon sequestration, air pollution, i-Tree Eco, replacement value, urban areas.

Introducción

El arbolado urbano y periurbano proporciona múltiples servicios ecosistémicos a las ciudades, tales como la mitigación de la contaminación atmosférica, la mejora del microclima y de los regímenes hídricos locales, el incremento de oportunidades para la recreación y el turismo, así como el aumento de la biodiversidad urbana (Berglihn & Gómez-Baggethun, 2021). En este contexto, las áreas verdes constituyen un componente fundamental del sistema urbano, al concentrar una proporción significativa de los servicios ecosistémicos que benefician directamente a la población (Beckmann-Wübbelt et al., 2021). Asimismo, los habitantes de las ciudades no solo reciben beneficios de los árboles y bosques dentro de los límites administrativos metropolitanos, sino también de las áreas periurbanas adyacentes (Machado et al., 2021).

La contaminación atmosférica representa uno de los principales problemas ambientales en los entornos urbanos debido a sus efectos adversos sobre la salud humana

(Riondato et al., 2020). Entre los contaminantes más relevantes destacan el material particulado fino ($PM_{2.5}$), los gases de escape vehicular, el polvo generado por los frenos y las partículas de caucho de los neumáticos, los cuales alteran el equilibrio energético del clima y constituyen algunas de las principales fuentes de contaminación en las ciudades (Mateos et al., 2018). No obstante, el arbolado urbano contribuye de manera significativa a la mitigación de la contaminación atmosférica mediante la captura y retención de partículas y otros contaminantes (García-Sánchez et al., 2019). En conjunto, se asocia, principalmente, con servicios ecosistémicos de regulación, en particular, aquellos relacionados con la depuración del aire y la regulación térmica (Cimburova & Barton, 2020).

En los últimos años se ha incrementado el número de estudios enfocados en el análisis de la cobertura de copa y de los servicios ecosistémicos proporcionados por la vegetación arbórea de las ciudades (Berglihn & Gómez-Baggethun, 2021; Martínez-Trinidad et al., 2021; United States Forest Service [USFS], 2018). Al respecto, el uso de la plataforma *i-Tree*, a través de sus diferentes herramientas, ha permitido estimar la cobertura arbórea, así como los beneficios ambientales y económicos del arbolado urbano mediante procedimientos de muestreo aleatorio y modelación ecológica (Nowak et al., 2006). En particular, el módulo *i-Tree Eco* utiliza información del arbolado y la integra con datos de calidad del aire y de precipitación de un sitio determinado, lo que permite generar estimaciones de sus efectos en la mitigación a nivel de especie e incluso de individuo (USFS, 2018).

Así, el objetivo del presente estudio fue determinar la cobertura arbórea, cuantificar los principales servicios ecosistémicos y estimar el valor económico asociado al arbolado urbano de la ciudad de Tapachula, Chiapas, mediante el uso de las herramientas *i-Tree Canopy* e *i-Tree Eco*.

Materiales y Métodos

Área de estudio

La ciudad de Tapachula se localiza en las coordenadas 14°53’28.34” de latitud norte y 92°16’15.74” de longitud oeste, dentro de la región del Soconusco, caracterizada por una alta diversidad ecológica y paisajística (Martínez-Camilo et al., 2019). Actualmente, Tapachula se considera la segunda ciudad más importante del sur de Chiapas y se clasifica como zona metropolitana, con una población total de 217 550 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2021). El municipio ocupa una superficie aproximada de 303 km^2, con una altitud media de 170 m. Desde el punto de vista geomorfológico, se localiza en una zona de sierra baja de laderas tendidas que descansan sobre rocas metamórficas mesozoicas (García-Palomo et al., 2006). El clima es del tipo Am (cálido húmedo con lluvias en verano), con una precipitación media anual superior a 2 500 mm y una temperatura media anual de 26 °C (Murcia & Macías, 2009). Cabe indicar que el estudio se restringió a la zona urbana que abarca aproximadamente 66 km^2, correspondiente a la mancha urbanizada actual.

De acuerdo con el muestreo realizado por Almeida-Cerino et al. (2024), la diversidad arbórea urbana de Tapachula está compuesta por un total de 130 especies; de ellas, aproximadamente la mitad corresponde a exóticas, con un total de 2 477 individuos registrados. Las cinco especies dominantes, todas de origen exótico, son *Ficus microcarpa* L. f. (laurel), *Terminalia catappa* L. (almendro), *Elaeis guineensis* Jacq. (palma africana), *Ficus benjamina* L. (caucho llorón, laurel) y *Polyalthia longifolia* (Sonn.) Thwaites (mástil de la India). Entre los taxa nativos más frecuentes se identifican *Roseodendron donnell-smithii* (Rose) Miranda (primavera) y *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. (roble).

Análisis de la información

Para la evaluación de la cobertura arbórea y la cuantificación de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano se emplearon dos herramientas del software *i-Tree*: *i-Tree Canopy* versión 7.1 (Nowak & Greenfield, 2012) e *i-Tree Eco* (USFS, 2018). *i-Tree Canopy* estima la cobertura de copa a partir de la clasificación de puntos aleatorios sobre imágenes satelitales, mientras que *i-Tree Eco* determina los servicios ecosistémicos con base en datos dasométricos y estructurales del arbolado, y los integra con información climática, de contaminación atmosférica y precipitación.

La estimación de la cobertura arbórea se realizó mediante la clasificación de 2 003 puntos aleatorios distribuidos sobre la superficie urbana de Tapachula, a partir de una imagen satelital correspondiente al año 2022. Los puntos se asignaron a seis tipos de cobertura: árboles y arbustos, cuerpos de agua, carreteras y caminos pavimentados, casas y edificios, pastizales y suelo desnudo. La cobertura se estimó a partir de la proporción de puntos clasificados en cada categoría, y su error estándar se calculó con base en el muestreo aleatorio implementado en *i-Tree Canopy*. La estimación de la cobertura arbórea mediante *i-Tree Canopy* se basa en un muestreo aleatorio de puntos sobre imágenes satelitales, donde cada punto se clasifica visualmente en una categoría de cobertura. La proporción de puntos asignados a la categoría de árboles se utiliza para estimar el porcentaje de cobertura, asumiendo una distribución aleatoria, y el modelo calcula el error estándar asociado en función de la variabilidad del muestreo.

El modelo *i-Tree Eco* estima la remoción de contaminantes atmosféricos y su valor monetario asociado, así como el mejoramiento de la calidad del aire proporcionado por el bosque urbano (Nowak et al., 2014; USFS, 2018). El flujo de contaminantes (F, en g m^{-2} s^{-1}) se calculó con la siguiente ecuación (Nowak et al., 2014):

$$F = Vd \times C$$

Donde:

F = Flujo de contaminantes

Vd = Velocidad de deposición (m s^{-1}), estimada por el modelo en función de las condiciones meteorológicas y características de la superficie vegetal

C = Concentración del contaminante (g m^{-3}), obtenida a partir de registros de calidad del aire de la estación más cercana

El valor monetario asociado se calcula a partir de los valores medios de las externalidades en Estados Unidos de América para cada tonelada de contaminante removido (Arroyave-Maya et al., 2019), pero bajo la versión ajustada a México. Con *i-Tree Eco* se analizaron variables relacionadas con el almacenamiento y secuestro de carbono, la remoción de contaminantes atmosféricos, las emisiones de compuestos orgánicos volátiles y los procesos hidrológicos. Estas variables se estimaron mediante modelos integrados que utilizan información dasométrica del arbolado (diámetro, altura y especie), en combinación con datos meteorológicos y de calidad del aire, para cuantificar los flujos de carbono, la deposición de contaminantes, las emisiones biogénicas y los procesos de intercambio de agua en el sistema urbano (Nowak et al., 2014).

El almacenamiento de carbono se obtuvo a partir de la biomasa aérea de los árboles, mediante ecuaciones alométricas basadas en variables dasométricas como el diámetro normal (*DN*) (cinta diamétrica *Forestry Supplier Inc.*® modelo 283D), altura (clinómetro digital *Haglöf Sweden*® modelo EC II-D) y especie. Posteriormente, la biomasa se convirtió a contenido de carbono usando factores de conversión integrados en el modelo *i-Tree Eco*. Para estos análisis se utilizó un inventario arbóreo de 2022 de Tapachula, compuesto por 2 477 individuos (Almeida-Cerino et al., 2024), el cual incluye información dasométrica y taxonómica de cada árbol, como especie,

diámetro normal (*DN*), altura total y condición del arbolado. Estas variables fueron empleadas como datos de entrada en *i-Tree Eco* para la estimación de los servicios ecosistémicos.

Debido a la ausencia de información local completa sobre contaminación atmosférica y régimen de lluvias, se emplearon los datos de la estación meteorológica más cercana, ubicada en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, conforme a los criterios operativos del modelo *i-Tree Eco* (USFS, 2018). La remoción de contaminantes atmosféricos y su valoración económica se estimaron con *i-Tree Eco*, que calcula flujos de deposición a partir de concentraciones ambientales. Los resultados se expresaron en t km^{-2} $año^{-1}$ y se extrapolaron al área de estudio.

La valoración económica de los servicios ecosistémicos se realizó con base en los costos unitarios por tonelada de contaminante removido y carbono almacenado o secuestrado, integrados en la versión de *i-Tree Eco* adaptada para México. Estos valores corresponden a estimaciones de externalidades económicas asociadas a la calidad del aire y al carbono, ajustadas a condiciones nacionales y utilizadas por el modelo para la cuantificación monetaria de los beneficios, considerando monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO_2), ozono (O_3), dióxido de azufre (SO_2), material particulado menor a 2.5 μm ($PM_{2.5}$) y material particulado menor a 10 μm (PM_{10}), de acuerdo con la adaptación mexicana del modelo (USFS, 2018). Los valores se expresaron en pesos mexicanos (MXN) y los errores estándar se derivaron del procedimiento de muestreo del programa.

Resultados

Cobertura urbana

Con base en la clasificación de 2 003 puntos aleatorios mediante *i-Tree Canopy*, se estimó que la superficie urbana analizada abarca aproximadamente 66.23 km^2. La clase de cobertura dominante correspondió a los árboles y arbustos, con 31.36 % del área total, seguida por los pastizales (26.96 %) y las áreas ocupadas por casas y edificios (23.31 %). Las superficies de carreteras y caminos pavimentados representaron 10.88 %, mientras que los cuerpos de agua y los suelos desnudos cubrieron proporciones menores a 1 % y 7 %, respectivamente (Cuadro 1).

Cuadro 1. Clases de cobertura del suelo en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México, estimadas con *i-Tree Canopy*.

Clase de cobertura	Puntos (n)	Cobertura (%)	Error estándar	Área (ha)	Error estándar
Árboles/arbustos	628	31.36	1.46	1 957	48
Cuerpos de agua	13	0.65	0.25	49	0.9
Carreteras y caminos pavimentados	218	10.88	0.98	764	34
Casas y edificios	467	23.31	1.33	1 658	45
Pastizales	540	26.96	1.41	1 780	47
Suelos desnudos	137	6.84	0.79	415	26
Total	2 003	100.00		6 623	

Fuente: elaboración propia con base en *i-Tree Canopy* (Nowak & Greenfield, 2012) y en la clasificación de puntos de muestreo correspondiente al año 2022.

Servicios ecosistémicos del arbolado urbano

Carbono

El almacenamiento total de carbono en el arbolado urbano de Tapachula se estimó en 150.35 kt, mientras que la captura anual fue de 5.98 kt, lo que equivale a 551.27 kt de CO_2 almacenado y 21.95 kt de CO_2 capturado anualmente (Cuadro 2). El valor económico asociado al carbono almacenado asciende a MXN $526 961 779, el cual se obtuvo a partir de los costos unitarios por tonelada de carbono considerados en el modelo.

Cuadro 2. Almacenamiento y captura de carbono del arbolado urbano de Tapachula, Chiapas, México.

Tipo de estimación	Carbono (kt)	*EE*	CO_2 eq (kt)	*EE*	Valor pesos (MXN)	*EE*
Secuestro anual en carbono	5.98	0.29	21.95	1.07	$20 982 997	$1 018 622
Almacenamiento total de carbono	150.35	7.30	551.27	26.76	$526 961 779	$25 581 421

EE = Error estándar; CO_2 eq = Dióxido de carbono equivalente; MXN = Valor monetario expresado en pesos mexicanos; estimaciones generadas con *i-Tree Eco* (USFS, 2018). El CO_2 eq se obtuvo aplicando un factor de conversión de 3.67.
Fuente: elaboración propia con base en *i-Tree Eco* (USFS, 2018) y datos del inventario del arbolado urbano correspondiente al año 2022.

En términos comparativos, los valores obtenidos son superiores a los de la ciudad de Mérida, con aproximadamente 7.55 Mg ha^{-1} de carbono (de la Concha et al., 2017), y para Texcoco, con valores entre 2.56 y 7.55 Mg ha^{-1} (Martínez-Trinidad et al., 2021). Sin embargo, son inferiores a los documentados para áreas con arbolado consolidado, como el Bosque de Chapultepec, con 61.68 Mg ha^{-1} (López-López et al., 2018), y parques urbanos de Texcoco, con 28.86 Mg ha^{-1} (Martínez-Trinidad et al., 2021).

Remoción de contaminantes atmosféricos

El arbolado urbano de Tapachula remueve al año un total estimado de 173.04 t de contaminantes atmosféricos, con un valor económico aproximado de MXN $9 353 802 (Cuadro 3). Los contaminantes con mayor valor económico asociado a su remoción fueron las partículas menores a 10 μm (PM_{10}) y menores a 2.5 μm ($PM_{2.5}$), seguidos por el ozono.

Cuadro 3. Remoción anual de contaminantes atmosféricos por el arbolado de Tapachula, Chiapas, México.

Contaminante	Cantidad (t año^{-1})	*EE*	Valor Pesos (MXN)	*EE*
Monóxido de carbono (CO)	2.09	0.10	$61 212	$2 972
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	8.27	0.40	$26 733	$1 297
Ozono (O_3)	99.67	4.84	$1 194 691	$57 996
Dióxido de azufre (SO_2)	17.84	0.86	$3 988	$194
Material particulado $PM_{2.5}$	5.20	0.25	$2 515 094	$122 095
Material particulado PM_{10}	39.97	1.94	$5 552 084	$269 526
Total	173.04	8.40	$9 353 802	$454 080

EE = Error estándar; MXN = Valor monetario expresado en pesos mexicanos; estimaciones generadas con *i-Tree Eco* (USFS, 2018). Fuente: elaboración propia con base en *i-Tree Eco* (USFS, 2018) y datos del inventario del arbolado urbano correspondiente al año 2022.

Servicios hidrológicos

Los árboles y arbustos urbanos contribuyeron de manera significativa a la reducción de la escorrentía superficial, con un volumen evitado estimado de 64.77 ML anuales, lo que representó un beneficio económico aproximado de MXN $2 850 666.

Asimismo, se estimaron volúmenes importantes de interceptación, evaporación y transpiración, los cuales reflejan el papel del arbolado urbano en la regulación del ciclo hidrológico local (Cuadro 4). Los errores estándar asociados a cada variable se presentan como una medida de la variabilidad de las estimaciones derivadas del muestreo.

Cuadro 4. Beneficios hidrológicos principales del arbolado de la ciudad de Tapachula, Chiapas, México.

Beneficio	Cantidad (ML)	Error estándar
Escurrimiento evitado	64.77	3.14
Evaporación	1 141.21	55.40
Intercepción	1 148.83	55.77
Transpiración	1 351.66	65.61

Fuente: elaboración propia con base en *i-Tree Eco* (USFS, 2018) y datos del inventario del arbolado urbano correspondiente al año 2022.

Otros servicios: oxígeno y compuestos orgánicos volátiles

El arbolado urbano analizado produjo un total estimado de 84 335.6 kg de oxígeno por año. Las mayores contribuciones de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) correspondieron a especies del género *Ficus* sp. y a *Elaeis guineensis*, con 186.24 y 142.38 kg año^{-1}, respectivamente, seguidas por *Ficus benjamina* (63.32 kg año^{-1}) y *Terminalia catappa* (42.59 kg año^{-1}). En contraste, *Tabebuia rosea* no presentó emisiones detectables de monoterpenos, ni isopreno en el modelo, lo cual puede asociarse a características fisiológicas propias de la especie, como bajas tasas de emisión de compuestos orgánicos volátiles, o a los factores de emisión asignados en la base de datos del modelo *i-Tree Eco*. En términos globales, las emisiones totales estimadas para las seis especies más frecuentes ascendieron a 460.15 kg año^{-1}; de ellas, la mayor proporción correspondió a isopreno (376.95 kg año^{-1}), mientras que los monoterpenos representaron una fracción menor (83.17 kg año^{-1}).

Aporte de las especies dominantes

El almacenamiento total de carbono del arbolado urbano de la ciudad de Tapachula se estimó en 874.5 t, lo que equivale a 3 206.9 t de CO_2. Cabe señalar que el valor de 874.5 t correspondió al almacenamiento estimado para las especies más representativas del inventario, mientras que el valor de 150.35 kt representó la estimación total del arbolado urbano.

La contribución al almacenamiento de carbono estuvo fuertemente concentrada en un número reducido de especies dominantes. *Elaeis guineensis* aportó la mayor proporción del carbono almacenado, con aproximadamente 35 % del total. Le siguió

Ficus microcarpa, que contribuyó con 11.2 %. Otros taxa con aportaciones relevantes fueron *Ficus benjamina* (6.5 %), *Roseodendron donnell-smithii* (6.1 %), *Terminalia catappa* (5.8 %) y *Tabebuia rosea* (5.1 %). En conjunto, estas seis especies concentraron 69 % del carbono almacenado en el arbolado urbano de la ciudad, de las cuales destacaron *Elaeis guineensis* y *Ficus microcarpa* que en conjunto suministraron más de 46 % del carbono almacenado, lo cual se asocia a su gran abundancia en la ciudad (Almeida-Cerino et al., 2024).

Discusión

Cobertura arbórea y estructura del paisaje urbano

La cobertura arbórea estimada para la ciudad de Tapachula (aproximadamente 31 %) está dentro del intervalo citado para otras ciudades mexicanas y latinoamericanas evaluadas con metodologías similares; lo que confirma la relevancia del arbolado como componente estructural del paisaje urbano. Estudios en parques urbanos de Texcoco documentan coberturas y estructuras comparables, aunque con una mayor concentración de biomasa en áreas verdes consolidadas (Martínez-Trinidad et al., 2021). Sin embargo, Tapachula se ubica en un ambiente tropical de selva baja, un ecosistema naturalmente más productivo y con mayor capacidad para sostener vegetación; por lo que, la cobertura actual puede considerarse relativamente limitada, ello sugiere oportunidades para incrementar el arbolado urbano. La proporción similar entre áreas construidas, pastizales y cobertura arbórea refleja un patrón típico de ciudades intertropicales en expansión, donde la

vegetación urbana aún cumple un papel importante en la regulación ambiental (Berglihn & Gómez-Baggethun, 2021).

Además, la localización de Tapachula en una región con alta dinámica hidroclimática y geológica (García-Palomo et al., 2006; Murcia & Macías, 2009) hace particularmente relevante la presencia de cobertura vegetal urbana como elemento amortiguador frente a procesos de escurrimiento superficial e inundaciones. Aunque la cobertura arbórea urbana es significativa, en un ecosistema de selva baja tropical podría considerarse limitada, por lo que su incremento contribuiría a la regulación hídrica y a la resiliencia frente a la variabilidad climática y geológica de la región.

Almacenamiento y secuestro de carbono: magnitud y comparación regional

El arbolado urbano de Tapachula presenta una capacidad de almacenamiento de carbono que, si bien es inferior a la registrada en áreas verdes maduras como el Bosque de Chapultepec (López-López et al., 2018), resulta comparable o superior a la de otras ciudades mexicanas evaluadas con *i-Tree Eco*, como Texcoco (Martínez-Trinidad et al., 2021) y Mérida (de la Concha et al., 2017). Estas diferencias se explicarían por la estructura diamétrica de los árboles, la composición de especies y el grado de consolidación del arbolado urbano, factores que influyen directamente en la acumulación de biomasa y carbono (Nowak et al., 2014). Asimismo, las condiciones ambientales locales y el manejo del arbolado pueden modificar la tasa de crecimiento y la eficiencia en la fijación de carbono, lo que contribuye a la variabilidad observada entre ciudades (García-Sánchez et al., 2019).

La dominancia de especies introducidas y de rápido crecimiento, como *Ficus microcarpa* y *Elaeis guineensis*, explica en buena medida la alta contribución de un número reducido de especies al almacenamiento total de carbono, un patrón también observado en otros inventarios urbanos donde pocas especies concentran la mayor parte de la biomasa (Martínez-Trinidad et al., 2021).

Remoción de contaminantes atmosféricos y calidad del aire

Los resultados confirman que el arbolado urbano de Tapachula contribuye de manera significativa a la remoción de contaminantes atmosféricos, particularmente ozono y material particulado, lo cual coincide con lo citado en estudios realizados en otras ciudades mediante *i-Tree Eco* (Arroyave-Maya et al., 2019; Nowak et al., 2006; Riondato et al., 2020). La magnitud de la remoción estimada está dentro de los intervalos esperados para ciudades con una cobertura arbórea cercana a 30 %.

Este servicio ecosistémico es especialmente relevante, si se considera que la contaminación atmosférica es uno de los principales problemas ambientales en zonas urbanas, y que sus efectos sobre la salud humana están ampliamente documentados (Mateos et al., 2018). En este sentido, el arbolado urbano no solo cumple una función estética o paisajística, sino que constituye una infraestructura verde con efectos directos sobre la calidad ambiental de las ciudades.

Servicios hidrológicos y contexto de riesgo en Tapachula

La reducción del escurrimiento superficial estimada mediante *i-Tree Eco* adquiere particular importancia en una ciudad como Tapachula, donde se ha documentado históricamente la ocurrencia de inundaciones severas asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos (Murcia & Macías, 2009). Aunque, las estimaciones deben interpretarse con cautela debido a las limitaciones del modelo, entre ellas el uso de datos meteorológicos provenientes de una estación externa a la zona de estudio, la aplicación de factores de estimación generalizados para las especies y la simplificación de los procesos hidrológicos, los resultados confirman el papel del arbolado urbano como componente clave en la regulación hidrológica a escala local.

Estos hallazgos son consistentes con la noción de que la vegetación urbana funciona como un sistema de amortiguamiento frente a eventos extremos, especialmente en regiones tropicales con alta precipitación anual (Cimburova & Barton, 2020; Nowak et al., 2014).

Emisión de compuestos orgánicos volátiles: un servicio con externalidades

Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (COV) estimadas muestran que algunas especies dominantes, en particular *Ficus* spp. y *Elaeis guineensis*, contribuyen de manera importante a este flujo biogénico. Resultado que coincide con lo registrado por el propio modelo *i-Tree Eco* y por estudios que señalan que ciertas especies tropicales emiten cantidades considerables de isopreno y monoterpenos (Nowak et al., 2006; Riondato et al., 2020).

Este aspecto subraya la importancia de considerar no solo los beneficios del arbolado urbano, sino también sus posibles externalidades ambientales al momento de planificar la composición de especies en programas de forestación urbana (Nowak et al., 2014; Riondato et al., 2020).

Implicaciones para la gestión del arbolado urbano

En conjunto, los resultados confirman que el arbolado urbano de Tapachula constituye un activo ambiental estratégico que aporta beneficios cuantificables en términos de carbono, calidad del aire y regulación hidrológica, en concordancia con lo señalado en evaluaciones similares realizadas en México y otros países (Cimburova & Barton, 2020; Martínez-Trinidad et al., 2021). Sin embargo, también se evidencia la necesidad de orientar la selección de especies hacia criterios funcionales, de resiliencia y de maximización de beneficios ecosistémicos.

Conclusiones

El arbolado urbano de la ciudad de Tapachula presenta una cobertura cercana a una tercera parte de la superficie urbana y aporta servicios ecosistémicos cuantificables en términos de almacenamiento y secuestro de carbono, remoción de contaminantes atmosféricos y regulación hidrológica, cuyos valores pueden expresarse en unidades biofísicas y económicas mediante el uso de la herramienta *i-Tree Eco*. La provisión de estos servicios se concentra, sobre todo, en un número reducido de especies dominantes, principalmente introducidas, lo que evidencia una alta dependencia funcional del sistema y resalta la necesidad de incorporar criterios de diversificación y selección funcional de taxa en la planeación del arbolado urbano. En un contexto climático caracterizado por precipitaciones intensas, los servicios hidrológicos del arbolado urbano adquieren relevancia estratégica al contribuir a la reducción del escurrimiento superficial. Asimismo, las estimaciones de emisiones de compuestos orgánicos volátiles indican que la composición específica del arbolado debe considerarse explícitamente en la gestión de la calidad del aire urbano. Por último, los resultados confirman que *i-Tree Eco* constituye una herramienta adecuada y replicable para la evaluación integral del arbolado urbano en ciudades mexicanas, con potencial para apoyar la planeación urbana y la gestión ambiental basada en evidencia cuantitativa.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las personas que participaron en las actividades de campo como practicantes.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses.

Contribución por autor

Vincenzo Bertolini, Tomás Martínez-Trinidad, Carlos Mario Almeida-Cerino: desarrollo de la idea original y redacción inicial del manuscrito; Vincenzo Bertolini, Tomás Martínez-Trinidad, Oscar Jáuregui Ortiz y Raúl de Jesús Jáuregui Rodríguez: revisión final del texto, realización de correcciones, complementación de información y adaptación del manuscrito a las directrices editoriales. Todos los autores aprobaron la versión final.

Referencias

Almeida-Cerino, C. M., Bertolini, V., & Martínez-Trinidad, T. (2024). Estructura y diversidad florística en áreas verdes urbanas de la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *15*(83), 131-154. https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i83.1457

Arroyave-Maya, M. del P., Posada-Posada, M. I., Nowak, D. J., & Hoehn, R. E. (2019). Remoción de contaminantes atmosféricos por el bosque urbano en el valle de Aburrá. *Colombia Forestal*, *22*(1), 5-16. http://dx.doi.org/10.14483/2256201X.13695

Beckmann-Wübbelt, A., Fricke, A., Sebesvari, Z., Yakouchenkova, I. A., Fröhlich, K., & Saha, S. (2021). High public appreciation for the cultural ecosystem services of urban and peri-urban forests during the COVID-19 pandemic. *Sustainable Cities and Society*, *74*, Article 103240. https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103240

Berglihn, E. C., & Gómez-Baggethun, E. (2021). Ecosystem services from urban forests: The case of Oslomarka, Norway. *Ecosystem Services*, *51*, Article 101358. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2021.101358

Cimburova, Z., & Barton, D. N. (2020). The potential of geospatial analysis and Bayesian networks to enable i-Tree Eco assessment of existing tree inventories. *Urban Forestry & Urban Greening*, *55*, Article 126801. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126801

de la Concha, H., Roche-Cano, L., & García-Burgos, A. (2017). *Inventario del arbolado urbano de la Ciudad de Mérida* [Libro blanco]. Ayuntamiento de Mérida 2018-2021. http://www.merida.gob.mx/sustentable/contenidos/doc/inventario_arbolado_merida.pdf

García-Palomo, A., Macías, J. L., Arce, J. L., Mora, J. C., Hughes, S., Saucedo, R., Espíndola, J. M., Escobar, R., & Layer, P. (2006). Geological evolution of the Tacaná Volcanic Complex, México-Guatemala. In W. I. Rose, G. J. S. Bluth, M. J. Carr, J. W. Ewert, L. C. Patino & J. W. Vallance (Eds.), *Volcanic hazards in Central America* (pp. 39-57). Geological Society of America. https://www.researchgate.net/publication/281256054_Geological_evolution_of_the_Tacana_Volcanic_Complex_Mexico-Guatemala?__cf_chl_tk=sewQi9dBxi1BBX9YyR6yvXFz3SCf8VgUJ04qvrRNg40-1790369624-1.0.1.1-m912RuOTUPIWAm2bGS0tsjBuWZo11VcSgU.Y3uwLdhs

García-Sánchez, I. E., Barradas, V. L., Ponce de León-Hill, C. A., Esperón-Rodríguez, M., Rosas-Pérez, I., & Ballinas, M. (2019). Effect of heavy metals and environmental variables on the assimilation of CO_2 and stomatal conductance of *Ligustrum lucidum*, an urban tree from Mexico City. *Urban Forestry & Urban Greening*, *42*, 72-81. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.05.002

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). *2020 Censo de población y vivienda* [Base de datos]. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://censo2020.mx/

López-López, S. F., Martínez-Trinidad, T., Benavides-Meza, H. M., García-Nieto, M., & Ángeles-Pérez, G. (2018). Reservorios de biomasa y carbono en el arbolado de la

primera sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México. *Madera y Bosques*, *24*(3), Artículo e2431620. https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431620

Machado, Jr., C., Mantovani-Ribeiro, D. M. N., & Noronha-Viana, A. B. (2021). Public health in times of crisis: An overlooked variable in city management theories? *Sustainable Cities and Society*, *66*, Article 102671. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102671

Martínez-Camilo, R., Martínez-Meléndez, N., Martínez-Meléndez, M., Pérez-Ferrera, M. Á., & Jiménez-López, D. A. (2019). Why continue with floristic checklists in Mexico? The case of the Tacaná-Boquerón Priority Terrestrial Region, in the Mexican State of Chiapas. *Botanical Sciences*, *97*(4), 741-753. https://doi.org/10.17129/botsci.2174

Martínez-Trinidad, T., Hernández-López, P., López-López, S. F., & Mohedano-Caballero, L. (2021). Diversity, structure and ecosystem services of trees in four parks in *Texcoco* using i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *12*(67), 203-223. https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880

Mateos, A. C., Amarillo, A. C., Carreras, H. A., & Gonzalez, C. M. (2018). Land use and air quality in urban environments: Human health risk assessment due to inhalation of airborne particles. *Environmental Research*, *161*, 370-380. https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.035

Murcia, H. F., & Macías, J. L. (2009). Registro geológico de inundaciones recurrentes e inundación del 4 de octubre de 2005 en la ciudad de Tapachula, Chiapas, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, *26*(1), 1-17. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1026-87742009000100002&script=sci_arttext

Nowak, D. J., & Greenfield, E. J. (2012). Tree and impervious cover change in U. S. cities. *Urban Forestry & Urban Greening*, *11*(1), 21-30. https://doi.org/10.1016/j.ufug.2011.11.005

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://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007

Nowak, D. J., Hirabayashi, S., Bodine, A., & Greenfield, E. (2014). 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

Riondato, E., Pilla, F., Basu, A. S., & Basu, B. (2020). Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model. *Sustainable Cities and Society*, *61*, Article 102356. https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356

United States Forest Service. (2018). *Adaptación del programa I-Tree Eco a México*. United States Forest Service, Davey Tree Expert Company. https://www.itreetools.org/documents/212/iTree_Eco_Mexico_Adaptation_Description_15Sep2018.pdf

Todos los textos publicados por la **Revista Mexicana de Ciencias Forestales –**sin excepción– se distribuyen amparados bajo la licencia *Creative Commons 4.0* Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional), que permite a terceros utilizar lo publicado siempre que mencionen la autoría del trabajo y a la primera publicación en esta revista.