



DOI: [10.29298/rmcf.v15i81.1428](https://doi.org/10.29298/rmcf.v15i81.1428)

Artículo de investigación

Los árboles longevos y frondosos en la provisión de servicios ecosistémicos en ambientes urbanos

Old leafy trees in the provision of ecosystem services in urban areas

Martha Gabriela Pérez Martínez¹, Gustavo Pérez Verdín^{1*}, Pablito Marcelo López Serrano²

Fecha de recepción/Reception date: 30 de agosto de 2023.

Fecha de aceptación/Acceptance date: 23 de noviembre de 2023.

¹Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Durango. México.

²Universidad Juárez del Estado de Durango. Instituto de Silvicultura e Industria de la Madera. México.

*Autor para correspondencia; correo-e: guperezv@ipn.mx

*Corresponding author; e-mail: guperezv@ipn.mx

Resumen

Los árboles frondosos se caracterizan por su gran tamaño y longevidad, la cantidad de servicios ecosistémicos que proveen y, en ocasiones, destacan por su contribución al acervo cultural e histórico de las ciudades. El objetivo de este trabajo fue analizar el valor económico, social y ecológico que representan los árboles frondosos en la ciudad de Durango, México. A través de imágenes satelitales e inventarios de campo, se identificaron 83 árboles frondosos. Se midió el diámetro a la altura del pecho, altura, diámetro y estado de la copa, además de la temperatura y la radiación solar. Se aplicó una encuesta para conocer las percepciones sociales de la importancia de estos individuos. Los datos del inventario se analizaron en la plataforma *i-Tree Eco* v6 para determinar la cantidad y valor económico de los servicios ecosistémicos. Los árboles frondosos de esta ciudad secuestran alrededor de 1.3 t de CO₂ por año, interceptan alrededor de 375 kg de partículas menores a 10 μm y su valor de sustitución se estimó en MXN \$23.6 millones. A partir de datos tomados bajo y fuera del dosel, se calculó una diferencia de entre 400 y 1 200 Wm² de radiación solar interceptada y de 6 a 20 °C de temperatura. Derivado del análisis factorial, las encuestas revelaron tres variables latentes: "perjuicios", "beneficios" y "valores existenciales". No se obtuvieron diferencias significativas en las puntuaciones factoriales de las variables. La información generada permitirá definir planes para el manejo y conservación de este tipo de ejemplares.

Palabras clave: Árboles frondosos, áreas verdes, *i-Tree Eco*, planeación urbana, valor económico, valoración social.

Abstract

Mature, leafy trees are characterized by their large size and longevity. They provide many ecosystem services and sometimes are part of the cultural and historical heritage of cities. The objective of this research was to analyze the economic, social, and ecological value of mature, leafy trees in the city of *Durango*, Mexico. Through satellite images and field inventories, 83 trees were identified with the characteristics of size and longevity. Diameter at breast height, height, diameter and crown condition were measured, as well as temperature and solar radiation. A survey was administered to residents and park visitors to learn about their perceptions of the

importance of these trees. The inventory data were analyzed in the i-Tree Eco v6 platform to determine the quantity and economic value of the ecosystem services. Mature, leafy trees in this city store about 1.3 CO₂ tons per year, intercept 375 kg of particles smaller than 10 μm, and their substitution value was estimated at MXN \$23.6 million. From data taken under and outside the canopy, a difference between 400 and 1 200 Wm² of intercepted solar radiation and between 6 and 20 °C of temperature was calculated. Derived from the factor analysis, the questionnaires revealed three latent variables, in this order: "disservices", "benefits" and "existential values". No significant differences in the factor scores were found among these variables. This information will allow city managers to define plans for the management and conservation of these type of trees.

Key words: Leafy trees, green areas, i-Tree Eco, urban planning, economic value, social valuation.

Introducción

En las últimas décadas, el desarrollo industrial y urbano ha presentado un acelerado crecimiento; y con ello, alteraciones en los paisajes naturales y un impacto negativo en la vegetación urbana y, por consiguiente, en el bienestar humano (Pickett *et al.*, 2011). El arbolado urbano cumple un papel fundamental en las ciudades, ya que contribuye a la salud pública y a la calidad de vida de los ciudadanos a través de los muchos servicios ecosistémicos (SE), traducidos como los beneficios directos e indirectos aportados por los ecosistemas a los seres humanos (Roy *et al.*, 2012). El arbolado urbano se ubica, por lo general, en espacios públicos y áreas verdes como los parques, jardines o a lo largo de las calles y camellones de las ciudades. Proveen oxígeno, secuestran el carbono y mejoran la calidad del aire, reducen el ruido, apoyan la relajación personal o familiar, reducen la temperatura con la sombra, regulan el escurrimiento del agua y la erosión del suelo, además en sus hojas y ramas se concentran partículas contaminantes del aire (Pickett *et al.*, 2011; Blancarte-Siqueiros *et al.*, 2020).

Algunos estudios refieren que incluso la tasa de criminalidad en ciertas ciudades de Estados Unidos de América es inversa a la cobertura de los árboles urbanos (Troy *et al.*, 2012). Los SE ofertados por los árboles longevos y frondosos (también conocidos

como patrimoniales) en ambientes urbanos son similares a los de los árboles promedio, pero debido a su tamaño los servicios ecosistémicos se multiplican, además por su longevidad forman parte de una identidad cultural, histórica y social de los habitantes (Jim, 2018; Mejorado *et al.*, 2020; Granados-Espíndola *et al.*, 2022).

De acuerdo con Borelli *et al.* (2018), el arbolado urbano está inmerso en la Agenda 2030 y en los Objetivos para un Desarrollo Sostenible. Sin embargo, los esfuerzos que se han hecho en el territorio nacional para fomentar su conservación son esporádicos e incipientes; aunque se fundamentan en la importancia que tienen dichos ejemplares por su tamaño o su relación con algún hecho histórico, religioso o sentimental que los liga al establecimiento de un asentamiento humano. Por ello, es importante conocer su ubicación, distribución, estructura y dinámica para evaluar su condición ambiental (valor ecosistémico), con el fin de determinar estrategias de protección y conservación, dada su importancia en la sociedad.

En México, aunque se aprecian los beneficios del arbolado urbano, no existen parámetros, derivados de una investigación o un consenso acerca de los métodos de valoración, para estudiar de manera cualitativa y cuantitativa los servicios ecosistémicos de este tipo de arbolado (Mejorado *et al.*, 2020; Arango *et al.*, 2023).

Con la implementación de herramientas de evaluación como *i-Tree Eco v6* (Nowak, 2021), la cual simula los beneficios ambientales y económicos, es posible analizar el rol de estos árboles en la provisión de SE. Específicamente, esta herramienta permite caracterizar la estructura del bosque urbano, cuantificar los SE que se generan y valorar económicamente los beneficios a la sociedad (Song *et al.*, 2020). Para ello, es necesario realizar inventarios que describan el diagnóstico general de los árboles, incluido su estado fitosanitario, distribución, ubicación y cuantía.

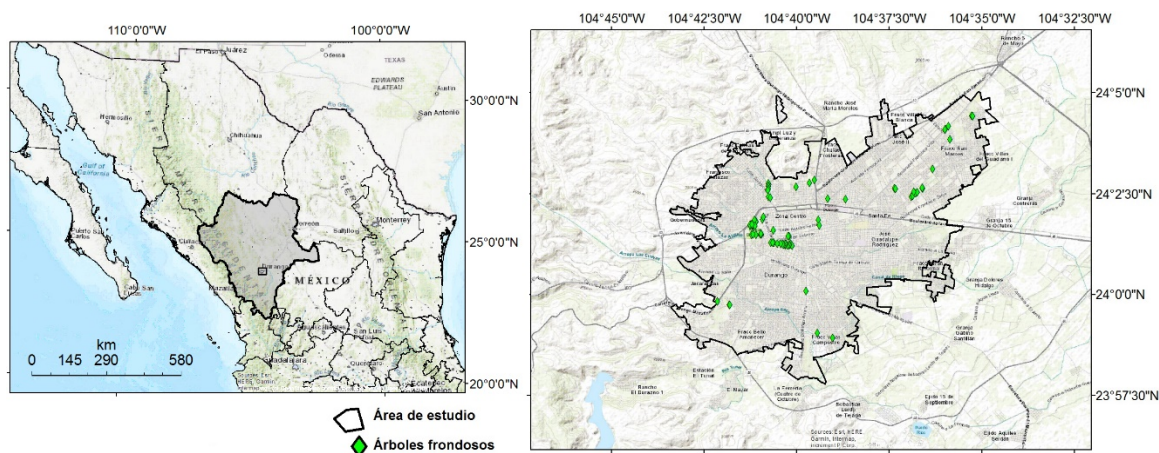
El programa *i-Tree Eco v6* facilita la comprensión de su valor para los habitantes,

técnicos y administrativos que se relacionan con su manejo. La aplicación de *i-Tree Eco* es útil para determinar el valor del arbolado, lo que eventualmente servirá para gestionar recursos para su protección, conservación y mejoramiento (Nowak, 2021). En este contexto, el presente trabajo tuvo como objetivo analizar el valor ambiental, económico y social que representan los árboles longevos y frondosos (o monumentales) en la ciudad de Durango, México.

Materiales y Métodos

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la ciudad Victoria de Durango, capital del estado de Durango, México, dentro del Valle del Guadiana. Tiene una altitud de 1 880 m (Figura 1). El clima varía de semiseco templado a templado subhúmedo, con lluvias escasas en verano, semifrío y subhúmedo en invierno. La temperatura media anual es de 17.5 °C y la precipitación media anual de 522 mm, con valores máximos de precipitación y lluvias regulares en los meses de junio a octubre (Conagua, 2014). La población es de 688 697 habitantes, que representa 37.6 % de la población total del estado. La superficie de la mancha urbana es de 9 285 ha (Inegi, 2021); y la que ocupan las áreas verdes de carácter público corresponde a 2.1 millones m² (incluye parques, jardines, plazas y camellones); en esa estimación se consideró una población de 518 709 habitantes, lo que equivale a una densidad de 3.7 m² de áreas verdes por habitante (Blancarte-Siqueiros *et al.*, 2020).



Fuente: Información propia, con apoyo de imágenes públicas de *ESRI*.

Figura 1. Localización del área de estudio y los árboles evaluados.

Identificación y caracterización de árboles frondosos

La caracterización de los árboles frondosos se hizo con los siguientes criterios: árboles con diámetro a la altura del pecho (*DAP*, a 1.30 m sobre la base del suelo) mayor a 80 cm, altura total mayor a 15 m y un diámetro de copa superior a 10 m. Con el fin de identificar áreas posibles en la localización de dichos árboles en la ciudad, se utilizó una imagen de satélite del sensor *WorldView-2* del año 2015 con una resolución espacial de 0.5 m (Anderson y Marchisio, 2012).

Posteriormente, se hizo una clasificación supervisada para identificar las áreas con vegetación en la ciudad. Se generaron las siguientes clases: zona urbana, vegetación, suelo desnudo, pavimento y cuerpos de agua. La clasificación se realizó mediante el algoritmo de máxima verosimilitud, el cual asume que las estadísticas

para cada clase en cada banda se distribuyen normalmente y se calcula la probabilidad de que un píxel dado pertenezca a una clase específica; es decir, la máxima probabilidad (Richards, 2013). Este proceso se ejecutó en el *software ERDAS Imagine* (Nelson y Khorram, 2018). Una vez ejecutada la clasificación se seleccionó solo la clase de vegetación para identificar las áreas verdes de la ciudad y visitar los sitios para verificar los árboles frondosos. Después, se elaboró un inventario forestal del arbolado identificado, para lo cual se organizó una brigada con tres personas capacitadas para recabar la información de campo.

Inventario forestal del arbolado urbano

Para obtener la información dasométrica y fitosanitaria de los árboles frondosos se realizó un recorrido en la ciudad. Con base en la imagen clasificada obtenida de la clase vegetación, se localizaron los árboles frondosos y a cada árbol se le midieron en forma directa las variables descritas en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros aplicados en el inventario forestal de los árboles frondosos en la ciudad de Durango, Durango, México.

Variables	Descripción	Unidades
Fecha	Fecha en la que se tomaron los datos de cada árbol	
Coordenadas GPS	Ubicación geográfica de cada árbol	UTM
Especie	Identificación de los nombres de los árboles a nivel especie o género	
<i>DAP</i>	Diámetro del fuste del árbol a la altura del pecho (1.30 m)	Centímetros
Altura total	Altura medida desde el suelo hasta la última rama viva del árbol	Metros
Diámetro de copa	Ancho de la copa en dirección norte-sur y este-oeste	Metros

Altura superior de la copa	Altura de la copa de la parte inferior (primera ramificación) hasta la parte superior viva del árbol	Metros
Altura de la base a la copa	Altura del suelo a la base de la copa viva (primera ramificación)	Metros
Porcentaje de copa muerta	Porcentaje del volumen de la copa que está muerta	%
Porcentaje de copa faltante	Porcentaje del volumen de la copa que está ausente	%
Exposición de luz en la copa	Número de lados (máximo 5) que la copa recibe luz del sol en el cenit, norte, sur, este y oeste	Número de lados
Uso de la tierra	Tipo del uso de tierra en la que está el árbol (parque, comercial, forestal, residencial, institucional, etcétera.)	

Para capturar los datos, se diseñó y se utilizó un formato de campo en el que cada árbol fue identificado por género y especie, y se etiquetó con un código de identificación para facilitar su ubicación geográfica.

Para medir el *DAP* de los árboles se utilizó una cinta diamétrica *Forestry Suppliers, Inc.*[®], la altura total se midió con un clinómetro *Suunto*[®] PM-5 360 PC, además de una cinta métrica *MEDID*[®] Flúor de 30 m para la distancia horizontal a la que se tomaría dicha altura (por lo general a 20 m). Se midió también la altura de la copa a partir de la primera ramificación del árbol y hasta la punta de la copa. Además, se calculó la altura del fuste limpio (de la base del árbol hasta el inicio de la copa) con la diferencia entre la altura total y la altura de copa. Asimismo, se obtuvo el diámetro promedio de la copa mediante la brújula incluida en el clinómetro y la cinta métrica de 30 m, siempre al roce tangencial del tronco del árbol y en dirección norte-sur y después este-oeste, ahí se midieron las ramas más largas en ambos sentidos. También se evaluó la copa del árbol en diferentes ángulos para determinar los porcentajes de las variables de copa muerta y copa faltante (Nowak, 2021).

Servicios ecosistémicos y valoración económica

Una vez obtenidos los datos del inventario, se generó una base de datos que fue enviada a la plataforma *i-Tree Eco* v6 para el análisis de los servicios ecosistémicos y valoración económica. *i-Tree Eco* v6 es una plataforma digital desarrollada por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América y es de dominio público (Nowak, 2021). Su configuración es sencilla y compatible con algunas ciudades del país, entre ellas Monterrey, Guadalajara, Ciudad de México y la ciudad de Durango. El *software* utiliza los datos de inventario por especie, información meteorológica y de contaminación atmosférica locales por hora. Después de enviar la información de campo, el servidor regresa el reporte del diagnóstico que contiene las estimaciones de almacenamiento y captura de dióxido de carbono, calidad del aire, control de escorrentía y su valor económico.

Los cálculos se realizaron a través de ecuaciones tomadas de la literatura para cada especie o género (Nowak, 2021); por limitaciones de espacio, estas ecuaciones y procesos de cálculo no se describen aquí, pero están disponibles en el manual y página del servidor (<https://www.itreetools.org/>). En el caso de la valoración económica, el usuario puede añadir datos de precios locales como m³ de agua, kWh y precio de tonelada de CO₂.

Las limitantes que presenta el *software* son que los datos de contaminación atmosférica datan del año 2015, y actualmente puede haber variaciones. Además, no se tienen modelos de valoración económica para la remoción de contaminantes; estos se estiman con métodos empleados en los Estados Unidos de América y el usuario hace la conversión a moneda nacional con base en la paridad del poder adquisitivo de cada país.

Evaluación ambiental y social

Para la evaluación ambiental se consideraron las variables de temperatura y radiación solar. En cada árbol se registraron datos de temperatura al aire libre, con un termómetro digital para interiores y exteriores *Steren*[®] TER-150, con sensor de humedad. Se consideraron dos mediciones para cada árbol: la primera fue tomada bajo la sombra de los árboles y la segunda directamente bajo el sol a la misma hora para observar el cambio de temperatura que causan los árboles individualmente. Las mediciones se hicieron entre las 14:00 y las 17:00 horas, cuando el sol irradia con mayor intensidad (Roque, 2018). El termómetro se colocó sobre la superficie y se esperó a que la temperatura se estabilizara (aproximadamente 15 minutos) en cada punto. Para determinar la radiación solar (Watts m²) interceptada por el follaje de los árboles, se utilizó un solarímetro *Walfront*[®] SM206. Al igual que la temperatura, se consideraron dos mediciones para cada árbol, bajo la sombra del árbol y directamente bajo el sol a la misma hora.

Con el fin de conocer la percepción que tiene la sociedad sobre los árboles longevos y frondosos, se realizó una evaluación social mediante la aplicación de encuestas personales. Se incluyeron beneficios sociales como la recreación, salud mental, provisión de sombra y relevancia histórica, educacional o paisajística. También se incluyeron beneficios ambientales como captura de CO₂, retención de suelo, hábitat para fauna silvestre, regulación microclimática y escurrimiento evitado, además de los riesgos y perjuicios como caída de ramas, tronco débil, raíces expuestas, daños a estructuras permanentes, entre otros. Adicionalmente, se capturaron variables sociodemográficas como nivel de ingresos, educación, edad, etcétera.

La encuesta utilizó una escala de *Likert* (Matas, 2018) de cinco puntos para identificar el grado de conformidad sobre la importancia de estos árboles en la

ciudad: 1 fue el mínimo valor asignado y representa el desacuerdo total y grado de importancia mínimo, y el 5 representa el máximo grado de conformidad y mayor importancia. Se hizo una muestra aleatoria de 20 árboles y en cada uno se encuestó a cinco personas, quienes siempre tuvieron a la vista el árbol.

La información derivada de las encuestas se analizó mediante la técnica estadística de análisis factorial para identificar variables latentes o no observables. El número de variables latentes o factores es, por lo general, menor al número de variables observadas; por lo que esta técnica ayuda también a reducir el número de variables correlacionadas que se observan originalmente. Aquellas que son altamente correlacionadas (positiva o negativamente) pueden estar unidas por los mismos factores y aquellas que no exhiben correlación estarían asociadas por diferentes factores (Méndez y Rondón, 2012). Se aplicó la técnica de rotación *varimax*, la prueba de esfericidad de *Bartlett* y el coeficiente de adecuación muestral de *Kaiser-Meyer-Olkin* para probar la veracidad del análisis factorial (Tabachnick y Fidell, 2013).

Resultados y Discusión

Se ubicaron 83 árboles pertenecientes a ocho taxones diferentes, los cuales fueron: *Eucalyptus* spp. (46.98 %), *Taxodium mucronatum* Ten. (24.09 %), *Populus* spp. (21.68 %), *Schinus molle* L. (2.40 %), *Acer pseudoplatanus* L. (1.20 %), *Casuarina cunninghamiana* Miq. (1.20 %), *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. (1.20 %) y *Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco (1.20 %) distribuidos en parques, plazas, camellones y banquetas de la ciudad. La gran mayoría presentó una condición de salud favorable, sin plagas o enfermedades aparentes. De ellas, solo *Taxodium mucronatum* y *Fraxinus uhdei* son especies nativas de la región. El *DAP* de los

árboles frondosos varió de 80.7 a 315.3 cm, en el que el mayor valor correspondió a *T. mucronatum*. El intervalo de altura total fue de 14.8 y 37.5 m, mientras que los diámetros de copa de 11 hasta 31.4 m (Cuadro 2).

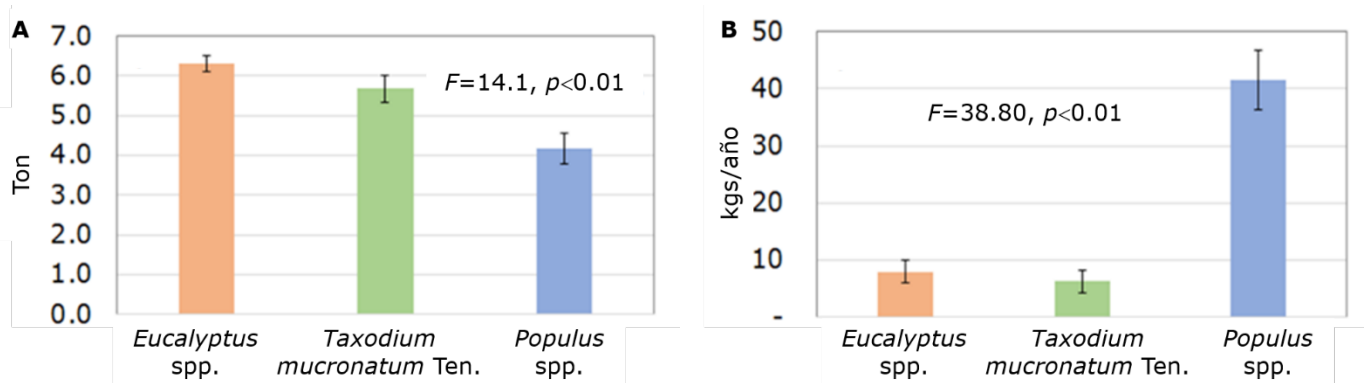
Cuadro 2. Estadísticos descriptivos del inventario forestal de los tres géneros más abundantes de árboles frondosos en la ciudad de Durango.

Género	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación Estándar
Diámetro a la altura del pecho (cm)				
<i>Eucalyptus</i> spp.	103.62	80.7	142.7	16.17
<i>Taxodium</i> spp.	173.05	97.8	315.3	52.27
<i>Populus</i> spp.	110.9	81.0	163.6	22.04
Altura total (m)				
<i>Eucalyptus</i> spp.	25.64	18.4	37.5	4.66
<i>Taxodium</i> spp.	24.88	18.2	29.8	3.12
<i>Populus</i> spp.	21.32	14.8	31.6	4.9
Diámetro de copa (m)				
<i>Eucalyptus</i> spp.	17.21	11.0	26.35	3.59
<i>Taxodium</i> spp.	19.98	14.4	31.38	4.03
<i>Populus</i> spp.	16.7	11.54	23.25	3.2

Solo se incluyen los géneros con más de tres individuos. Las especies con uno o dos individuos fueron *Schinus molle* L., *Acer pseudoplatanus* L., *Casuarina cunninghamiana* Miq., *Fraxinus uhdei* (Wenz.) Lingelsh. y *Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco.

Evaluación de servicios ecosistémicos

De acuerdo con los resultados de *i-Tree*, los árboles frondosos de la ciudad de Durango almacenaron más de 465 t de CO₂ y anualmente secuestran 1 296.1 kg de CO₂ mediante el proceso de fotosíntesis. El cálculo de secuestro de dióxido de carbono bruto por año se realizó considerando el promedio de crecimiento del *DAP* del tronco por año y el índice foliar, así como la condición general de los árboles. Los géneros *Eucalyptus* (6.31 t), *Taxodium* (5.68 t) y *Populus* (4.16 t) presentaron una mayor acumulación de CO₂ debido a que fueron los más abundantes de la muestra. En la Figura 2A se muestran los promedios de almacenamiento por árbol en cada uno de estos géneros.



A = Almacenamiento promedio por género de CO₂; B = Promedio anual de secuestro de CO₂.

Figura 2. Géneros más abundantes (>3 individuos) en la ciudad de Durango.

En cuanto al secuestro anual de CO₂, como se muestra en la Figura 2B, en valores promedio por árbol, el género *Populus* es el que más contribuyó a la eliminación del dióxido de carbono del ambiente (41.43 kg año⁻¹) seguido de *Eucalyptus* (7.98 kg año⁻¹) y *Taxodium mucronatum* (6.27 kg año⁻¹).

En el almacenamiento actual y secuestro anual de CO₂ existieron diferencias significativas entre los géneros. *Populus* registró un menor almacenamiento de dióxido

de carbono, pero su tasa de secuestro anual fue más alta. Las diferencias pueden deberse al índice foliar y capacidad fotosintética que tienen ciertos individuos para convertir la energía solar, el agua y el CO₂ en carbohidratos y, eventualmente, en biomasa (Muraoka *et al.*, 2010; Pompa-García *et al.*, 2023).

El valor de la tonelada de CO₂ está en constante cambio. Para el presente análisis, el precio por tonelada métrica de CO₂ se determinó en MXN \$1 000.00, con base en referencias actualizadas del mercado en el mes de marzo del 2023 (SendeCO₂, 2023). Por lo tanto, a partir de que el valor monetario del almacenamiento y secuestro anual de carbono equivale a 1kg=MXN \$1.00, esto resulta en MXN \$465 204.00 en total y MXN \$1 296.00 por año, respectivamente, para todos los árboles.

Se estimó que la remoción total de contaminantes del aire por los 83 árboles muestreados fue de 588.8 kg anualmente. Los materiales contaminantes más abundantes en el aire y que pueden perjudicar la salud humana son las partículas suspendidas menores de 10 μm (PM₁₀), y los gases como el ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.

En el Cuadro 3 se muestra que la remoción de PM₁₀ en promedio fue mayor en *Eucalyptus* spp. (5 217.4 g), seguido de *Taxodium mucronatum* (4 838.9 g). De acuerdo con el reporte de *i-Tree*, los 83 árboles anualmente interceptan un total de 374 kg de PM₁₀, 85 kg de monóxido de carbono (CO), 89 kg de ozono (O₃), 4.8 kg de dióxido de nitrógeno (NO₂) y 35.4 kg de dióxido de azufre (SO₂). Los gases contaminantes removidos por los árboles frondosos en la ciudad de Durango ascienden a un valor de MXN \$234 262.00.

Cuadro 3. Remoción de contaminantes del aire por los tres géneros más representativos de la muestra de árboles frondosos de la ciudad de Durango.

Género	g año⁻¹ (promedios por género)
---------------	--

	NARB	CO	O₃	NO₂	SO₂	PM₁₀
<i>Eucalyptus</i> spp.	39	1 187.9	1 242.9	67.5	493.1	5 217.4
<i>Taxodium mucronatum</i> Ten.	20	1 101.7	1 152.7	62.6	457.3	4 838.9
<i>Populus</i> spp.	18	660.9	691.6	37.6	274.4	2 903.1

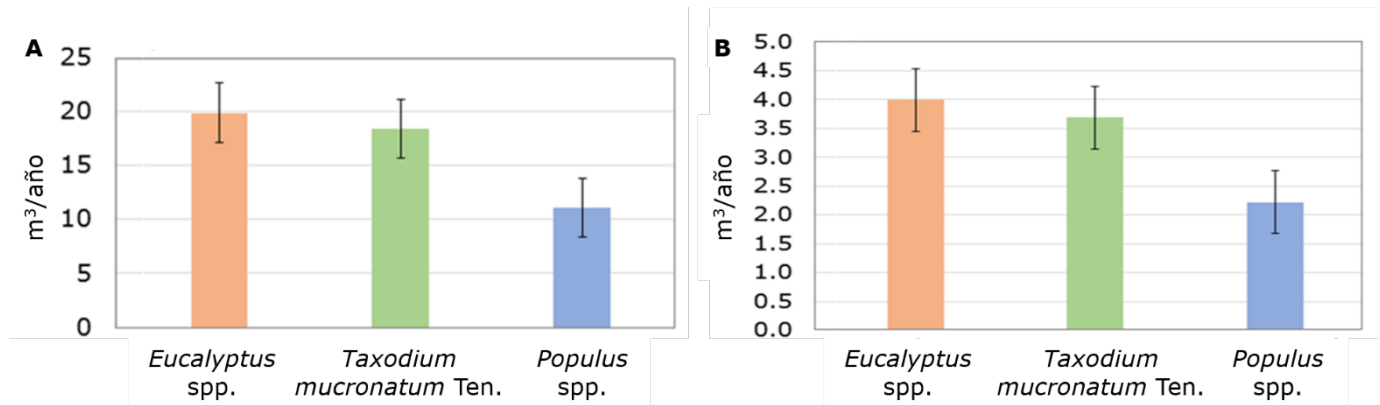
NARB = Número de árboles; *CO* = Monóxido de carbono; *O₃* = Ozono;

NO₂ = Dióxido de nitrógeno; *SO₂* = Dióxido de azufre; *PM₁₀* = Material particulado. Fuente: *i-Tree Eco* (Nowak, 2021).

Se estimó que el valor de sustitución de los árboles frondosos de la ciudad de Durango es aproximadamente de MXN \$23.6 millones. Esta cantidad, se refiere al valor intrínseco de los árboles (Piccolo, 2017); se compone del valor total acumulativo de almacenamiento de CO₂ (MXN \$465 000.00), de los valores funcionales anuales de servicios ecosistémicos como el secuestro de CO₂ (MXN \$1 300.00), el escurrimiento evitado (MXN \$5 190.00) y de la remoción de gases contaminantes del aire (MXN \$234 000.00). La relación entre el valor de sustitución de estos árboles con el *DAP* y la altura total fue positiva.

Los 83 árboles muestreados contribuyeron con 286 m³ por año de escurrimiento evitado; es decir, la porción de la precipitación que se infiltra al subsuelo. Lo anterior representa un beneficio económico de MXN \$5 186.00 por año. Para obtener estos valores, se utilizaron costos al mes de enero del 2023 provenientes de las cuotas y tarifas que aplica la oficina municipal encargada de la gestión del agua potable (Aguas del municipio Durango). También, se emplearon datos de precipitación de la estación meteorológica 10 092 ubicada en la ciudad de Durango. En la Figura 3A se muestran los promedios de agua interceptada por *Eucalyptus* spp. (19.84 m³ año⁻¹) y *Taxodium mucronatum* (18.41 m³ año⁻¹); no se observaron diferencias significativas entre ambos géneros en comparación con *Populus* spp. (11.05 m³ año⁻¹). En la Figura 3B se ilustran los promedios del escurrimiento pluvial evitado por *Eucalyptus* spp. (3.99 m³ año⁻¹), *Taxodium mucronatum* (3.69 m³ año⁻¹) y *Populus* spp. (2.22 m³

año⁻¹). Este último presentó diferencias significativas con los otros dos géneros ($F=13.3$, $p<0.01$).



A = Promedio de agua interceptada en m³; B = Promedio de escurrimiento evitado en m³.

Figura 3. Géneros más abundantes de la muestra en la ciudad de Durango.

En relación al efecto de las copas de los árboles con la radiación y temperatura ambiental, se identificó una diferencia grande entre los datos registrados bajo el dosel de los árboles y los que se tomaron directamente bajo el sol. En cuanto a la radiación, el intervalo fue de 400 a 1 200 Wm². La temperatura osciló de 6 a 20 °C; contraste que se reflejó en el entorno inmediato del árbol. Entre más abundante fue el follaje, menos radiación llegó el suelo, y por ende se redujo la temperatura. Los resultados coinciden con otros estudios que evaluaron diferencias en la temperatura. Borelli *et al.* (2018) señalan que en las superficies con sombra se registran temperaturas desde 11 a 25 °C más frescas que las de lugares expuestos al sol.

Resultados de las encuestas

El análisis factorial reveló tres factores importantes, que en conjunto acumularon 83 % de la variación total. El primer factor (perjuicios o *disservices*, por su definición en inglés) incluyó variables como ramas y tronco débiles, raíces expuestas y daños a infraestructura, y registró 42.8 % de la variación; el segundo (beneficios) incluyó variables como recreación, sombra y salud mental, y acumuló 32.1 % de la variación total; y el tercero (valor de existencia) en el que se integraron variables como presencia, cobertura y distribución en la ciudad, con 8.4 %. Las puntuaciones provenientes de cada factor sugieren que las personas encuestadas atribuyen ligeramente una mayor importancia a los perjuicios que a los beneficios que los árboles representan. Sin embargo, la prueba de *t-student* no evidenció diferencias significativas entre los dos factores ($t=1.81$, $p=0.09$).

A través del análisis de varianza de una vía se evaluó si la ubicación geográfica de los árboles es un indicador clave para expresar sus percepciones a través de las puntuaciones factoriales de cada bloque. El análisis mostró que únicamente en el caso de los perjuicios hubo diferencias significativas en cuanto a la percepción individual ($F=4.07$, $p=0.023$).

Los árboles en la zona centro de la ciudad tuvieron valores cercanos a cero, mientras que los de la periferia otorgaron valores negativos. Es decir, los perjuicios de los árboles fueron menos notorios en la periferia de la ciudad que en la zona céntrica. Esto puede deberse a que están más dispersos, en menor cantidad y con menos daños a la infraestructura.

Comparación con otros estudios

Existen pocos estudios que han descrito la importancia de este tipo de árboles dentro y fuera de México mediante metodologías similares. Benegas *et al.* (2021) determinaron que los árboles de Turrialba, Costa Rica generan más de US \$60 000 al año por su valor de existencia y secuestro de carbono. Uno de los primeros casos de aplicación de *i-Tree Eco* en México para la evaluación de árboles urbanos, se realizó en la ciudad de Mérida, Yucatán (de la Concha *et al.*, 2017); en dicho estudio los autores concluyeron que el diámetro promedio de los 2.3 millones de árboles evaluados fue de 13 cm, los cuales secuestran alrededor de 16 637 t año⁻¹ y su valor económico se estimó en US \$2.5 millones por año. Martínez-Trinidad *et al.* (2021), en su estudio sobre el arbolado urbano de la ciudad de Texcoco, Estado de México, realizado con la plataforma *i-Tree*, refirieron que de los 391 árboles de diferentes tamaños que se evaluaron su valor económico total fue de MXN \$269 481.00, y MXN \$875.00 por árbol (precios actualizados a mayo 2023). Los datos promedio de esos árboles fueron *DAP*=25.3 cm, altura total=8 m y diámetro de copa=3.7 m. Al comparar los resultados de Martínez-Trinidad *et al.* (2021) con el valor obtenido de aproximadamente MXN \$8 505.00 por árbol para la ciudad de Durango, se evidencia que el valor de los árboles frondosos de esta ciudad es casi 10 veces mayor que los evaluados en Texcoco.

Los resultados de la presente investigación sugieren que la densidad y diversidad de especies de árboles frondosos en la ciudad de Durango es baja, comparada con otras urbes de México. En la ciudad de Durango se observaron 83 árboles frondosos pertenecientes a ocho géneros diferentes en casi 9 200 ha, lo que arroja una densidad muy baja. Los taxones más frecuentes fueron: *Eucalyptus* spp., *Taxodium mucronatum* y *Populus* spp. El clima y ubicación geográfica son factores que no solo limitan la cantidad y diversidad de especies arbóreas, sino su capacidad fotosintética, acumulación de carbono y productividad (Pompa-García *et al.*, 2023).

Leal *et al.* (2018) registraron en la ciudad de Linares, Nuevo León un total de 41 especies de arbolado urbano, donde los individuos con *DAP* mayor a 80 cm tuvieron una densidad de 13 individuos por hectárea.

Jim (2018) indican que el estudio de los árboles frondosos puede contribuir a generar conciencia de los beneficios que generan para la sociedad, a obtener apoyo para incrementar su número en lugares apropiados y a mejorar su manejo. Villanueva *et al.* (2010) estimaron que un árbol de este tipo (particularmente *Taxodium mucronatum*) tarda al menos 200 años en llegar a la categoría de árbol frondoso. En ese tiempo, son muchos los beneficios que se obtienen, y muchas veces no es posible reemplazarlos con individuos jóvenes. Por ello, es importante identificar aquellos árboles que pueden tratarse como frondosos o patrimoniales y colocar registros que detallen sus características fisonómicas y, en su caso, la historia asociada con eventos sociales. Su difusión en redes sociales o medios afines, también ayudan a su conservación.

Conclusiones

Se hizo una evaluación de los árboles frondosos (o patrimoniales) en la ciudad de Durango, Durango. Los árboles frondosos de esta ciudad secuestran alrededor de 1.3 toneladas de CO₂ por año, interceptan alrededor de 375 kg de PM₁₀ y su valor de sustitución se estima en MXN \$23.6 millones. Existe una densidad de árboles frondosos muy baja, razón por la cual es importante hacer este tipo de estudios y fomentar la presencia de esos ejemplares. Se concluye que es fundamental el cuidado y promoción de estos árboles, se deben resaltar sus beneficios e identificar áreas que propicien su desarrollo, sin afectar la infraestructura urbana y sin generar

daños a la población. *i-Tree Eco* es una herramienta que ayuda a la cuantificación de los servicios ecosistémicos que proveen los árboles urbanos y su contribución económica al bienestar de la población.

Agradecimientos

La primera autora agradece al Conahcyt por la beca otorgada para realizar los estudios de Maestría. Un reconocimiento a la colaboración de Mariana Cruz Guereca y Guadalupe Villarreal Name en la toma de datos y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo económico en el desarrollo del proyecto.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Contribución por autor

Martha Gabriela Pérez Martínez: planeación y seguimiento del proyecto, toma de datos de campo, análisis de datos y revisión del manuscrito; Gustavo Pérez Verdín: dirección y seguimiento, análisis de datos y redacción del manuscrito; Pablito Marcelo López Serrano: análisis espacial, revisión de datos y redacción del manuscrito.

Referencias

Anderson, N. T. and G. B. Marchisio. 2012. WorldView-2 and the evolution of the DigitalGlobe remote sensing satellite constellation: Introductory paper for the special session on WorldView-2. In: Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) (Comp.). Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery XVIII. SPIE. Baltimore, MD, United States of America. pp. 8093-8100.

Arango S., J. F., C. J. Pacheco F. y L. A. Vargas M. 2023. Valoración económica de los servicios ecosistémicos: una revisión sistemática. *Revista Venezolana de Gerencia* 28(103):948-964. Doi: 10.52080/rvgluz.28.103.3.

Benegas N., L., A. Rojas, A. Iraheta y J. Cárdenas. 2021. Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica. *Ecosistemas* 30(2):2083. Doi: 10.7818/ECOS.2083.

Blancarte-Siqueiros, R. H., G. Perez-Verdin and A. Cortes-Ortíz. 2020. The relationship between quality of life, sense of belonging, and green spaces in urban environments in the city of Durango, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 26(1):97-111. Doi: 10.5154/r.rchscfa.2019.03.023.

Borelli, S., M. Conigliaro y F. Pineda. 2018. Los bosques urbanos en el contexto global. *Unasyuva: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales* 69(250):3-10. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7455599>. (30 de julio de 2023).

Comisión Nacional del Agua (Conagua). 2014. Programa de medidas preventivas y de mitigación de la sequía 2014 para la ciudad de: Victoria de Durango, Durango. Conagua. Victoria de Durango, Dgo., México. 91 p. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/99854/PMPMS_Victoria_de_Durango_Dgo.pdf. (20 de agosto de 2023).

de la Concha, H., L. Roche C. y A. García B. 2017. Inventario del arbolado urbano de la Ciudad de Mérida. Ayuntamiento de Mérida 2018-2021. Mérida, Yuc., México. 57 p. http://www.merida.gob.mx/sustentable/contenidos/doc/inventario_arbolado_merida.pdf. (15 de junio de 2020).

- Granados-Espíndola, J., J. G. Gutiérrez-Cedillo y L. M. Espinoza-Rodríguez. 2022. Calidad visual del paisaje y servicios ecosistémicos en áreas verdes urbanas. Una visión sistémica. *Quivera* 24(2):111-131. Doi: 10.36677/qret.v24i2.19334.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). 2021. Panorama sociodemográfico de Durango 2020: Censo de Población y Vivienda 2020. Inegi. Aguascalientes, Ags., México. 99 p. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197834.pdf. (28 de agosto de 2023).
- Jim, C. Y. 2018. Protección de árboles patrimoniales en entornos urbanos y periurbanos. *Unasylva: Revista Internacional de Silvicultura e Industrias Forestales* 69(250):66-74. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7455607>. (30 de julio de 2023).
- Leal E., C. E., N. Leal E., E. Alanís R., M. Á. Pequeño L., A. Mora-Olivo y E. Buendía R. 2018. Estructura, composición y diversidad del arbolado urbano de Linares, Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(48):252-270. Doi: 10.29298/rmcf.v8i48.129.
- Martínez-Trinidad, T., P. Hernández L., S. F. López-López y L. Mohedano C. 2021. Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante *i-Tree Eco*. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 12(67):202-230. Doi: 10.29298/rmcf.v12i67.880.
- Matas, A. 2018. Diseño del formato de escalas tipo Likert: un estado de la cuestión. *REDIE Revista Electrónica de Investigación Educativa* 20(1):38-47. Doi: 10.24320/redie.2018.20.1.1347.
- Mejorado V., N. A., J. L. Romo L., A. Villanueva M. y A. M. Borja de la R. 2020. Evaluación de la monumentalidad de árboles urbanos en México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 11(60):4-25. Doi: 10.29298/rmcf.v11i60.719.
- Méndez M., C. y M. A. Rondón S. 2012. Introducción al análisis factorial exploratorio. *Revista Colombiana de Psiquiatría* 41(1):197-207. Doi: 10.1016/S0034-7450(14)60077-9.

- Muraoka, H., N. Saigusa, K. N. Nasahara, H. Noda, ... and H. Koizumi. 2010. Effects of seasonal and interannual variations in leaf photosynthesis and canopy leaf area index on gross primary production of a cool-temperate deciduous broadleaf forest in Takayama, Japan. *Journal of Plant Research* 123:563-576. Doi: 10.1007/s10265-009-0270-4.
- Nelson, S. A. C. and S. Khorram. 2018. Image processing and data analysis with ERDAS IMAGINE®. CRC Press. Boca Raton, FL, United States of America. 350 p.
- Nowak, D. J. 2021. Understanding i-Tree: 2021 Summary of programs and methods. United States Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station. Madison, WI, United States of America. 100 p.
- Piccolo, J. J. 2017. Intrinsic values in nature: Objective good or simply half of an unhelpful dichotomy? *Journal for Nature Conservation* 37:8-11. Doi: 10.1016/j.jnc.2017.02.007.
- Pickett, S. T. A., M. L. Cadenasso, J. M. Grove, C. G. Boone, ... and P. Warren. 2011. Urban ecological systems: Scientific foundations and a decade of progress. *Journal of Environmental Management* 92(3):331-362. Doi: 10.1016/j.jenvman.2010.08.022.
- Pompa-García, M., E. D. Vivar-Vivar, E. A. Rubio-Camacho and J. J. Camarero. 2023. Rates of stemwood carbon accumulation are linked to hydroclimate variability in Mexican conifers. *Forests* 14(7):1381. Doi: 10.3390/f14071381.
- Richards, J. A. 2013. Remote Sensing digital image analysis: An introduction. Springer Berlin. Heidelberg, BW, Germany. 494 p.
- Roque S., O. J. 2018. Estudio de la incidencia de los rayos ultravioletas (UV) en la localidad de Ayacucho-sus consecuencias. *Investigación* 26(2):151-163. Doi: 10.51440/unsch.revistainvestigacion.2018.2.94.
- Roy, S., J. Byrne and C. Pickering. 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry & Urban Greening* 11(4):351-363. Doi: 10.1016/j.ufug.2012.06.006.

- Sistema Europeo de Negociación de CO₂ (SendeCO₂). 2023. Precios CO₂ (2023). SendeCO₂. <https://www.sendeco2.com/es/precios-co2>. (23 de agosto de 2023).
- Song, P., G. Kim, A. Mayer, R. He and G. Tian. 2020. Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i-Tree Eco. *Sustainability* 12(4):1630. Doi: 10.3390/su12041630.
- Tabachnick, B. G. and L. S. Fidell. 2013. *Using multivariate statistics*. Pearson Education. Upper Saddle River, NJ, United States of America. 983 p.
- Troy, A., J Morgan G. and J. O'Neil-Dunne. 2012. The relationship between tree canopy and crime rates across an urban-rural gradient in the greater Baltimore region. *Landscape Urban Planning* 106(3):262-270. Doi: 10.1016/j.landurbplan.2012.03.010.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D. W. Stahle, V. Constante G., ... y J. de D. Benavides S. 2010. Árboles longevos de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(2):7-29. Doi: 10.29298/rmcf.v1i2.634.



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.