



# Valoración económica de los **servicios ecosistémicos** de cuatro sistemas forestales **periurbanos** a través de i-Tree Eco

Economic valuation of ecosystem services of four peri-urban forest systems through i-Tree Eco

Liborio González-Hernández<sup>1</sup>, José Luis Romo-Lozano<sup>1\*</sup>, David Cristóbal-Acevedo<sup>2</sup>,  
Miguel Ángel Martínez Damian<sup>1</sup> y Leopoldo Mohedano Caballero<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Económico-Administrativas. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

<sup>2</sup> Universidad Autónoma Chapingo. Departamento de Suelos. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma Chapingo. División de Ciencias Forestales. Texcoco de Mora, Estado de México, México.

\* Autor de correspondencia. jlromo@aya.yale.edu

## RESUMEN

La presión urbana sobre los recursos forestales que conforman la estructura verde de los asentamientos humanos pone en riesgo la provisión de los servicios ecosistémicos y su funcionamiento. El objetivo de esta investigación fue estimar el valor económico de cinco servicios ecosistémicos que ofrece la estructura verde de cuatro sistemas forestales periurbanos en Tequexquináhuac, Texcoco de Mora, Estado de México. Se realizó un censo y análisis económico para cada sistema utilizando el programa i-Tree Eco. Se determinó una población arbórea de 276 individuos dentro de los cuatro sistemas forestales periurbanos, se comprobó que estos almacenan 13.04 toneladas de carbono con un valor de MXN 48 166; y que los valores funcionales anuales del arbolado periurbano evaluado proporcionaron: captura de carbono de 690.26 kg año<sup>-1</sup> (MXN 2545); escurrimiento evitado 74.95 kg año<sup>-1</sup> (MXN 3144); eliminación de la contaminación 58.94 kg año<sup>-1</sup> (MXN 136 100); producción de oxígeno 1840.7 kg año<sup>-1</sup>; y un costo de replazo conjunto de MXN 1 086 000. Los resultados demuestran que los servicios ecosistémicos generados por la estructura verde de los cuatro sistemas forestales periurbanos brindan un servicio tangible en el desarrollo ambiental, económico y social del asentamiento urbano.

**PALABRAS CLAVE:** almacén de carbono, captura de carbono, costo de replazo, eliminación de contaminantes, escurrimiento evitado, producción de oxígeno.

## ABSTRACT

Urban pressure on forest resources that make up the green structure of human settlements jeopardizes the provision of ecosystem services and their functioning. The objective of this research was to estimate the economic value of five ecosystem services provided by the green structure of four peri-urban forest systems in Tequexquináhuac, Texcoco de Mora, State of Mexico. A census and economic analysis were carried out for each system using the i-Tree Eco program. A tree population of 276 individuals was determined within the four peri-urban forest systems; it was found that they store 13.04 tons of carbon with a value of MXN 48 166 and that the annual functional values of the peri-urban trees evaluated provided: carbon capture of 690.26 kg year<sup>-1</sup> (MXN 2545); avoided runoff 74.95 kg year<sup>-1</sup> (MXN 3144); pollution removal 58.94 kg year<sup>-1</sup> (MXN 136 100); oxygen production 1840.7 kg year<sup>-1</sup>; and a joint replacement cost of MXN 1 086 000. The results show that the ecosystem services generated by the green structure of the four peri-urban forest systems provided a tangible service in the urban settlement's environmental, economic, and social development.

**KEYWORDS:** carbon storage, carbon sequestration, replacement cost, pollution removal, avoided runoff, oxygen production.

## INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos (SE) engloban todos los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas, abarcando procesos físicos, químicos y biológicos que son fundamentales para el desarrollo humano, ya que proporcionan materia prima y energía utilizada en diversas actividades (Pardo et al. 2022; Young, 2010). La dependencia del bienestar que otorgan los SE está justificada principalmente en la obtención y generación de alimentos, agua, regulación del clima, satisfacción espiritual y el placer estético (Fisher et al. 2009).

Los asentamientos urbanos como espacios con gran concentración de actividades humanas despiertan el interés de los investigadores por los componentes esenciales de su estructura verde, ambiental, social y económica (Kim et al. 2015; Pérez y López, 2015). La sostenibilidad de los SE se determina, principalmente, por los efectos que las actuales prácticas de producción y consumo ejercen sobre el medio ambiente, y que también está influenciada por las interacciones con diversos grupos sociales (Hernández, 2009).

La salud, aprovechamiento e interacción de los bosques urbanos y periurbanos con los componentes bióticos y abióticos influye directa e indirectamente en la calidad de vida y bienestar humano (Riondato et al. 2020), aunque en algunos casos existe una sobreexplotación de estos recursos amenazados por las actividades antrópicas que avanzan de forma descontrolada (Aguirre et al. 2018; Benavides y Fernández, 2012).

Los ecosistemas urbanos y periurbanos generalmente son analizados por el impacto que generan a los ecosistemas y a su biodiversidad, sin embargo, el paisaje se vuelve intermediario entre la naturaleza y los seres humanos (Nassauer, 2012). Aunque el impacto de los asentamientos urbanos es significativo en los ecosistemas, aun así, se pueden definir estrategias de acción aplicando los conceptos de biodiversidad y manejo sustentable al arbolado urbano y periurbano (Liu y Opdam, 2014).

Los principales servicios ecosistémicos se clasifican en las categorías provisión, regulación, prevención y servicios culturales, dependiendo de la vinculación de cada

componente con el valor social que se le puede atribuir (Cheng Zhang et al. 2022; Haines y Potschin, 2018). Con estos se abastece el bienestar de los seres humanos; sin embargo, aunque esta generación de servicios ecosistémicos es dinámica, comprender cómo se relacionan entre sí representa un gran reto social, económico y ambiental para con ello mejorar la capacidad de gestionar los recursos de manera sostenible (Bennett et al. 2009).

Dado el valor intrínseco de la naturaleza, resulta complejo determinar los servicios ecosistémicos de la estructura verde urbana y periurbana (Camacho y Ruiz, 2012); sin embargo, los avances en integración de variables, cada vez más específicas en modelos de programas de cómputo, contribuyen a que se tenga una integración de elementos antes no considerados dentro de los sistemas y sus relaciones (Sahagún et al. 2020). Por ejemplo, i-Tree Eco es un programa diseñado para resolver a través de variables específicas la relación y participación de desarrollo del medio ambiente, la sociedad y la economía (Lin et al. 2020).

El software i-Tree Eco fue diseñado por el Departamento del Servicio Forestal de los Estados Unidos de América. Se utiliza para evaluar las condiciones de sistemas forestales urbanos que proveen servicios ambientales, económicos y sociales a un determinado núcleo urbano, y se caracteriza por ser un programa específico e integrador de variables no frecuentemente estudiadas (Baró et al. 2015; Graça et al. 2018).

El programa permite hacer una caracterización de la estructura del bosque urbano, además de cuantificar y valorar los servicios ambientales que estos proveen al asentamiento contiguo, indicando una influencia en términos económicos, sociales y ambientales (Benavides y Fernández, 2012). El software i-Tree Eco, originalmente diseñado para bosques urbanos, brinda una gama de posibilidades y maneras de complementar su funcionamiento. En esta investigación se utilizó como complemento el análisis del flujo promedio del viento sobre la cuenca del Valle de México registrado en las estaciones meteorológicas de la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (R.A.M.A) (Jáuregui y Luyando, 1992). Con ello fue posible



demostrar la presencia de contaminación procedente de la cuenca baja del Valle de México, a pesar de que este asentamiento se encuentra ubicado a una distancia aproximada de 25 km de los sistemas evaluados, destacando con ello la importancia de su valoración.

## OBJETIVOS

El objetivo de esta investigación fue estimar el valor económico de los servicios ecosistémicos generados por cuatro sistemas forestales que componen la estructura verde periurbana de Tequexquínahuac, Texcoco de Mora, Estado de México, a través de i-Tree Eco. Dichos servicios corresponden a almacén de carbono, captura de carbono, costo de remplazo, eliminación de contaminantes, escurrimiento evitado y producción de oxígeno.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en cuatro sistemas forestales periurbanos localizados dentro del predio forestal denominado Las Cruces, en la parte media de la cuenca del Río Chapingo al suroeste del poblado de Tequexquínahuac, municipio de Texcoco, Estado de México, a 2 km del asentamiento urbano principal, a 8.5 km de Texcoco y a 25 km de Ciudad de México. El predio cuenta con una superficie de 326 ha, en un área delimitada por las coordenadas 19°27'50.55" a 19°27'6.54" de latitud norte y 98°49'34.65" a 98°48'3.54" de longitud oeste, con características representativas de las condiciones de los bosques periurbanos circundantes.

El clima predominantemente es C(w1) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2020) templado subhúmedo, aunque notoriamente con una cobertura vegetal no característica de este clima, debido a reforestaciones con especies no nativas, con una temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C; y una precipitación anual promedio de 613.2 mm. El suelo se caracteriza por ser toba volcánica formada por acumulación de cenizas volcánicas en erupciones piroclásticas.

La masa forestal descrita anteriormente cuenta con características heterogéneas, por ello, se consideró evaluar cuatro sistemas representativos del sitio, las diferencias de estructura resaltan, debido a las condiciones de microclima generadas por el tipo de cobertura vegetal, así como por las condiciones de la presión humana ejercida sobre el predio.

Se seleccionaron cuidadosamente características representativas de los sitios propuestos, la principal base de la selección se centró en la presencia y abundancia de vegetación arbórea dominante, así como en la degradación del suelo y el número de individuos presentes en cada sitio. Estas variables fueron elegidas con el propósito de asegurar que el análisis de la estructura resultante fuera representativo y aplicable en todo el predio. De esta manera, se garantiza que los resultados obtenidos sean generalizables y reflejen fielmente la realidad del área en estudio para una extrapolación de resultados dentro del predio y bosques próximos al asentamiento.

### Generalidades características de cada sitio

#### *Sistema 1*

El sistema cuenta con una superficie de 2056 m<sup>2</sup>; una cobertura vegetal  $\leq 45\%$ ; su estrato arbóreo está conformado por: *Casuarina equisetifolia* L., *Buddleja cordata* Kunth y *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., además de algunos arbustos destacados como *Senecio salignus* DC y *Symphoricarpos microphyllus* Kunth, caracterizándose por encontrarse en agrupaciones localizadas en los sistemas. El suelo presenta tres clases de textura, franca, franca arcillosa y franca arcillosa arenosa, este sistema se caracteriza por tener cárcavas generadas por la escorrentía y la falta de cobertura vegetal media y baja.

#### *Sistema 2*

Este sistema destaca por la dominancia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh, con alta densidad de copa y cobertura superficial de materia orgánica en proceso de descomposición, bajo la presencia de este tipo de vegetación en el suelo sigue predominando la tova volcánica de color café

amarillento y clases de textura franco-arcillosa, franca y franco arcillo arenosa, predominando esta última.

Dentro de los 2676 m<sup>2</sup> con los que cuenta el sistema de superficie, las principales especies encontradas son *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Cupressus lusitanica* Mill. Además de arbustos; *Senecio salignus* DC y *Symphoricarpos microphyllus* Kunth, pero con una representatividad  $\leq 60\%$  total de la superficie del sistema.

### Sistema 3

Las principales especies arbóreas presentes son: *Cupressus lusitanica* Mill, *Arbutus sp* y *Pinus montezumae* Lamb., que a lo largo del tiempo han sido introducidas y han conformado una diversidad no representativa del sitio. Este sistema presenta una superficie de 605 m<sup>2</sup> con cobertura vegetal  $\leq 23\%$ . El suelo presenta textura franca arcillosa, es decir, suelos ligeramente pegajosos y plásticos durante la presencia de precipitación y que endurecen al secar. Además, presenta degradación significativa por la influencia humana ocasionada, principalmente, por deforestaciones, pastoreo e incluso manipulación de estructura de suelo para prácticas de siembra, lo que representa la condición de mayor intervención y deterioro del predio.

### Sistema 4

Se caracteriza por la presencia de *Cupressus lusitanica* Mill., *Pinus montezumae* Lamb. y *Arbutus sp.* dentro de los 1435 m<sup>2</sup>, además de un bajo porcentaje de cobertura  $\leq 27\%$ . El suelo se caracteriza por presentar textura franca y franco arcillo arenosa, predominando esta última ( $\geq 70\%$  de la superficie). Este sistema representa las condiciones con mayor estabilidad, abundante cobertura vegetal y posiblemente la representatividad del predio con menor interacción humana.

### Obtención de datos

En el periodo junio-diciembre de 2022 se realizó el levantamiento de la información en los cuatro sistemas forestales periurbanos, esto de acuerdo con el manual de toma de datos de i-Tree Eco, que pide determinar el número total de individuos arbóreos que generan la

interacción con cada uno de los sistemas, identificar botánicamente el total de las especies para cada sistema y generar una base de datos codificada para que la identifique el software.

Las variables que se midieron fueron: diámetro normal (cm) con forcípula *Haglöf Sweden AB*, diámetro de la copa (m) con longímetro, en dos direcciones, norte-sur y este-oeste, altura total (m) con altímetro *Haga*, altura de fuste limpio (m) y altura de copa viva solo para árboles con diámetro mayor a 2.5 cm. También se estimó el porcentaje de copa faltante de cada individuo, haciendo referencia a la “perfección cónica” del árbol, el porcentaje de muerte progresiva y la exposición que tiene cada ejemplar a la luz durante todo el día; en total se registraron 276 árboles en los cuatro sistemas.

### Cómputo de datos dasométricos de los sistemas forestales periurbanos

Una vez que se determinaron las variables necesarias para la aplicación del software i-Tree Eco en hojas de cálculo y que se verificó la calidad de los datos mediante la prueba en “RStudio” Shapiro-Wilk para comprobar su normalidad, se determinaron los siguientes servicios ecosistémicos (SE): almacenamiento de carbono, secuestro de carbono, eliminación de la contaminación, producción de oxígeno y escurrimiento evitado.

Las estimaciones específicas para cada uno de los SE analizados están determinadas por elementos de análisis propios de i-Tree Eco y por los precios estandarizados para cada uno de los servicios determinados en el periodo de aplicación de la presente investigación (2022), en este caso se consideró lo siguiente:

### Estimación de la contaminación eliminada

El Software i-Tree Eco estima captura de contaminantes, así como el valor asociado y el mejoramiento en la calidad del aire del bosque periurbano.

El flujo de contaminantes ( $F$ , g m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) se estima como:

$$F = Vd \times C$$



donde:

$V_d$ : velocidad de deposición ( $m\ s^{-1}$ )

$C$ : concentración de contaminante ( $g\ m^{-3}$ )

El valor de la eliminación de los contaminantes se calculó con base en los precios por kilogramo, establecidos para México en 2022; el precio del monóxido de carbono (CO) fue de MXN 32  $kg^{-1}$  (los montos mencionados en este artículo corresponden al tipo de cambio promedio, para el año 2022, de MXN 20.12 por dólar estadounidense [USD]); el del ozono ( $O_3$ ), MXN 1223  $kg^{-1}$ ; del dióxido de sulfuro ( $SO_2$ ), MXN 66  $kg^{-1}$ ; del dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), MXN 182  $kg^{-1}$ ; del material particulado menor a 2.5 micrones ( $PM_{2.5}$ ), MXN 42 460  $kg^{-1}$ ; y del material particulado ( $PM_{10}$ ), MXN 502  $kg^{-1}$ .

### Almacenamiento de carbono y secuestro de carbono

Para su cálculo fue necesario obtener la biomasa de cada árbol a través de ecuaciones alométricas disponibles en la literatura como referentes para los datos de los árboles medidos de los cuatro sistemas y ya contenidas dentro de i-Tree Eco.

Para calcular la cantidad bruta de carbono secuestrado anualmente, se añadió el crecimiento promedio del diámetro del género correspondiente y la clase diamétrica y condición del arbolado al diámetro existente del mismo (año  $x$ ) para calcular el diámetro del árbol y el almacenamiento de carbono en el año  $x + 1$ .

Para este análisis, los valores de almacenamiento y secuestro de carbono se calcularon en MXN 3688 por tonelada.

### Producción de oxígeno

La cantidad de oxígeno producido se estima por i-Tree Eco a partir del cálculo de secuestro de carbono, asignando un valor de la producción de oxígeno por tonelada, donde la liberación neta de  $O_2$  ( $kg/año$ ) es igual al secuestro neto de carbono ( $kg/año$ ).

### Escurrecimiento evitado

Para designar el valor del escurrecimiento se utilizó el promedio nacional para Estados Unidos y se convirtió al tipo de cambio local con tasas definidas. Para este análisis, el precio estimado fue de MXN 4.91  $m^3$ .

### Valor de sustitución

El cálculo de los valores de sustitución está basado en los procedimientos de valoración del Consejo de Tasadores de Árboles y el Paisaje de los EE. UU., que usa la información de especie, diámetro, condición y lugar del árbol incluidos en el análisis principal de i-Tree Eco (Nowak y Aevermann, 2019; Nowak et al. 2019).

## RESULTADOS

Fueron evaluados un total de 276 árboles; entre estos se observó una predominancia de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh., además de *Cupressus lusitanica* Mill. Al desglosar por especies, se encontró que *E. camaldulensis* Dehnh., representa 63% de los árboles registrados, seguido de *C. lusitanica* Mill., con 21.7% y *Arbutus sp.* con 5.8%.

La cobertura foliar de los cuatro sistemas representa 54.15% del total de superficie evaluada (6817  $m^2$ ), y proporcionan 1.69 ha del área de cobertura de hojas. Las especies que dominan en términos de área foliar son *C. lusitanica* Mill., *E. camaldulensis* Dehnh. y *P. montezumae* Lamb. El valor de importancia (VI) se calcula a partir del porcentaje de la población y el área foliar. Sin embargo, valores altos de VI no necesariamente indican una mejora para el sitio, simplemente reflejan que estas especies dominan actualmente la estructura del bosque urbano (Tabla 1).

Para la eliminación de contaminantes, los sistemas evaluados mostraron una marcada eficiencia para erradicar el ozono. Los árboles en dichos sistemas contribuyeron a neutralizar cerca de 58.94  $kg\ año^{-1}$  de diversos contaminantes como  $O_3$ , CO,  $NO_2$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  y  $SO_2$ . El costo económico derivado de esta purificación del aire se estima en MXN 22 700, MXN 39 100, MXN 55 500 y MXN 18 800 para cada uno de los sistemas, respectivamente (Fig. 1).

Durante el año 2022, en los cuatro sistemas, los árboles liberaron aproximadamente 46.22 kg de compuestos orgánicos volátiles (COV): 25.05 kg de isopreno y 21.17 kg de monoterpenos. La monitorización de estos COV es vital, dado su papel determinante en la generación de ozono atmosférico.

Se evidencia que la eliminación de contaminantes varió significativamente según las estaciones del año. Durante las

épocas frías, los índices de eliminación de contaminación fueron inferiores en comparación con la primavera y el verano (Fig. 2). Este patrón es notable en O<sub>3</sub>, CO y PM<sub>2.5</sub>, mostrando mínimas fluctuaciones. Sin embargo, hay un marcado incremento en las cantidades eliminadas de PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> para dichos periodos.

TABLA 1. Valores de importancia de las especies arbóreas registradas en cuatro sistemas forestales periurbanos en Tequexquináhuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

Nombre de la especie	Porcentaje población	Porcentaje del área de hojas	Valor de importancia
<i>Eucalyptus camaldulensis</i> Dehnh	63	39.7	102.8
<i>Cupressus lusitanica</i> Mill	21.7	45.8	67.5
<i>Pinus montezumae</i> Lamb	5.1	9	14.1
<i>Arbutus</i> sp.	5.8	3.7	9.5
<i>Buddleja cordata</i> Kunth	1.8	1.4	3.2
<i>Casuarina equisetifolia</i> L	2.5	0.4	2.9

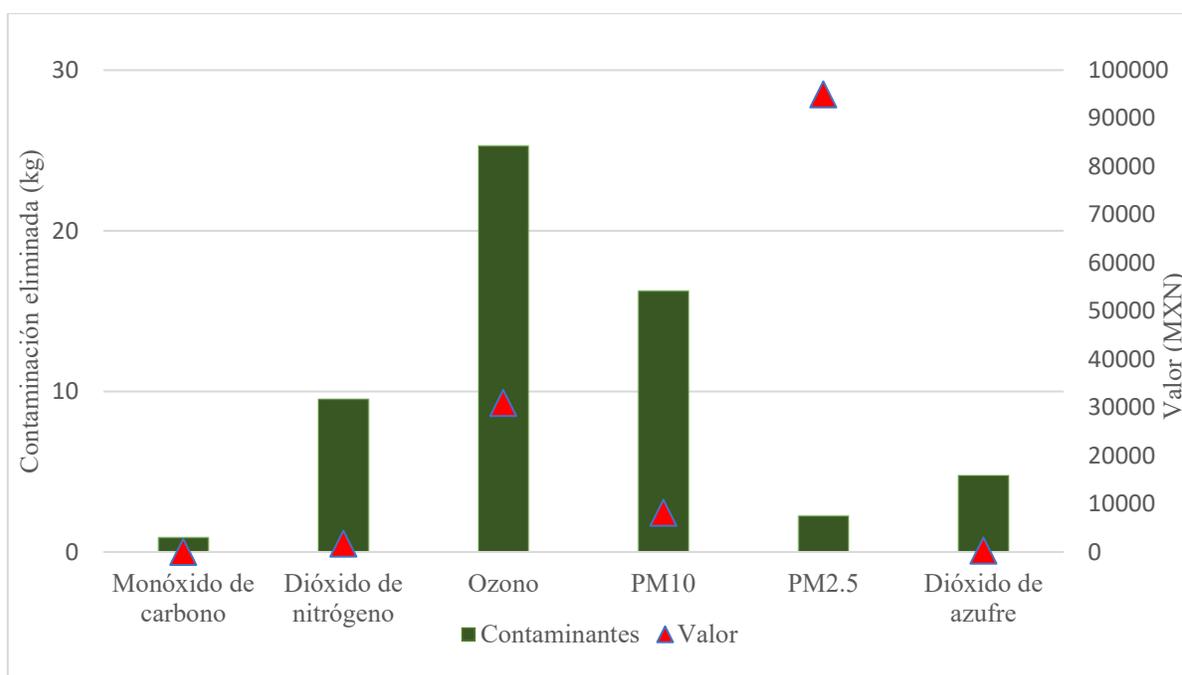


FIGURA 1. Eliminación anual de contaminación de los cuatro sistemas periurbanos evaluados en Tequexquináhuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

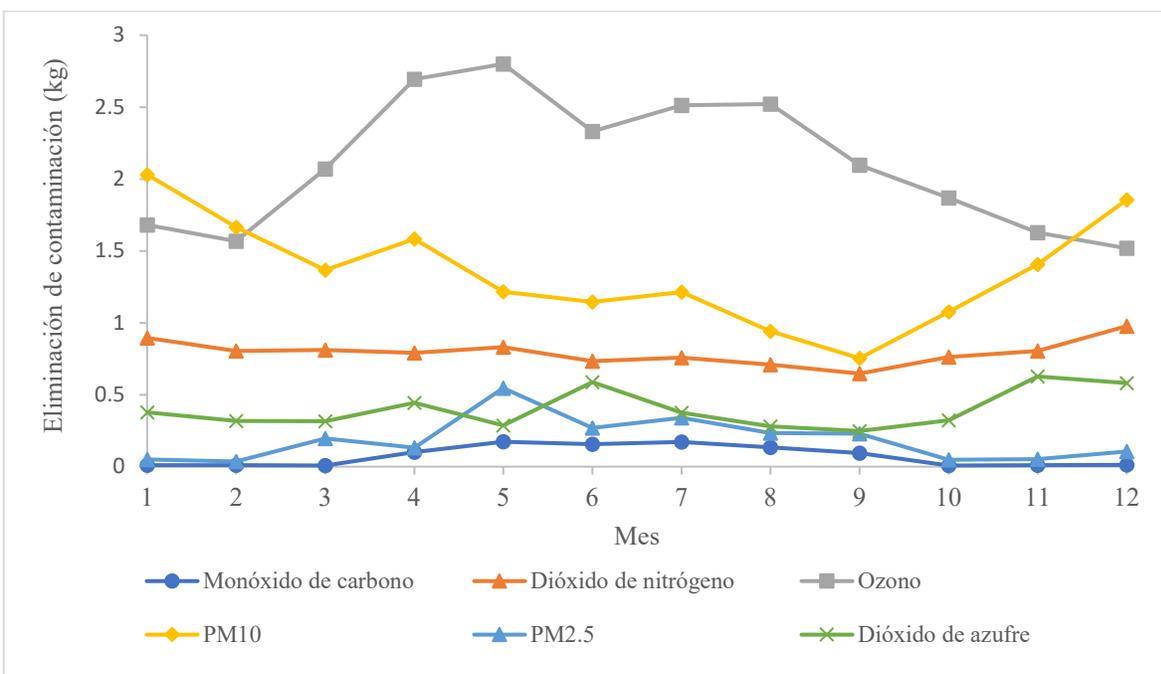


FIGURA 2. Comportamiento de cuatro sistemas periurbanos en la eliminación de contaminación en el año 2022 en Tequexquínahuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

Aunque todos los contaminantes eliminados por los sistemas son relevantes, es evidente que los de mayor impacto económico son  $O_3$  y  $PM_{2.5}$  para la zona evaluada (Fig. 3). Esta relevancia se debe principalmente al precio por kilogramo en el mercado nacional y a las concentraciones detectadas en las zonas evaluadas. Este dato subraya que, incluso en un contexto periurbano, la capacidad purificadora de los árboles es significativamente impactante.

En el almacenamiento y secuestro de carbono, los árboles han demostrado su capacidad al retener un impresionante total de 13.04 toneladas de carbono, con un valor estimado en MXN 48 108. Este dato resalta la profunda habilidad de los árboles para servir como reservorios de carbono, en comparación con el proceso activo de secuestro de carbono por parte de las especies evaluadas. Este contraste se visualiza claramente en la figura 4, reafirmando el papel crucial que desempeñan estos

árboles en la mitigación del cambio climático y en la estabilidad ambiental de la región. En el análisis de los cuatro sistemas se determinó que el secuestro bruto de carbono alcanzó un total de  $0.69 \text{ t año}^{-1}$ , tal como se ilustra en la figura 5. Este resultado, con un valor asociado de MXN 2545, es el reflejo combinado de las contribuciones de las diversas especies arbóreas presentes en dichos sistemas. Es notable cómo cada especie, con sus características y capacidades únicas, contribuye colectivamente a este significativo proceso de captura de carbono.

Para un estudio detallado sobre el secuestro de carbono clasificado por especies, se destacan dos especies primordiales debido a su alta capacidad de absorción de  $CO_2$ ; en primer lugar, *Cupressus lusitanica*, la cual tiene una capacidad de secuestrar hasta 835.2 kg de carbono. Muy cerca de este valor, la especie *Eucalyptus camaldulensis* muestra una absorción de 686.61 kg. Estos datos se pueden observar con más detalle en la figura 6.

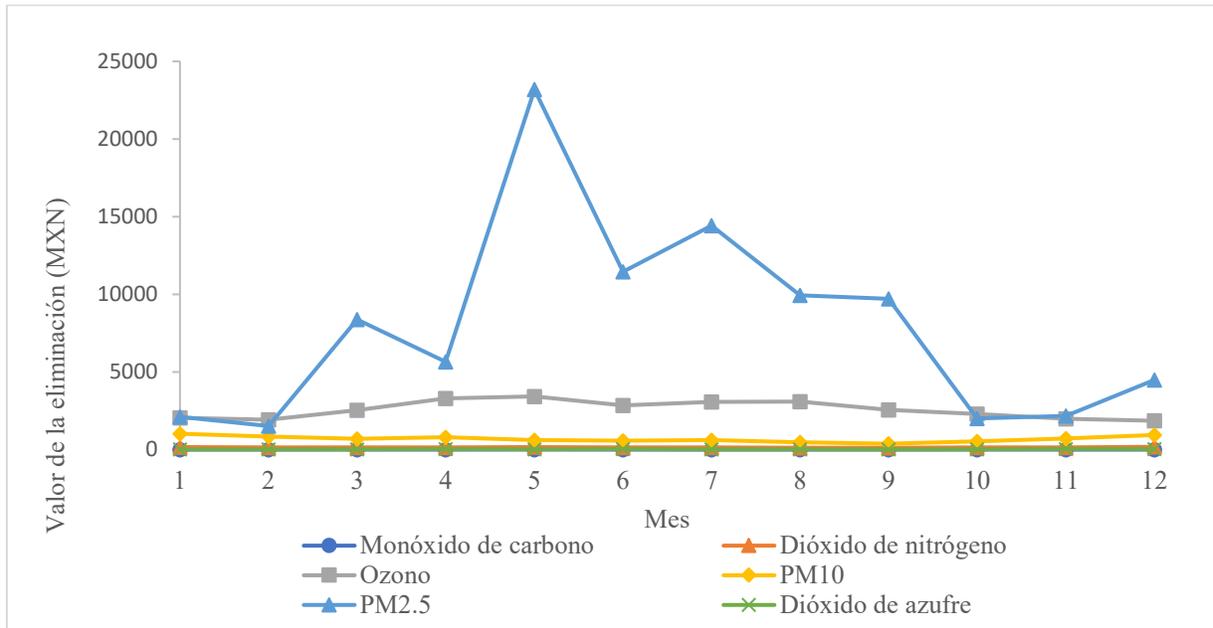


FIGURA 3. Valoración económica de eliminación de contaminantes en el año 2022 en Tequexquínahuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

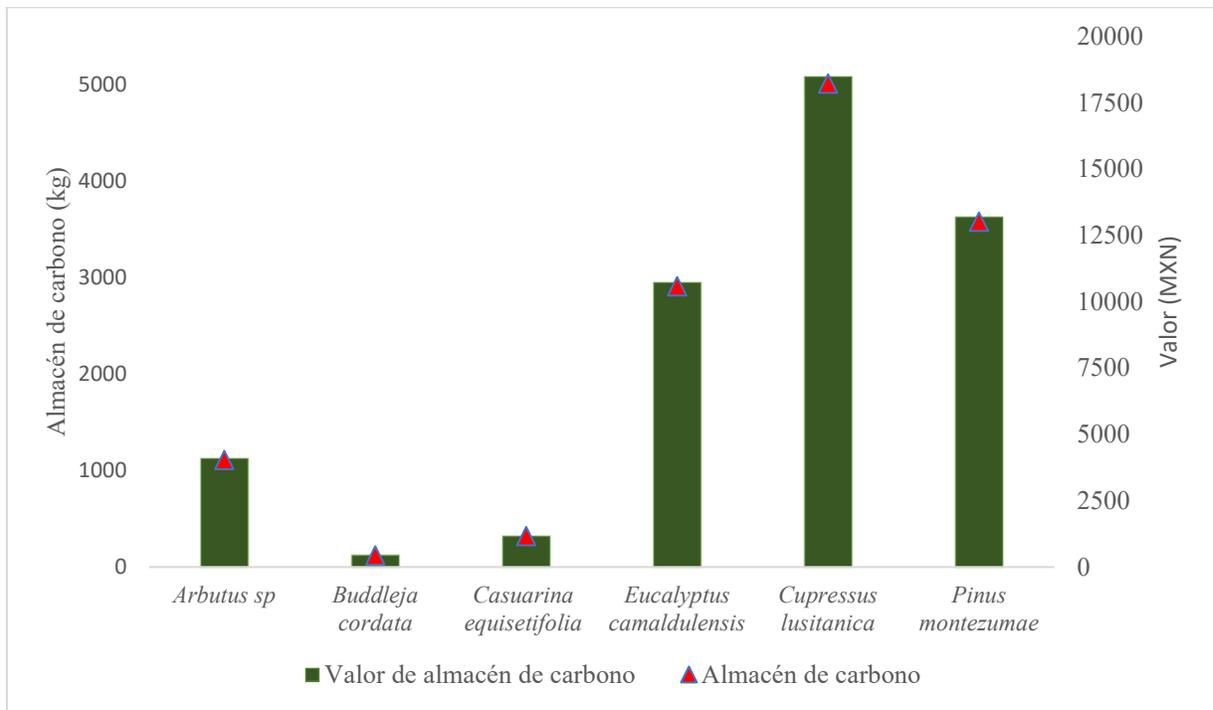


FIGURA 4. Almacén y valor de carbono por especie dominante presente en cuatro sistemas periurbanos en Tequexquínahuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

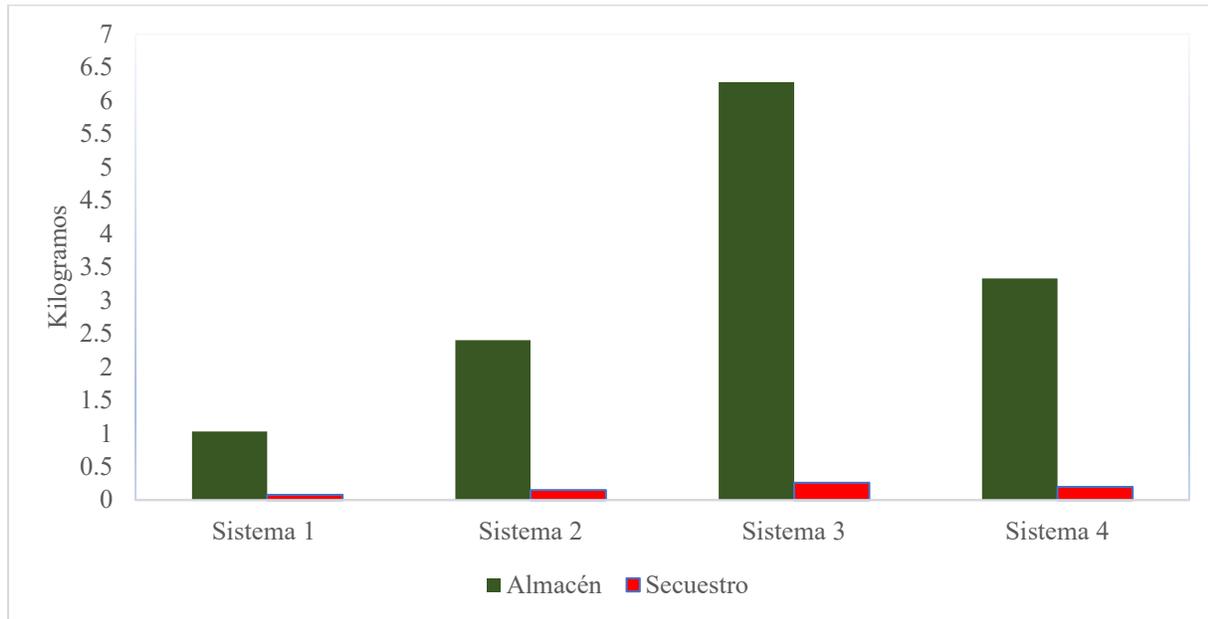


FIGURA 5. Comparación entre almacén y secuestro de carbono para los cuatro sistemas periurbanos analizados en Tequexquihuauc, Texcoco de Mora, Estado de México.

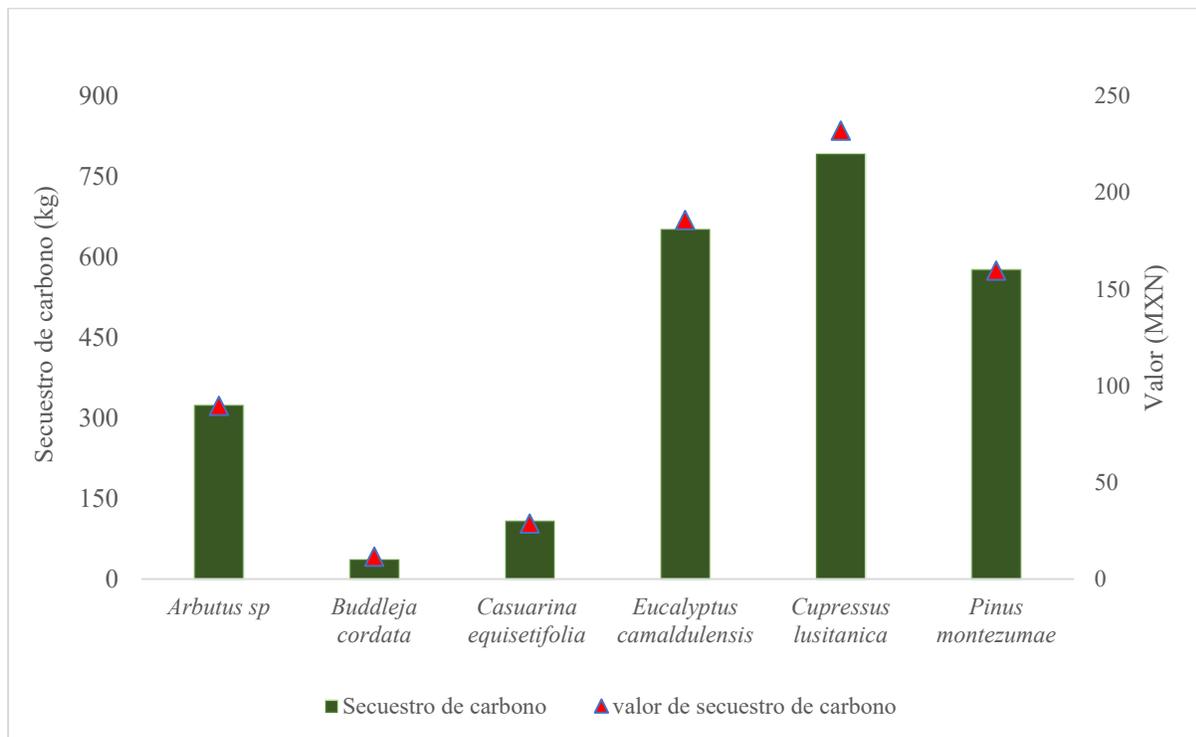


FIGURA 6. Secuestro bruto y valor de carbono por especie presente en cuatro sistemas periurbanos en Tequexquihuauc, Texcoco de Mora, Estado de México.

Dentro del conjunto de especies evaluadas en cuanto a su capacidad de almacenamiento y secuestro de carbono, *Cupressus lusitanica* destaca significativamente. Esta especie no solo almacena una considerable cantidad de carbono, sino que también es responsable de secuestrar una porción importante del mismo. En términos específicos, *C. lusitanica* almacena 38.39% del total de carbono, mientras que representa 31.8% de todo el carbono que ha sido secuestrado entre las especies muestreadas. Esta información resalta la relevancia de esta especie en las iniciativas de captura y almacenamiento de carbono.

En el estudio realizado se observó una constante en relación con la producción de oxígeno y el secuestro de carbono. Específicamente, las especies *Cupressus lusitanica* y *Eucalyptus camaldulensis* sobresalieron en todos los sistemas, siendo identificadas como las principales productoras de oxígeno. Además, estas mismas especies mostraron una fuerte correlación con el mayor secuestro bruto de carbono entre todas las especies evaluadas. Esta relación y su

prominencia en los cuatro sistemas pueden apreciarse en la figura 7. Es evidente la importancia de estas especies en la reforestación y gestión ambiental del sitio, dada su destacada capacidad para mejorar la calidad del aire y combatir el cambio climático, inclusive considerando que no son especies nativas.

Se observó que los árboles generan cantidades diferenciadas de oxígeno: 205 kg, 409.3 kg, 688.3 kg y 538.1 kg anuales, respectivamente para cada sistema. Sin embargo, es esencial contextualizar esta contribución. A pesar de que estos valores resaltan la función vital de los árboles en la producción de oxígeno, su impacto en el balance global es relativamente limitado. Esto se debe a que la atmósfera ya cuenta con una gran y estable concentración de oxígeno, como es el caso de los sistemas acuáticos, especialmente las algas y el fitoplancton, que contribuyen de manera extensiva a la producción global de oxígeno, eclipsando en gran medida la aportación realizada por los árboles.

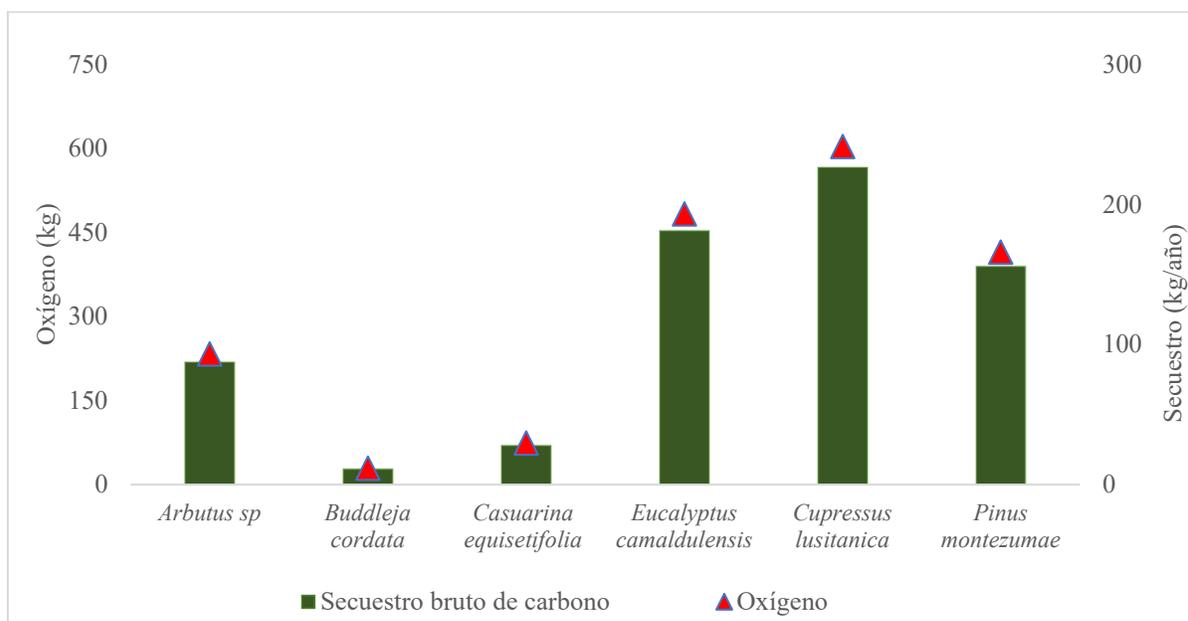


FIGURA 7. Producción de oxígeno y secuestro de carbono por especie presente en cuatro sistemas periurbanos en Tequexquináhuac, Texcoco de Mora, Estado de México.



Por otro lado, se determinó el papel crucial que desempeñan los árboles en la mitigación del escurrimiento de agua. Estos sistemas de árboles logran reducir el escurrimiento en una medida significativa de  $70.68 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ , lo que se traduce en un ahorro económico valorado en MXN 3141. Es importante entender que el cálculo del escurrimiento evitado se realiza tomando como referencia las condiciones meteorológicas específicas de la localidad en cuestión, basadas en datos obtenidos de la estación meteorológica analizada. Esta función de los árboles no solo tiene un impacto económico, sino que también contribuye a la conservación del suelo y a la prevención de inundaciones en la región.

Según los datos, los árboles de cada sistema evitan escurrimientos de  $11.65 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ,  $20.22 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ ,  $28.44 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$  y  $9.64 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ . Estas cifras representan un ahorro económico de MXN 523, MXN 908, MXN 1277 y MXN 433 para cada sistema respectivamente, como se puede observar con más detalle en la figura 8.

Lo que resulta especialmente notable es que estos árboles, a pesar de encontrarse en estados de degradación y

estar ubicados en zonas periurbanas, siguen proporcionando un beneficio ambiental y económico considerable. Esta información resalta la importancia de la conservación y gestión de los árboles, incluso en áreas donde podrían percibirse como menos vitales o prioritarias.

## DISCUSIÓN

A medida que las ciudades se desarrollan y expanden, las áreas periurbanas enfrentan desafíos crecientes en la gestión sostenible del territorio. El análisis de los cuatro sistemas resalta la importancia crítica de las especies forestales en estas zonas, las cuales otorgan beneficios ambientales, económicos y sociales significativos (Castán et al. 2023). La riqueza y diversidad de estas especies analizadas concuerda con hallazgos de diversidad en sistemas urbanos y periurbanos de diferentes partes del mundo, como se destaca en las investigaciones de Alpaidze y Salukvadze (2023); Costemalle et al. (2023); Doick et al. (2016); Gong et al. (2022); Kalfas et al. (2020); Martínez-Paz et al. (2021); Raum et al. (2019); Riondato et al. (2020).

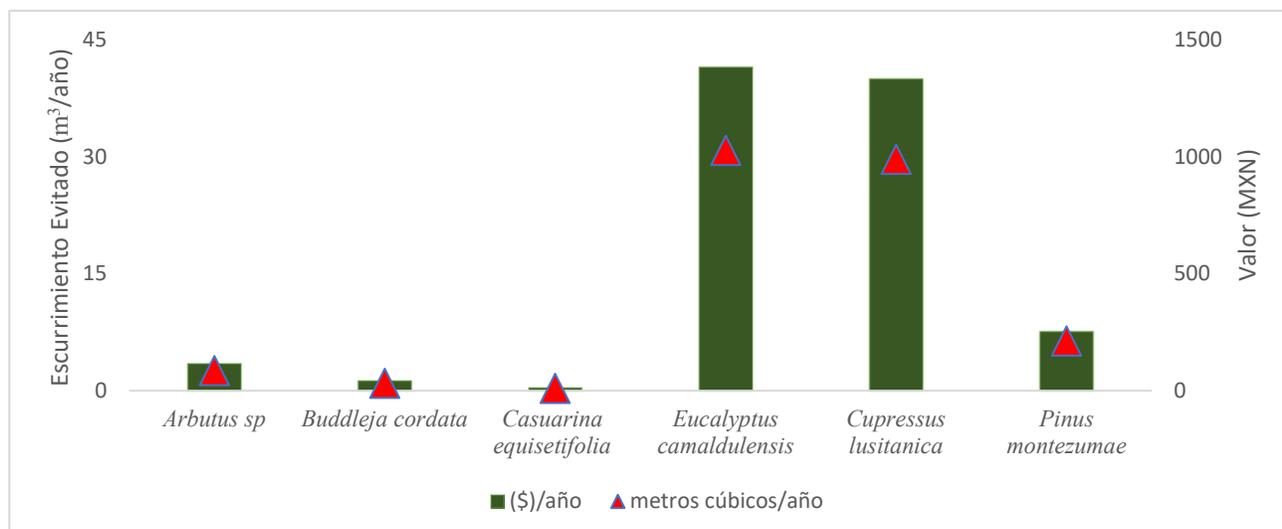


FIGURA 8. Escurrimiento evitado y valor para las especies con mayor impacto general en el escurrimiento de los cuatro sistemas periurbanos en Tequexquínahuac, Texcoco de Mora, Estado de México.

Los resultados muestran que los sistemas tienen coberturas significativamente homogéneas en área foliar y cobertura al igual que lo obtenido por Admasu et al. (2023); Aziz et al. (2023); Dobbs et al. (2014); Zhong et al. (2020); y en sistemas periurbanos de distintas partes del mundo, sin embargo, en el ámbito de la investigación urbana y periurbana, las metodologías adoptadas pueden ser notablemente diversas.

Esta variabilidad metodológica refleja la complejidad y multidimensionalidad de las áreas urbanas y periurbanas, y subraya la necesidad de enfoques holísticos que abarquen tanto el ambiente físico como el contexto social (Gascoigne et al. 2011; Paletto et al. 2017 y Ro et al. 2020).

Los datos obtenidos reflejan una ocupación foliar total de 30.7%. Este porcentaje es comparable con los hallazgos de Ross et al. (2020) y Song et al. (2020) en sus investigaciones sobre parques urbanos, lo que respalda similitudes entre las condiciones de dichos parques y las de los sistemas periurbanos evaluados.

En el estudio sobre la mitigación de contaminantes, los datos evidencian una reducción significativa en las concentraciones de ozono en los cuatro sistemas evaluados. Esta tendencia está en línea con los hallazgos de Gong et al. (2022), quienes resaltaron la función vital de los árboles en los sistemas urbanos y periurbanos para contrarrestar la presencia del ozono, un contaminante que predomina.

A través de una evaluación cuantitativa, se determinó que los árboles de estos sistemas consiguieron eliminar aproximadamente 58.94 kg/año de variados contaminantes atmosféricos. Este notable desempeño ambiental conlleva implicaciones económicas, generando un ahorro estimado en MXN 136 100. Es relevante mencionar que esta economía, derivada de la intervención natural de los árboles, es congruente con estudios anteriores. Investigaciones de Arroyave et al. (2019); Pace et al. (2021); Siedlarczyk et al. (2019) y Wu et al. (2019) han evidenciado patrones similares en la capacidad de eliminación de contaminantes, tanto en contextos de bosques puramente urbanos como en los periurbanos.

Es especialmente relevante subrayar que los resultados obtenidos respaldan la idoneidad y aplicación de la

herramienta i-Tree Eco para análisis en contextos periurbanos, dada su capacidad para reflejar consistentemente los beneficios ecológicos y económicos de estas zonas verdes, tanto dentro como en las afueras de los núcleos urbanos.

Durante las épocas frías de la región se registraron índices de eliminación más bajos en comparación con las estaciones de primavera y verano. Esta tendencia estacional coincide con los hallazgos de Arroyave et al. (2019) ya que se observó un incremento notable en la eliminación de estos contaminantes durante ciertas estaciones (Fernández García, 2009). Esta dinámica refuerza la importancia de considerar las variaciones climáticas al evaluar la eficiencia de los sistemas naturales en la purificación del aire.

Los precios por eliminación de contaminantes pueden ser oscilatorios debido a las condiciones de mercado del país, por ejemplo, los usados por Qaro y Akrawee (2020), sin embargo, también se observa que la mayoría de los contaminantes guardan una relación de ajuste cuando los mercados están afectados por las decisiones políticas y sociales para el combate de contaminantes del medio ambiente.

En la presente investigación sobre las dinámicas del almacenamiento y secuestro de carbono se ha demostrado el almacén de 13.04 toneladas de carbono con un ahorro de MXN 48 108 que enmarca la superioridad del almacén sobre el secuestro de carbono; esto coincide con lo hallado en otros trabajos en áreas urbanas (Ma et al. 2021; Moody, et al. 2021).

Este dato subraya la primacía del almacenamiento en comparación con el simple secuestro de carbono, una tendencia que ha sido corroborada por investigaciones en zonas urbanas. Específicamente, estudios como los de Ma et al. (2021); Moody et al. (2021) y Ross et al. (2020) han enfatizado cómo, en contextos urbanos, el potencial de almacenamiento de carbono puede ser más trascendental que el secuestro *per se*, resaltando la relevancia de preservar y fomentar estos espacios verdes dentro de entornos urbanizados para una gestión sostenible del carbono.

En el estudio sobre la producción de oxígeno, se identifica que la capacidad anual de un árbol para generar oxígeno está íntimamente ligada al volumen de su secuestro



de carbono y relacionada con la acumulación de biomasa del árbol (Negri et al. 2021), los resultados obtenidos concuerdan con lo señalado por Martínez-Trinidad et al. (2021) que, aunque se trate de diferentes especies, la asociación entre producción de oxígeno y secuestro de carbono es aproximadamente equivalente, al igual que en este trabajo.

Desde una perspectiva hidrológica centrada en el escurrimiento evitado, el análisis de los cuatro sistemas indica que la presencia de árboles tiene un impacto notable, resultando en una disminución de alrededor de 70.68 m<sup>3</sup> anualmente. Este servicio ecosistémico, valorado en MXN 3141, refuerza las conclusiones presentadas por Ross et al. (2020) y Martínez-Trinidad et al. (2021); cuyos estudios destacan la relevancia económica de los escurrimientos evitados por estructuras verdes. Estas evidencias resaltan la importancia de incluir dichos valores en análisis económicos de áreas verdes, proporcionando un marco comparativo esencial para la evaluación de este servicio ecosistémico.

En el marco del análisis de valores de sustitución y funcionales, se destaca la singular importancia de los árboles periurbanos en los sistemas examinados. Estos no solo representan un valor intrínseco, sino que también desempeñan un papel crucial en la prestación de servicios ecosistémicos a la colectividad. A través de los hallazgos de esta investigación, se evidencia una correlación entre el valor de sustitución de estos árboles y su presencia y desempeño funcional en dichos sistemas.

Una tendencia emergente en el presente estudio es que el valor de sustitución tiende a incrementarse conforme aumenta el tamaño de los árboles en cada sistema. Esta relación sugiere que los beneficios ecosistémicos de los árboles son proporcionalmente mayores cuando existen más árboles de mayor tamaño y en buen estado de salud.

Adicionalmente, cabe señalar que, a pesar de los beneficios observados, la salud y cobertura arbórea en estos sistemas periurbanos han mostrado un deterioro sostenido a lo largo del tiempo. Un manejo adecuado podría potenciar los beneficios que estos bosques ofrecen; no obstante, es

también evidente que la disminución en la cantidad y salud de la cobertura arbórea podría mermar estos beneficios.

En cuanto al valor de sustitución se determinó un total de MXN 1 086 000, lo cual se alinea con lo registrado por Alpaidze y Salukvadze (2023); Andrew y Slater (2014); Castán et al. (2023); Costemalle, et al. (2023); Martínez-Trinidad et al. (2021), quienes, basados en la metodología i-Tree Eco, establecen valores correlacionados y de similitud con esta investigación, reforzando la premisa de que el valor de sustitución es una métrica representativa de los beneficios que estos árboles otorgan, especialmente en función de su número y salud.

## CONCLUSIONES

En este estudio se demuestra la capacidad del programa i-Tree Eco para dar información cuantitativa sobre la importancia crítica de las zonas verdes periurbanas por las innumerables funciones y servicios ecosistémicos que proporcionan, desde la regulación climática hasta la mejora de la calidad del aire. Las especies forestales en estas zonas juegan un papel vital en la eliminación de contaminantes, especialmente del ozono. Se infiere que la capacidad de almacenar carbono refleja la importancia de conservar y, cuando sea posible, expandir estas áreas verdes para mitigar los impactos del cambio climático. Se obtiene información sobre la producción de oxígeno, vinculada intrínsecamente al secuestro de carbono, que refuerza el papel de estas áreas como pulmones urbanos. También se concluye con información cuantitativa que las zonas verdes periurbanas no solo eliminan contaminantes y almacenan carbono, sino que también revitalizan el aire urbano al producir oxígeno, un componente esencial para la vida. La capacidad de las áreas verdes periurbanas de reducir el escurrimiento mostrada por i-Tree Eco tiene implicaciones directas en la gestión de recursos hídricos y prevención de inundaciones. Desde una perspectiva económica, el valor de sustitución de los árboles refuerza la premisa de que estas áreas no solo son valiosas desde un punto de vista ecológico, sino que también tienen un valor económico tangible que merece reconocimiento y consideración en decisiones de política y

planificación. Las zonas verdes periurbanas no son simplemente espacios estéticos, sino ecosistemas funcionales que contribuyen significativamente al bienestar ecológico, económico y social de las ciudades. En el caso de sistemas en proceso de degradación, no solo hay una necesidad de conservar lo que queda, sino de expandir y revitalizar estas áreas para maximizar los servicios ecosistémicos que pueden ofrecer.

## RECONOCIMIENTOS

Se extiende un sincero reconocimiento al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (Conahcyt) por la invaluable aportación proporcionada para la realización de los estudios doctorales del primer autor. Además de la gratitud a la Universidad Autónoma Chapingo, casa de estudios, en donde se adquirieron las habilidades y conocimientos que guiaron la investigación. El apoyo combinado de ambas instituciones ha sido fundamental para el alcance de los objetivos y contribución al desarrollo científico en el país.

## REFERENCIAS

- Admasu, W. F., Van Passel, S., Minale, A. S., Tsegaye, E. A., & Nyssen, J. (2023). Nexus between land development and the value of ecosystem services in Ethiopia: A contingent valuation study. *Environment, Development and Sustainability*, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s10668-022-02803-8>
- Aguirre, N., Alvarado, J., & Granda, J. (2018). Bienes y servicios ecosistémicos de los bosques secos de la provincia de Loja. *Bosques Latitud Cero*, 8(2), 128-130. <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/bosques/article/view/499>
- Alpaidze, L., & Salukvadze, J. (2023). Green in the City: Estimating the Ecosystem Services Provided by Urban and Peri-Urban Forests of Tbilisi Municipality. *Georgia Forests*, 14(1), 121-135. <https://doi.org/10.3390/f14010121>
- Andrew, C., & Slater, D. (2014). Why some UK homeowners reduce the size of their front garden trees and the consequences for urban forest benefits as assessed by i-Tree ECO. *Arboricultural Journal: The International Journal of Urban Forestry*, 36(4), 197-215. <https://doi.org/10.1080/03071375.2014.994388>
- Arroyave, M., Posada, M., Nowak, D., & Hoehn, R. (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>
- Aziz, A., Anwar, M. M., Majeed, M., Fatima, S., Mehdi, S. S., Mangrio, W. M., ... & Elansary, H. O. (2023). Quantifying Landscape and Social Amenities as Ecosystem Services in Rapidly Changing Peri-Urban Landscape. *Land*, 12(2), 477. <https://doi.org/10.3390/land12020477>
- Baró, F., Haase, D., Gómez-Baggethun, E., & Frantzeskaki, N. (2015). Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities. *Ecological indicators*, 55, 146-158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.013>
- Benavides, H. & Fernández, D. (2012). Estructura del arbolado y caracterización dasométrica de la segunda sección del Bosque de Chapultepec. *Madera y Bosques* 18(2), 51-71. <https://10.21829/myb.2012.182352>
- Bennett, E., Peterson, G., & Gordon, L. (2009). Understanding relationships among multiple ecosystem services. *Ecology Letters*, 12, 1394-1404. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01387.x>
- Camacho, V., & Ruiz, A. (2012). Marco conceptual y clasificación de los servicios ecosistémicos. *Revista Bio Ciencias*, 1(4), 3-15. <https://doi.org/10.15741/revbio.01.04.02>
- Castán, J. H., Cuesta, E., Espejel, B. O., & Reyes, E. R. (2023). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *CIENCLA ergo-sum*, 30(2), 32. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edb&AN=163680262&lang=es&site=eds-live&scope=site>
- Cheng Zhang, Jing Li & Zixiang Zhou. (2022). Ecosystem service cascade: Concept, review, application and prospect. *Ecological Indicators*, 137, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108766>
- Costemalle, V., Candido, H., & Carvalho, F. (2023). An estimation of ecosystem services provided by urban and peri-urban forests: a case study in Juiz de Fora, Brazil. *Ciência Rural*, 53(4), 1-9. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210208>
- Dobbs, C., Nitschke, C., & Kendal, D. (2014). Global drivers and tradeoffs of three urban vegetation ecosystem services. *PLoS One*, 9(11), 1-9. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0113000>
- Doick, K., Albertini, A., Handley, P., Lawrence, V., Rogers, K., & Rumble, H. (2016). *Valuing Urban Trees in the Tawe Catchment Forest* Research. [https://cdn.forestresearch.gov.uk/2015/11/fr\\_doick\\_tawe\\_itre\\_full\\_report\\_2015\\_low\\_res\\_for\\_web.pdf](https://cdn.forestresearch.gov.uk/2015/11/fr_doick_tawe_itre_full_report_2015_low_res_for_web.pdf)



- Fisher, B., Turner, R. K., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68(3), 643-653. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.09.014>
- Fernández García, F. (2009). Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas*, (49), 173-195. <https://doi.org/10.14198/INGEO2009.49.09>
- Gascoigne, W., Hoag, D., Koontz, L., Tangen, B., Shaffer, T., & Gleason, R. (2011). Valuing ecosystem and economic services across land-use scenarios in the Prairie Pothole Region of the Dakotas, USA. *Ecological Economics*, 70(10), 1715-1725. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.04.010>
- Gong, C., Xian, C. & Ouyang, Z. (2022). Evaluación de la purificación de NO<sub>2</sub> por bosques urbanos basada en el modelo i-Tree Eco: estudio de caso en Beijing, China. *Bosques*, 13(3), 369; <https://doi.org/10.3390/f13030369>
- Graça, M., Alves, P., Gonçalves, J., Nowak, D., Hoehn, R., Farinha-Marques, P., & Cunha, M. (2018). Assessing how green space types affect ecosystem services delivery in Porto, Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 170, 195-208. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.10.007>
- Haines-Young, R, Potschin-Young, M. (2018) Revision of the Common International Classification for Ecosystem Services (CICES V5.1): A policy brief. *One Ecosystem*, 3, e27108. <https://doi.org/10.3897/oneeco.3.e27108>
- Hernández Aja, A. (2009). Calidad de vida y Medio Ambiente Urbano: indicadores locales de sostenibilidad y calidad de vida urbana. *Revista INVI*, 24(65), 79-111. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582009000100003>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática [Inegi]. (2020). <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- Jáuregui, E., & Luyando, E. (1992). Patrones de flujo de aire superficial y su relación con el transporte de contaminantes en el Valle de México. *Investigaciones Geográficas*, (24), 51-78. [https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-46111992000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-46111992000100004&lng=es&nrm=iso&tlng=es)
- Kalfas, D. G., Zagkas, D. T., Dragozi, E. I., & Zagkas, T. D. (2020). Estimating value of the ecosystem services in the urban and peri-urban green of a town Florina-Greece, using the CVM. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology*, 27(4), 310-321. <https://doi.org/10.1080/13504509.2020.1714786>
- Kim, G., Miller, P. A., & Nowak, D. J. (2015). Assessing urban vacant land ecosystem services: Urban vacant land as green infrastructure in the City of Roanoke, Virginia. *Urban Forestry y Urban Greening*, 14(3), 519-526. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.05.003>
- Lin, J., Kroll, C. N., & Nowak, D. J. (2020). Ecosystem service-based sensitivity analyses of i-Tree Eco. *Arboriculture and Urban Forestry*, 46(4), 287-306. <https://doi.org/10.48044/jauf.2020.021>
- Liu, J., & Opdam, P. (2014). Valuing ecosystem services in community-based landscape planning: introducing a wellbeing-based approach. *Landscape Ecology*, 29(8), 1347-1360. <https://doi.org/10.1007/s10980-014-0045-8>
- Ma, J., Li, X., Baoquan, J., Liu, X., Li, T., Zhang, W., & Liu, W. (2021). Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging. *Urban Forestry y Urban Greening*, 66, 127413. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127413>
- Martínez-Paz, J. M., Albaladejo-García, J. A., Barreiro-Hurle, J., Pleite, F. M. C., & Perni, Á. (2021). Spatial effects in the socioeconomic valuation of peri-urban ecosystems restoration. *Land Use Policy*, 105, 105426. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105426>
- Martínez-Trinidad, T., Hernández López, P., López-López, S. F., & Mohedano Caballero, L. (2021). Diversidad, estructura y servicios ecosistémicos del arbolado en cuatro parques de Texcoco mediante i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67), 202-223. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v12i67.880>
- Moody, R., Geron, N., Healy, M., Rogan, J., & Martin, D. (2021). Modeling the spatial distribution of the current and future ecosystem services of urban tree planting in Chicopee and Fall River, Massachusetts. *Urban Forestry y Urban Greening*, 66, 127403. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127403>
- Nassauer, J. I. (2012). Landscape as medium and method for synthesis in urban ecological design. *Landscape and Urban Planning*, 106(3), 221-229. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.03.014>
- Negri, L. A. B., Rojas, A., Iraheta, A., & Cárdenas, J. (2021). Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica. *Ecosistemas*, 30(2), 2083-2083. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2083>
- Nowak, D. J., Greenfield, E. J., & Ash, R. M. (2019). Annual biomass loss and potential value of urban tree waste in the United States. *Urban Forestry y Urban Greening*, 46, 126469. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126469>
- Nowak, D. J., & Aevermann, T. (2019). Tree compensation rates: Compensating for the loss of future tree values. *Urban Forestry y Urban Greening*, 41, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.03.014>
- Pace, R., Guidolotti, G., Baldacchini, C., Pallozzi, E., Grote, R., Nowak, D., & Calfapietra, C. (2021). Comparing i-Tree Eco Estimates of Particulate Matter Deposition with Leaf and Canopy Measurements in an Urban Mediterranean Holm

- Oak Forest. *Environmental Science y Technology*, 55(10), 6613-6622. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07679>
- Paletto, A., De Meo, I., Grilli, G., & Nikodinoska, N. (2017). Effects of different thinning systems on the economic value of ecosystem services: A case-study in a black pine peri-urban forest in Central Italy. *Annals of Forest Research*, 60(2), 313-326. <https://doi.org/10.15287/afr.2017.799>
- Pardo, Y., Muñoz, J., & Velásquez, J. (2022). Valoración económica de servicios ecosistémicos en bosques de sistemas agropecuarios del piedemonte amazónico colombiano. *Revista Desarrollo y Sociedad*, (91), 143-169. <https://doi.org/10.13043/DYS.91.4>
- Pérez-Medina, S., & López-Falfán, I. (2015). Áreas verdes y arbolado en Mérida, Yucatán. Hacia una sostenibilidad urbana. *Economía Sociedad y Territorio*, 1-33. <https://doi.org/10.22136/est002015552>
- Qaro, S., & Akrawee, Z. (2020). Assessment Of Carbon Storage and Sequestration by Using I-Tree Program for Atrush Forest/North of Iraq. *The Iraqi Journal of Agricultural Science*, 51, 72-85. <https://doi.org/10.36103/ijas.v51iSpecial.884>
- Raum, S., Hand, K. L., Hall, C., Edwards, D. M., O'brien, L., & Doick, K. J. (2019). Achieving impact from ecosystem assessment and valuation of urban greenspace: The case of i-Tree Eco in Great Britain. *Landscape and Urban Planning*, 190, 103590. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103590>
- 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, 102356. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102356>
- Ro, C., Sovann, C., Bun, D., Yim, C., Bun, T., Yim, S., & Irvine, K. N. (2020, August). The economic value of peri-urban wetland ecosystem services in Phnom Penh, Cambodia. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 561(1), 1-8. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/561/1/012013>
- Ross, S., Jean-Philippe, S., Clatterbuck, W., Giffen, N., Herold, J., & Zobel, J. (2020). i-Tree eco analysis of landscape vegetation on remediated areas of oak ridge national laboratory. *Open Journal of Forestry*, 10(04), 412. <https://doi.org/10.4236/ojf.2020.104026>
- Sahagún, F., Aceves, J., Sánchez, E., & Plazola, L. (2020). Valoración de los servicios ecosistémicos en áreas verdes. El caso del Parque Metropolitano de Guadalajara, México. *Acta Universitaria*, 30(2020), 1-17. <https://doi.org/10.15174/au.2020.2635>
- Siedlarczyk, E., Winczek, M., Zięba-Kulawik, K., & Wężyk, P. (2019). Smart green infrastructure in a smart city—the case study of ecosystem services evaluation in krakow based on i-Tree eco software. *GeoScience Engineering*, 65(2), 36-43. <http://doi.org/10.35180/gse-2019-0010>
- Song, P., Kim, G., Mayer, A., He, R., & Tian, G. (2020). Assessing the ecosystem services of various types of urban green spaces based on i-Tree Eco. *Sustainability*, 12(4), 1630. <https://doi.org/10.3390/su12041630>
- Triana, A., Sánchez, J., González-Melo, A., & Torres, F. (2019). Análisis funcional del secuestro de carbono en un bosque seco tropical interandino. *Caldasia*, 41(1), 179-193. <https://doi.org/10.15446/caldasia.v41n1.71304>
- Urán, J. R. L., Yepes, C. A. V., & Betancur, N. M. Z. (2014). Herramientas del proceso metodológico de valoración del sistema arbóreo urbano componente de los activos ambientales del municipio de Medellín. *Trabajos de Grado Contaduría UdeA*, 8(1). <https://revistas.udea.edu.co/index.php/tgcontaduria/article/view/27056>
- Wu, J., Wang, Y., Qiu, S., & Peng, J. (2019). Using the modified i-Tree Eco model to quantify air pollution removal by urban vegetation. *Science of the Total Environment*, 688, 673-683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.437>
- Young, R. F. (2010). Managing municipal green space for ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 9(4), 313-321. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2010.06.007>
- Zhong, Q., Zhang, L., Zhu, Y., Konijnendijk van den Bosch, C., Han, J., Zhang, G., & Li, Y. (2020). A conceptual framework for ex ante valuation of ecosystem services of brownfield greening from a systematic perspective. *Ecosystem Health and Sustainability*, 6(1), 1743206. <https://doi.org/10.1080/20964129.2020.1743206>

Manuscrito recibido el 10 de abril de 2023

Aceptado el 11 de septiembre de 2023

Publicado el 20 de diciembre de 2023

Este documento se debe citar como:

González-Hernández, L., Romo-Lozano, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Martínez Damian M. Á., & Mohedano Caballero, L. (2023). Valoración económica de los servicios ecosistémicos de cuatro sistemas forestales periurbanos a través de i-Tree Eco. *Madera y Bosques*, 29(3), e2932588. <https://doi.org/10.21829/myb.2023.2932588>



Madera y Bosques por Instituto de Ecología, A.C. se distribuye bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercialCompartirIgual 4.0 Internacional.

