

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN EN
PARQUES DEL MUNICIPIO DE MONTERREY**

POR

MELVIN ISAC DE LA ROSA ESTRADA

Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS FORESTALES

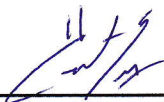
Junio, 2023

EVALUACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DE REGULACIÓN EN PARQUES DEL MUNICIPIO DE MONTERREY

Aprobación de tesis

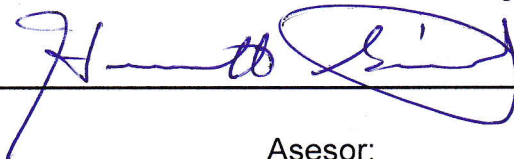
Director:

Dr. Homero Alejandro Gárate Escamilla



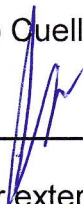
Asesor:

Dr. Humberto González Rodríguez



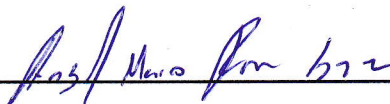
Asesor:

Dr. Luis Gerardo Cuellar Rodríguez



Asesor externo:

M.C. Ángel Mario Reyna González



Junio, 2023

Agradecimientos.

Al Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por el apoyo otorgado para la realización de estos estudios.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y a la Facultad de Ciencias Forestales, por el apoyo durante mi estancia en esta institución.

Al mi comité de tesis, por el compromiso en el desarrollo de este trabajo: el Dr. Hómero Gárate por su valiosa contribución, orientación y acompañamiento durante el desarrollo de mi tesis. A la Dra. Marisela Pando, de quien recibí un gran apoyo, su enfoque analítico, su dedicación y su aguda visión académica han enriquecido enormemente mi trabajo. El Dr. Humberto González, su apoyo constante, su disposición para discutir ideas y su compromiso con la excelencia académica han sido fundamentales para el logro de los resultados obtenidos. Al M.C. Angel Mario Reyna, su dedicación para ayudarme a superar los desafíos han sido de gran importancia.

Al Dr. Emilio Díaz, de la Universidad de Santiago de Compostela, por su disposición para brindar asesoramiento.

A mis queridos amigos: Francisco González de quien recibí un gran apoyo incondicional, Andrea Sobrevilla, por su gran apoyo y motivación a lo largo de mi trayectoria académica. Tania Sarmiento, Alejandra González, Aldo Tovar, Esteban Rezendez, y el resto de amistades que fueron de gran soporte y motivación en algún momento de mi estancia en el posgrado.

Dedicatorias

A mi familia, de quienes siempre recibí apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria, mis padres, Alma y Américo, mis hermanos, Américo, Naín y Neftali, gracias por el privilegio de su presencia en mi vida.

ÍNDICE

<u>1. INTRODUCCIÓN.....</u>	<u>1</u>
<u>2. ANTECEDENTES.....</u>	<u>3</u>
<u>3. JUSTIFICACIÓN.....</u>	<u>5</u>
<u>4. HIPÓTESIS.....</u>	<u>6</u>
<u>5. OBJETIVOS.....</u>	<u>6</u>
OBJETIVO GENERAL:	6
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:.....	6
<u>6. MATERIALES Y MÉTODOS.....</u>	<u>7</u>
6.1 ÁREA DE ESTUDIO.....	7
6.2 IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS PARQUES.....	9
6.3 ESTABLECIMIENTO DE PARCELAS DE MUESTREO.....	11
6.4 MODELIZACIÓN Y ANÁLISIS.....	13
<u>7. RESULTADOS.....</u>	<u>14</u>
7.1 COMPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DEL ARBOLADO DE LOS PARQUES.....	16
7.2 SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EVALUADOS.....	21
7.2.1 REDUCCIÓN DE LA CONTAMINACIÓN.....	21
7.2.2 CAPTURA DE CARBONO.....	23
7.2.3 INTERCEPCIÓN DE AGUA DE LLUVIA.....	25
7.3 COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES BIOGÉNICOS.....	27
<u>8. DISCUSIÓN.....</u>	<u>28</u>
<u>9. CONCLUSIÓN.....</u>	<u>31</u>
<u>10. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	<u>32</u>
<u>11. ANEXOS.....</u>	<u>38</u>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio.....	8
Figura 2. División de cuartiles y medias para los parques.....	10
Figura 3. Vista de los diferentes tamaños de parques.....	12
Figura 4. Distribución de los parques seleccionados por tamaño.....	15
Figura 5. Densidad de árboles.....	17
Figura 6. Composición de especies en los parques.....	18
Figura 7. Porcentaje de la población de árboles según su origen.....	19
Figura 8. Clases diamétricas de los árboles.....	19
Figura 9. Área foliar	20
Figura 10. Captación de contaminantes a través de los meses.....	22
Figura 11. Captura de CO ₂ de las principales 10 especies.....	24
Figura 12. Captura de CO ₂ media de los tamaños de parques.....	25
Figura 13. Volumen de escorrentía evitada por las principales especies.....	26
Figura 14. Escorrentía evitada media según el tamaño de parque.....	27

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parcelas de muestreo.....	12
Tabla 2. Caracterización de la vegetación.	21
Tabla 3. Captación de contaminantes por tamaño de parque.	22

RESUMÉN

El crecimiento urbano acelerado ha generado transformaciones significativas en el uso del suelo, lo que ha tenido un impacto directo en la calidad del medio ambiente y en la calidad de vida de las personas que viven en las ciudades. Los árboles brindan una serie de servicios ecosistémicos que contribuyen a su solución. Estos servicios pueden ser evaluados a través de modelos numéricos, permitiendo cuantificar el impacto positivo que los árboles tienen en el entorno urbano. En el presente estudio se llevó a cabo la evaluación de tres servicios ecosistémicos de regulación en las áreas verdes del municipio de Monterrey, ubicado en el estado de Nuevo León. Se examinó el potencial de los parques para proporcionar servicios de regulación, incluyendo la captura de CO₂, la reducción de contaminantes y la escorrentía evitada. Para ello, se estableció una clasificación de tamaños de parques, dividiéndolos en tres categorías: Chicos (CH), Medianos (M) y Grandes (G). La evaluación de los servicios ecosistémicos se realizó utilizando el software i-Tree Eco. Los resultados revelan que en el área de estudio se encontraron un total de 2408 árboles, la cobertura generada por estas especies arbóreas es de 48.6%. La diversidad de especies arbóreas incluye un total de 31 especies, siendo las más predominantes el *Fraxinus americana*, *Quercus virginiana* y *Eucalyptus spp.* En cuanto a la estructura del arbolado urbano, se observa que el 23.5% de los árboles se encuentran en categorías de diámetro inferiores a los 15.2 cm. En términos de los servicios ecosistémicos evaluados en el área de estudio, se estimó una cantidad de 688.7 kg/año de contaminantes removidos (NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}). Además, se determinó una captura de carbono de 23.3 toneladas y se estima que los árboles evitan la escorrentía de 742.1 m³ de agua anualmente.

ABSTRACT

Rapid urban growth has generated significant transformations in land use, which has had a direct impact on the quality of the environment and the quality of life of people living in cities. Trees provide a series of ecosystem services that contribute to their solution. These services can be evaluated through numerical models, allowing to quantify the positive impact that trees have on the urban environment. In this study, the evaluation of three regulating ecosystem services in the green areas of the municipality of Monterrey, located in the state of Nuevo León, was carried out. The potential of parks to provide regulating services, including CO₂ capture, pollutant reduction, and avoided runoff were examined. For this purpose, a size classification of parks was established, dividing them into three categories: Small (CH), Medium (M) and Large (G). The evaluation of ecosystem services was carried out using the i-Tree Eco software. The results revealed that a total of 2408 trees were found in the study area and the coverage generated by these tree species represents 48.6%. The diversity of tree species includes a total of 31 species and the most predominant being *Fraxinus americana*, *Quercus virginiana* and *Eucalyptus spp.* Regarding the structure of urban trees, it is observed that 23.5% of the trees are in categories of diameter less than 15.2 cm. In terms of the ecosystem services evaluated in the study area, it was estimated that 688.7 kg/year of pollutants were removed (NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀ and PM_{2.5}). In addition, a carbon sequestration of 23.3 tons was determined, and it is estimated that the trees prevent runoff of 742.1 m³ of water annually.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, uno de los fenómenos sociales y ambientales más destacados es la expansión masiva de áreas urbanas en territorios que antes eran naturales (Angeoletto, 2015). Este crecimiento implica la necesidad de espacios más amplios para el establecimiento de estas áreas urbanas, lo que a su vez conlleva la transformación total o parcial de entornos naturales en espacios controlados y organizados por seres humanos (Díaz *et al.*, 2018). Estos cambios tienen un impacto directo en la redefinición de los servicios y recursos que ofrecen los ecosistemas urbanos (Lopera, 2005). El aumento de las áreas urbanas y la actividad humana representan una amenaza en constante crecimiento para los ecosistemas y la salud de las personas (Pataki *et al.*, 2011). En respuesta a este cambio de paradigma, que reconoce a la humanidad como parte integrante de la naturaleza, ha surgido un enfoque centrado en mejorar y proteger los servicios que los ecosistemas naturales brindan, con el fin de abordar los desafíos ambientales y promover la salud y el bienestar de las personas (Halpern *et al.*, 2013).

Las áreas verdes urbanas son elementos ligados completamente a los ecosistemas urbanos, los cuales proporcionan servicios ecosistémicos esenciales (Young, 2010). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO, por sus siglas en inglés) define los servicios ecosistémicos como la multitud de beneficios que la naturaleza aporta a la humanidad, y los clasifica en cuatro grupos: abastecimiento, regulación, apoyo y culturales (FAO, 2021).

Los servicios que brindan los espacios verdes urbanos han sido reconocidos, medidos y evaluados con diversos propósitos, como proporcionar información a la población, respaldar la planificación urbana y facilitar la toma de decisiones (Li & Wang, 2003). La evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles urbanos es una tarea compleja (Martínez-Trinidad, 2021), sin

embargo, en la actualidad existen programas informáticos especializados en este campo, como las herramientas de i-Tree (Cowett, 2014), desarrolladas por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (USDA, 2018). El programa i-Tree Eco ha sido adaptado en los últimos años para su uso en México (USDA, 2018), y resulta útil para determinar la estructura del bosque urbano, cuantificar la captura de carbono, la remoción de contaminantes atmosféricos y la reducción del escurrimiento de aguas pluviales, así como para calcular el valor monetario asociado a estos servicios (Martin *et al.*, 2011).

La vegetación tiene una influencia directa en la calidad del aire a través de la producción de oxígeno y la disminución de la temperatura, lo que resulta en niveles más bajos de ozono. Además, absorbe gases contaminantes a través de las hojas y captura partículas en suspensión, lo que contribuye a la mejora de la calidad del aire (Nowak *et al.*, 2006). Los árboles, desempeñan un papel crucial al interceptar y almacenar temporalmente el agua de lluvia en sus hojas, ramas y troncos. Esta agua se libera de manera gradual en el suelo o se evapora directamente a la atmósfera (Seitz *et al.*, 2008). Este proceso ayuda a reducir la escorrentía, mejora la calidad del agua que se infiltra y disminuye los costos y el tamaño de las infraestructuras necesarias para controlar las inundaciones y el aprovechamiento de aguas pluviales (San Juan, 2019).

Sin embargo, en las grandes ciudades es común encontrar una escasez de áreas verdes en relación con el número de habitantes, lo que indica una falta de planificación urbana adecuada (Flores, 2005). Esto se observa en el caso del Área Metropolitana de Monterrey, donde en los últimos años se ha experimentado un aumento en la expansión urbana, lo que ha tenido consecuencias directas en el medio ambiente debido a la pérdida de cobertura vegetal urbana (Rios Lizcano, 2019). Por otro lado, se ha demostrado que evaluar la distribución de las funciones ecológicas y los servicios proporcionados por los ecosistemas en entornos urbanos puede mejorar los esfuerzos para mitigar los problemas ambientales en las ciudades (Rees y Wackernagel, 1996).

2. ANTECEDENTES

Los parques y áreas verdes urbanas juegan un papel fundamental en la preservación de la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos al brindar una amplia diversidad de servicios ecosistémicos (Bodnaruk *et al.*, 2012). Sin embargo, la forma de medir y evaluar los beneficios y servicios ecológicos que proporcionan estos espacios sigue siendo un tema relevante en la actualidad, y su implementación en el diseño y la planificación urbana es aún limitada (Jennings *et al.*, 2012). Varios autores han abordado este tema a través de estudios y análisis que exploran diferentes aspectos relacionados con dicha evaluación. Algunos de los enfoques utilizados incluyen la investigación de la calidad del aire, el análisis de la biodiversidad, la valoración económica de los servicios ecosistémicos y la evaluación del bienestar humano. Estos estudios buscan comprender cómo los espacios verdes urbanos contribuyen a la sostenibilidad de los ecosistemas urbanos y cómo pueden ser aprovechados para brindar beneficios a las comunidades. A continuación, se mencionan algunos ejemplos:

- (1) En un estudio realizado en cuatro ciudades europeas (Berlín, Salzburgo, Helsinki y Estocolmo), se buscó evaluar los servicios ecosistémicos en un contexto urbano a nivel local y regional. Se utilizaron indicadores para representar la regulación del clima local, el enfriamiento por aire y la recreación, y se realizaron análisis espaciales a lo largo de un gradiente urbano-rural. Los resultados demostraron que no existe un patrón común de provisión de servicios ecosistémicos en el gradiente rural-urbano, y que no se encontró un modelo genérico aplicable a otras ciudades. Se observó que las ciudades no proporcionan menos servicios ecosistémicos en comparación con las regiones rurales, y no se identificaron áreas con un rendimiento muy alto en los indicadores. Además, se encontró que la impermeabilidad no necesariamente se relaciona con una baja provisión

de servicios ecosistémicos, siempre y cuando exista una estructura urbana con árboles maduros que contribuyan al almacenamiento de carbono y la biodiversidad. Este enfoque de evaluación proporciona información importante para la planificación urbana y la toma de decisiones sobre la protección de los recursos naturales y los servicios que brindan a la población (Larondelle, 2013).

(2) Con el objetivo de examinar el potencial del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile para hacer frente al cambio climático, se llevó a cabo un estudio que integró los conceptos de infraestructura verde urbana, servicios ecosistémicos y adaptación/mitigación al cambio climático. Se evaluaron tres servicios ecosistémicos clave: el efecto refrescante, la mitigación de inundaciones y las rutas alternativas no motorizadas. Estos servicios se seleccionaron después de una consulta con un panel de 21 expertos y actores locales, que acordaron reducir una lista inicial de 15 servicios. El área de estudio se definió como un análisis de “buffer” de 200 metros alrededor del río en su tramo urbano. La evaluación de los servicios ecosistémicos se realizó utilizando diferentes metodologías para cada uno de ellos. Para medir el efecto refrescante, se realizaron transectos y se recopilaron mediciones apoyadas por estaciones meteorológicas móviles. En el caso de la mitigación de inundaciones, se utilizaron mapas de riesgo analizados a través de sistemas de información geográfica. En cuanto al uso de las rutas no motorizadas, se llevaron a cabo encuestas para determinar la frecuencia de utilización de estas rutas. Los resultados de la evaluación de los servicios ecosistémicos en este corredor destacan su contribución para hacer frente al cambio climático y ofrecen orientación para mejorar tanto cuantitativa como cualitativamente estos servicios. El estudio resalta la importancia del corredor ribereño del río Mapocho como una infraestructura verde urbana que brinda beneficios valiosos para la ciudad

en términos de adaptación y mitigación del cambio climático (Vásquez, 2016).

(3) Con el propósito de investigar la estructura, diversidad y los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles en cuatro parques de la ciudad de Texcoco de Mora, en el Estado de México, se llevó a cabo un censo y análisis de las áreas verdes seleccionadas. El enfoque principal del estudio fue evaluar cuatro servicios ecosistémicos específicos: captura de carbono, producción de oxígeno, remoción de contaminantes y reducción del escurrimiento. Estos servicios fueron estimados utilizando el software i-Tree Eco. Los resultados obtenidos a través de esta investigación son valiosos para respaldar la conservación y la gestión adecuada del arbolado urbano en la ciudad. El estudio proporciona información relevante que puede utilizarse para argumentar a favor de la importancia de mantener y administrar de manera adecuada los árboles en el entorno urbano (Martínez-Trinidad *et al.*, 2021).

3. JUSTIFICACIÓN

La zona metropolitana de Monterrey, ubicada en el norte de México, es reconocida como uno de los centros urbanos más importantes del país. A pesar de estar situada en una zona semidesértica, ha experimentado un crecimiento acelerado en los últimos años. Según el último censo realizado por el INEGI en 2020, la zona metropolitana de Monterrey cuenta con una población de 5.3 millones de habitantes, lo que la convierte en la segunda metrópoli más poblada de México (Antonio Flores, 2020). En muchas ocasiones, los habitantes de la ciudad de Monterrey, al igual que ocurre en otras áreas urbanas, no suelen valorar los beneficios ambientales que ofrecen las especies ornamentales presentes en las áreas verdes urbanas (Flores, 2005).

Estas zonas verdes aportan múltiples valores ecológicos que a menudo no se perciben de manera directa. Este estudio tiene una importancia significativa en la generación de conocimiento sobre los parques del municipio de Monterrey, ya que ofrece un enfoque de evaluación de los servicios ecosistémicos proporcionados por estas áreas verdes. Al centrarse en los servicios que brindan los parques, se contribuye a comprender su valor y beneficios para el bienestar de la comunidad y el medio ambiente (Ortíz López, 2014).

Mediante la evaluación de los servicios ecosistémicos, este estudio proporciona información sobre los diversos beneficios que los parques ofrecen, como la captura de carbono, la remoción de contaminantes, la retención de agua de lluvia y otros servicios relevantes. Estos resultados pueden ser utilizados por los responsables de la toma de decisiones y planificación urbana para promover la conservación y gestión efectiva de los parques, así como para fomentar la valoración de estos espacios por parte de la comunidad.

4. HIPÓTESIS

Existen diferencias entre el potencial de los servicios ecosistémicos de regulación que brindan los parques en el municipio de Monterrey.

5. OBJETIVOS

Objetivo general:

Evaluar el potencial que proporcionan los servicios ecosistémicos de regulación en parques del municipio de Monterrey.

Objetivos específicos:

1. Cuantificar la captura de CO₂ en los parques establecidos.

2. Cuantificar los contaminantes atmosféricos absorbidos por los árboles dentro de los parques establecidos.
3. Cuantificar la escorrentía evitada en los parques establecidos.
4. Evaluar la estructura y composición del arbolado urbano de los parques
5. Cuantificar los compuestos orgánicos volátiles emitidos por los árboles en los sitios.

6. MATERIALES Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio.

En esta investigación, se ha considerado el municipio de Monterrey como el área de estudio (Figura 1). Este municipio se encuentra ubicado en la latitud norte 25°40' y longitud oeste 100°18', a una altitud de 537 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con los municipios de San Nicolás, García y Escobedo, al sur con los municipios de San Pedro y Santiago, al este con Guadalupe y Juárez, y al oeste con Santa Catarina. Su extensión territorial comprende 323.60 km² (Antonio Flores, 2020).

Monterrey se encuentra en la provincia fisiográfica de la Sierra Madre Oriental en un 71.29% de su territorio, y en la provincia fisiográfica de la Llanura Costera del Golfo en un 28.71% (Antonio Flores, 2020). El área metropolitana de Monterrey está rodeada por el matorral submontano, y en los últimos años ha experimentado un considerable aumento en su extensión territorial (Estrada-Castillón *et al.*, 2012).

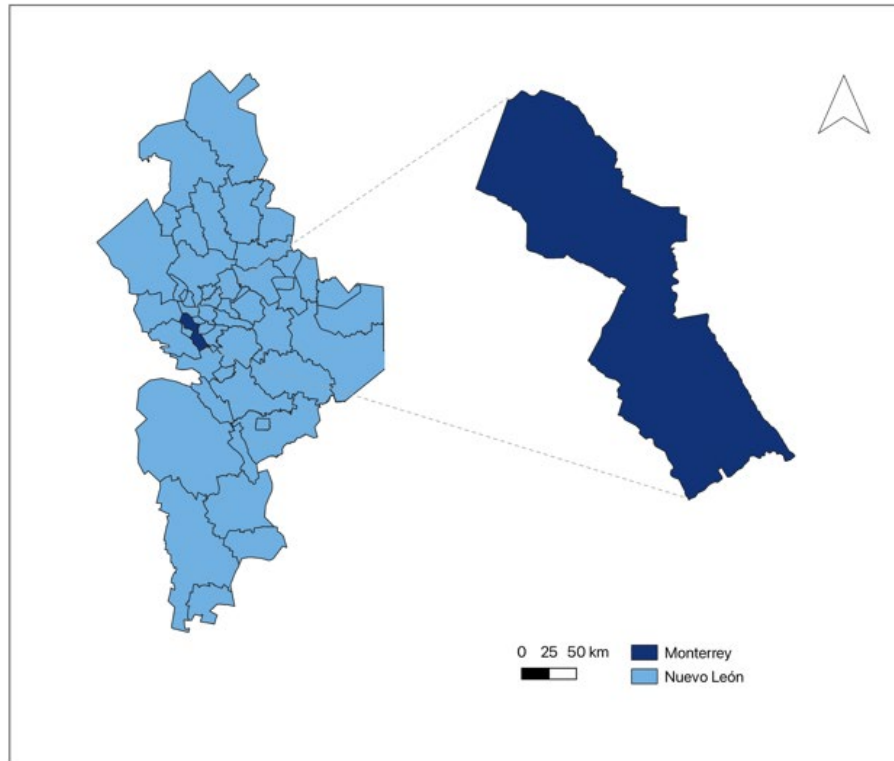


Figura 1. Área de estudio.

De acuerdo con la guía de interpretación de cartografía climatológica del INEGI, el municipio de Monterrey se encuentra ubicado en una zona climática subtropical de alta presión atmosférica, con influencia significativa de factores orográficos en la regulación del entorno regional. Según la clasificación de Köppen para México, el clima característico de la zona es seco estepario, cálido y extremo, con una temperatura media de 22°C. Durante el verano, las temperaturas máximas pueden alcanzar los 45°C, mientras que en invierno las mínimas pueden descender hasta -2°C (Contreras y González, 1999; García, 2004). Las precipitaciones pluviales son irregulares, y la cantidad de lluvia promedio anual varía entre 400 y 700 milímetros, con una notable variabilidad a lo largo del año (Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey, 1988).

En cuanto a la vegetación de los parques y jardines del municipio de Monterrey, se destaca que aproximadamente el 80% de las plantas presentes no son nativas de la región. Esta preferencia por especies exóticas o introducidas se debe

principalmente a consideraciones estéticas por parte de los habitantes. Sin embargo, esta tendencia está cambiando, y cada vez se valora más el uso de especies nativas. Durante la década de los 90's, hubo un notable esfuerzo de arborización con especies nativas en Monterrey, incluyendo la plantación a gran escala de encinos, mezquites, ébanos, anacahuitas, anacuas, entre otras especies. Este avance refleja la creciente conciencia de la sociedad acerca de los beneficios que brindan las especies nativas. En cuanto a las especies más representativas, destacan los géneros *Quercus*, *Fraxinus* y *Pinus* (Flores, 2005).

6.2 Identificación y selección de los parques.

El término "parque" se refiere a áreas que cuentan con vegetación y están diseñadas con el propósito de proporcionar beneficios a los habitantes de la ciudad a través de los servicios ecosistémicos que ofrecen. Estos espacios deben ser de acceso público y estar disponibles para la población en general (Martínez-Valdés *et al.*, 2020). Para la selección del área de estudio, se utilizaron datos obtenidos de archivos shape disponibles en el portal web del INEGI, los cuales corresponden a áreas verdes públicas. Estos datos fueron procesados y analizados utilizando el software QGIS.

Para realizar una selección adecuada, se tuvo en cuenta el tamaño de cada parque. Con el objetivo de estandarizar los datos, se excluyeron las áreas verdes que tenían un tamaño inferior a 0.5 ha y aquellas que superaban las 10 ha. De esta manera, se incluyeron aquellos espacios que podrían ser más accesibles para la población en general.

Con el objetivo de establecer una clasificación del tamaño de los parques y garantizar la representatividad en la selección, se optó por dividirlos en tres categorías de área. Para determinar los límites de cada categoría, se dividieron el número total de parques del municipio de Monterrey en tres partes iguales (Figura 2): el primer cuartil (Q_1), el segundo cuartil (Q_2) y el tercer cuartil (Q_3). A partir de las medias obtenidas en cada cuartil, se seleccionaron de manera

aleatoria parques que tuvieran un tamaño aproximado a dichas medias. Este enfoque permitió asegurar una distribución equilibrada de los parques en cada categoría y respaldar la validez de la metodología utilizada.

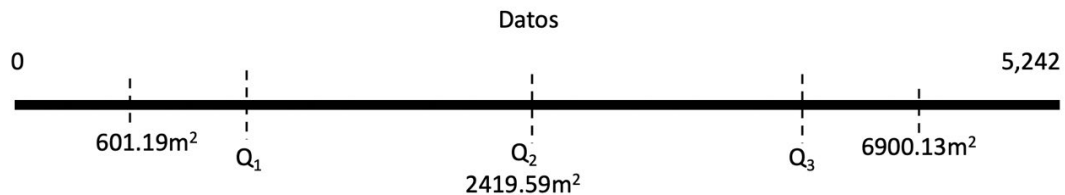


Figura 2. División de cuartiles y medias para los parques.

Se estableció un rango de tamaños de superficie para clasificar los parques seleccionados. Los parques de tamaño chico (CH) corresponden a aquellos con una superficie aproximada de 0.5 a 1.0 ha. Los parques de tamaño mediano (M), tienen una superficie estimada entre 1 y 2 ha, mientras que los parques de tamaño grande (G) son aquellos con una superficie superior a 2 ha. En total, se seleccionaron 3 parques por cada tamaño, lo que suma un total de 9 parques. Además de los criterios de tamaño o área, se consideraron los siguientes aspectos en la selección de los parques:

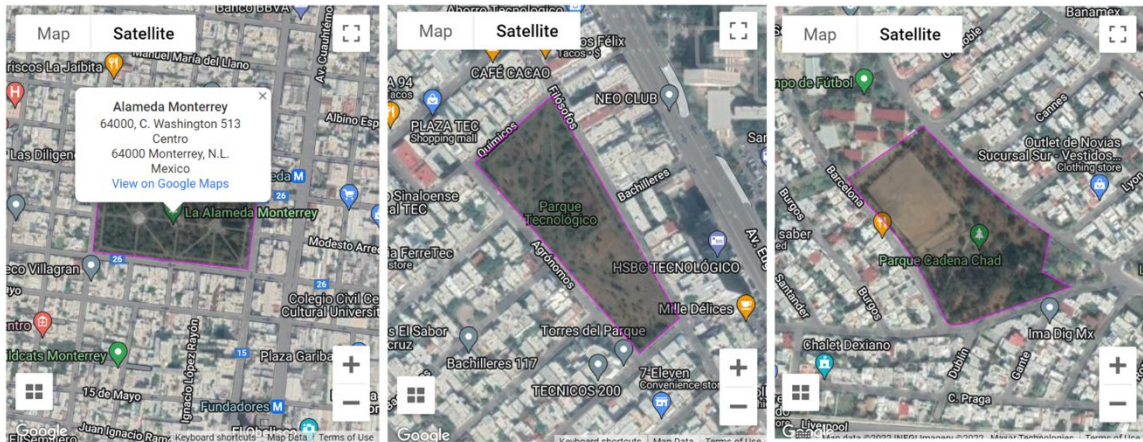
A) Ser parques completamente públicos, excluyendo aquellos ubicados dentro de centros educativos, hospitales, edificios públicos u otros espacios no accesibles al público en general.

B) No estar situados dentro de áreas residenciales privadas. Aunque las áreas verdes residenciales ofrecen servicios ecosistémicos para los residentes, se priorizó la inclusión de parques que estuvieran disponibles para toda la población.

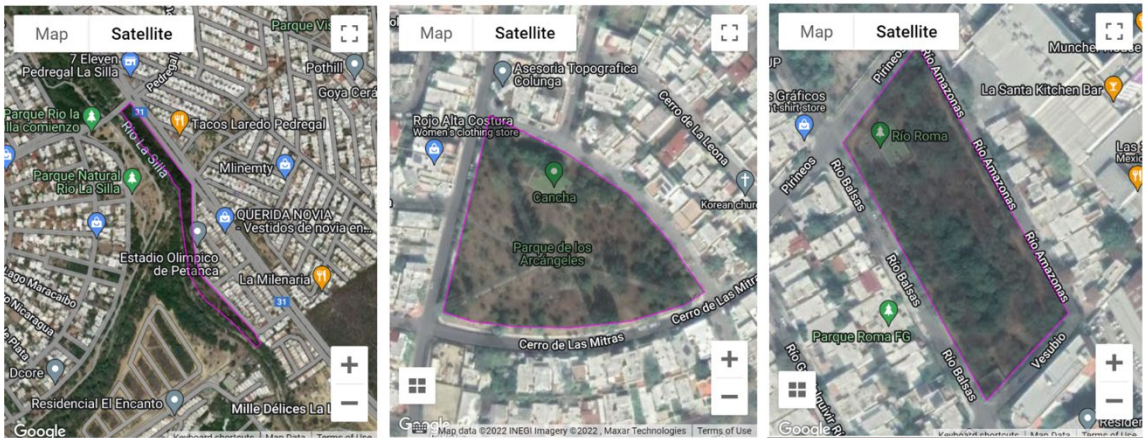
C) Estar ubicados fuera de zonas conflictivas o reconocidas como inseguras. Este criterio se aplicó de forma preventiva, evitando la selección de parques en áreas con altos índices de delincuencia o problemas de seguridad.

6.3 Establecimiento de parcelas de muestreo.

Se implementó un enfoque de pre-estratificación basado en el protocolo de i-Tree Eco V6 para establecer parcelas de muestreo en el área de estudio. Este enfoque permitió examinar con mayor detalle las diferencias entre los sitios (I-Tree Eco, 2020). Se agregaron los archivos *shape* de cada uno de los parques seleccionados, lo que permitió visualizar cada área utilizando la vista satelital de Google Maps (Figura 3).



Parques G



Parques M



Parques CH

Figura 3. Vista de los diferentes tamaños de parques.

Posteriormente, se asignaron las dimensiones de cada parcela de muestreo. Se acordó que cada parque tendría parcelas de muestreo que representarían el 10% de su superficie. En consecuencia, se establecieron tres parcelas en cada parque, con un radio que variaba en función del tamaño de cada parque, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de las parcelas de muestreo.

ID	NOMBRE	SUP (m2)	N de parcelas	10% medido	Sup muestreada/p	Tamaño de p	Radio de parcela
8180	Alameda General Mariano Escobedo	64139.64	3	10%	6414.0	2138.0	26.1
9836	Parque. Col Tecnológico	25034.61	3	10%	2503.5	834.5	16.3
9105	Parque Col. Las Torres	28343.84	3	10%	2834.4	944.8	17.3
9102	Parque Roma	11710.14	3	10%	1171.0	390.3	11
9117	Parque de los Arcángeles	11371.03	3	10%	1137.1	379.0	11.1
1180	Parque Río la Silla	17833.29	3	10%	1783.3	594.4	13.8
9196	Parque Col. Balcones de Altavista	5621.85	3	10%	562.2	187.4	8.5
1117	Parque CD. SATELITE	6545.32	3	10%	654.5	218.2	8.7
9144	Parque del Chorro	6334.23	3	10%	633.4	211.1	9.6

Durante el período del 16 al 27 de julio de 2022, se recolectaron los datos de campo, asegurando que en ese momento los árboles estuvieran cubiertos de hojas. El objetivo era identificar y medir con precisión las especies arbóreas y arbustivas presentes en cada sitio. Específicamente, la información recopilada para cada parcela incluyó los siguientes aspectos:

- A) Porcentaje de cobertura de árboles y arbustos.
- B) Área disponible para la plantación.
- C) Tipos de cobertura del suelo bajo el dosel.

Para las especies arbustivas, se registraron los siguientes datos:

- A) Porcentaje de área cubierta por los arbustos.
- B) Porcentaje de copa faltante
- C) Altura media de los arbustos.

Para los árboles, se registró la siguiente información:

- A) Especie (nombre científico y común).
- B) Altura total del árbol, altura desde la base hasta las ramas vivas más altas y altura hasta la base de la copa.
- C) Diámetro a la altura del pecho (DAP) medido a 1.3 metros de altura.
- D) Porcentaje de copa faltante
- E) Diámetro de la copa en dirección norte-sur y este-oeste.
- F) Estado de salud de la copa (porcentaje de muerte regresiva).
- G) Exposición a la luz de la copa (cantidad de lados que reciben luz).

6.4 Modelización y análisis

El modelo de I-Tree Eco utiliza información del inventario forestal, que incluye datos sobre el vigor, salud y condición de los árboles, para realizar sus estimaciones. Además, requiere datos climáticos y concentraciones promedio de contaminantes atmosféricos para calcular las características estructurales de la población arbórea y los servicios ecosistémicos que proporciona (US Forest Service International Programs & Davey Tree Expert Company, 2017).

El modelo se compone de tres partes principales: el inventario forestal, la clasificación de especies arbóreas y la localización de la zona urbana, que incluye datos sobre clima y contaminación. Utilizando esta información de entrada, el modelo genera varias salidas, que incluyen la composición estructural del bosque urbano, el almacenamiento y retención de carbono, la calidad del aire, el control de escurrimientos, los compuestos volátiles y la valoración económica de los servicios ecosistémicos proporcionados por el bosque urbano (Rodríguez, 2022).

Los datos de las concentraciones de contaminantes y estado de tiempo fueron añadidos de un estudio realizado por el INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático) en el Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero del 2015, donde se incluyeron datos de las concentraciones horarias de NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀, y PM_{2.5}. Los datos meteorológicos fueron añadidos de la estación meteorológica de la Comisión Nacional del Agua, ubicada en el municipio de Monterrey. Una vez recopilados los datos de los parques seleccionados y los datos obtenidos a través de i-Tree Eco, se llevó a cabo la organización y procesamiento de dicha información mediante archivos de Excel. Los datos del modelo fueron filtrados para obtener los resultados correspondientes a las parcelas y los parques, así como los resultados individuales de cada uno de ellos. Este proceso permitió obtener una visión más clara y específica de los datos recabados, facilitando su análisis y posterior interpretación.

7. RESULTADOS

En esta investigación, además de enfocarse en evaluar los servicios ecosistémicos de regulación, se analizó la extensión de áreas verdes en el municipio de Monterrey utilizando datos proporcionados por el INEGI. También se llevaron a cabo clasificaciones de tamaños para comparar el potencial de los servicios ecosistémicos evaluados. Los resultados obtenidos nos permitieron identificar la composición y estructura del arbolado urbano, así como analizar parámetros ecológicos como los índices de diversidad.

Después de procesar los archivos obtenidos de INEGI, se registraron un total de 1479 polígonos. El resultado de la distribución de los parques se encuentra dentro de la zona centro y parte de la zona sur del municipio (Figura 4).

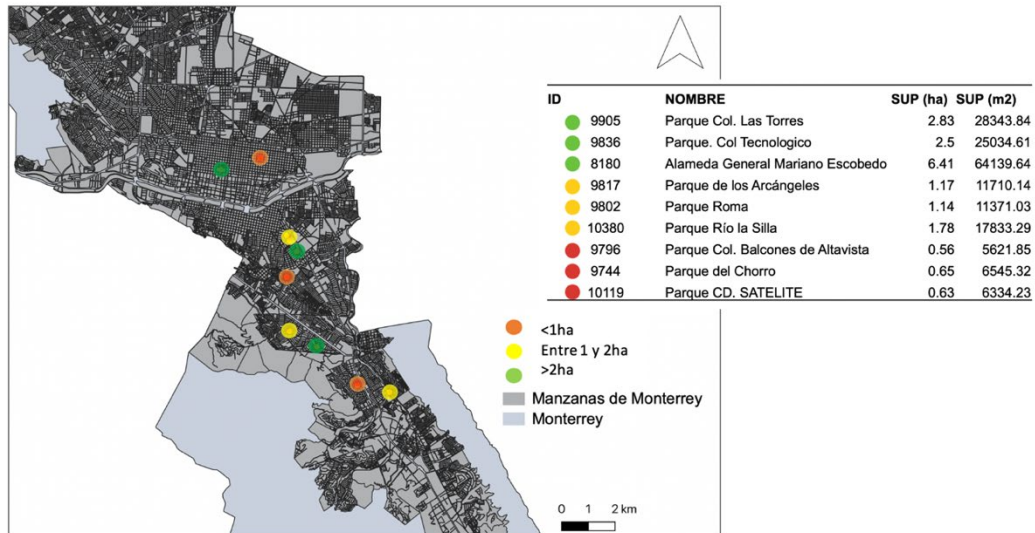


Figura 4. Distribución de los parques seleccionados por tamaño.

La mayoría de los parques seleccionados se encuentran en áreas residenciales, con la excepción de dos parques ubicados en el centro de la ciudad, "La Alameda General Mariano Escobedo" y el "Parque del Chorro". Los parques "Roma", "Tecnológico" y el de la colonia Balcones de Altavista se encuentran al comienzo de la zona sur del municipio. Los demás parques se encuentran distribuidos en la zona sur, incluyendo el parque de la colonia Las Torres, "Los Arcángeles" en la colonia Del Paseo, el parque de la colonia Satélite y una sección del parque ubicado a lo largo del Río La Silla.

Los resultados revelan que en toda el área de estudio se estima la presencia de un total de 2408 árboles. Sin embargo, la cobertura generada por estas especies arbóreas es relativamente baja, alcanzando solo el 48.6% en consideración de que estos resultados no corresponden a un solo parque. La paleta de especies arbóreas incluye un total de 31 especies, siendo *Fraxinus americana*, *Quercus virginiana* y *Eucalyptus spp.* las más predominantes.

En términos de la estructura del arbolado urbano, se observa que el 23.5% de los árboles se encuentran en categorías de diámetro inferiores a los 15.2 cm. En relación con la evaluación de los servicios ecosistémicos en el área de estudio, se estimaron 688.7 kg/año de contaminantes (NO₂, SO₂, CO, O₃, PM₁₀ y PM_{2.5}). Asimismo, se determinó una captura de carbono de 23.3 toneladas. Se estima que los árboles evitan el escurrimiento de 742.1 m³ de agua anualmente.

Además, se realizó una valoración económica de los 9 parques seleccionados, estimando su valor de sustitución en 59.3 millones de pesos mexicanos. Esto proporciona una idea aproximada del valor económico asociado a estos espacios verdes.

7.1 Composición y estructura del arbolado de los parques.

Los informes obtenidos revelan que hay una variación en la densidad de árboles según las diferentes categorías de tamaño de los parques (Figura 5). Se observa que los parques más densos en términos de número de árboles por hectárea no pertenecen a la categoría de tamaño "Grande" (G). De hecho, el parque de la colonia Satélite, ubicado en la categoría "Chica" (CH), es el que presenta la mayor cantidad de árboles, con más de 250 árboles por hectárea.

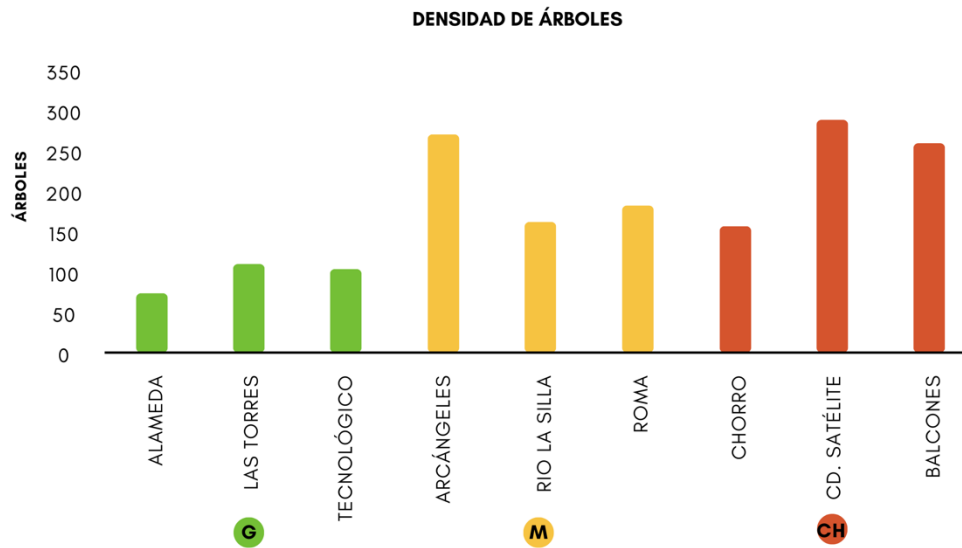


Figura 5. Densidad de árboles.

En relación con las especies presentes en los parques evaluados, se observa que el fresno blanco (*Fraxinus americana*) es la especie más común en los sitios de muestreo, representando el 46.5% de las especies identificadas. Le sigue el encino roble (*Quercus virginiana*) con un 15.2% de presencia. Las demás especies presentes tienen un porcentaje muy bajo de presencia en los sitios (Figura 6).

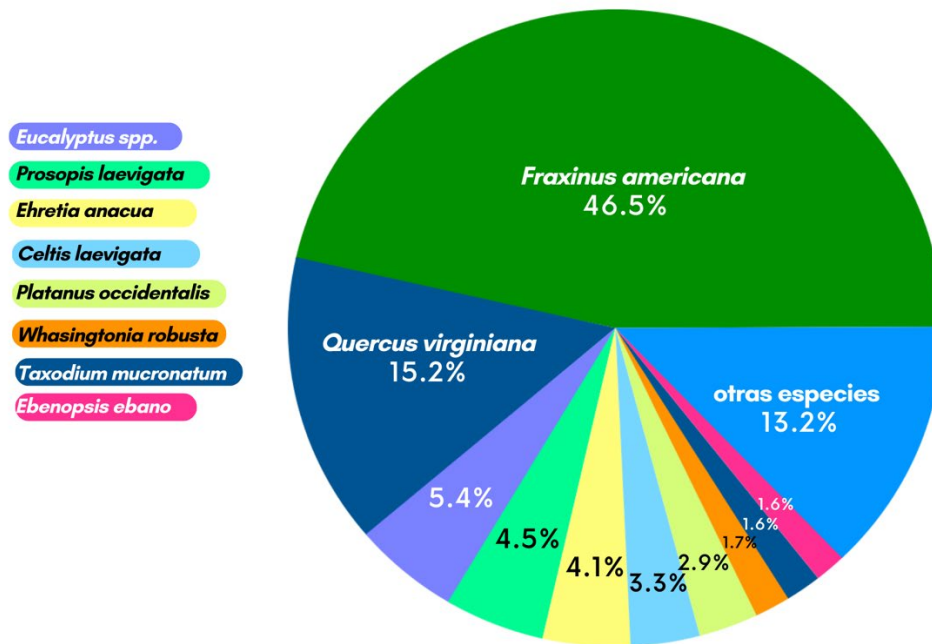


Figura 6. Composición de especies en los parques estudiados.

Es importante destacar que, de las dos especies más abundantes, solo *Quercus virginiana* es nativa de Monterrey, mientras que *Fraxinus americana*, aunque es nativa del norte de América, no está adaptada a las condiciones existentes en esta ciudad. Sin embargo, los parques también incluyen otras especies nativas, aunque en proporciones más bajas (Figura 6). El análisis reveló que el 83% de las especies evaluadas en este estudio son nativas de la región norte de América (Figura 7).

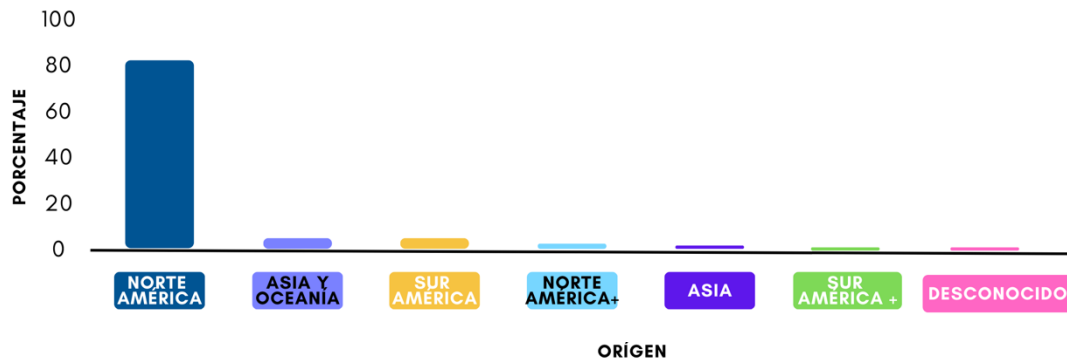


Figura 7. Porcentaje de la población de árboles según su origen.

La mayoría de los árboles evaluados se encuentran en categorías de diámetro superiores a 15.2 cm, con un 23.5% de árboles clasificados en categorías inferiores a esta medida. Sin embargo, se observa que aproximadamente el 20% de los árboles tienen diámetros que superan los 30.5 cm, lo cual indica la presencia de árboles de mayor tamaño en el área de estudio. Además, se identificó una proporción minoritaria, representando menos del 1%, de árboles con diámetros superiores a 106 cm, lo cual indica la existencia de árboles de gran tamaño en el entorno evaluado (Figura 8).

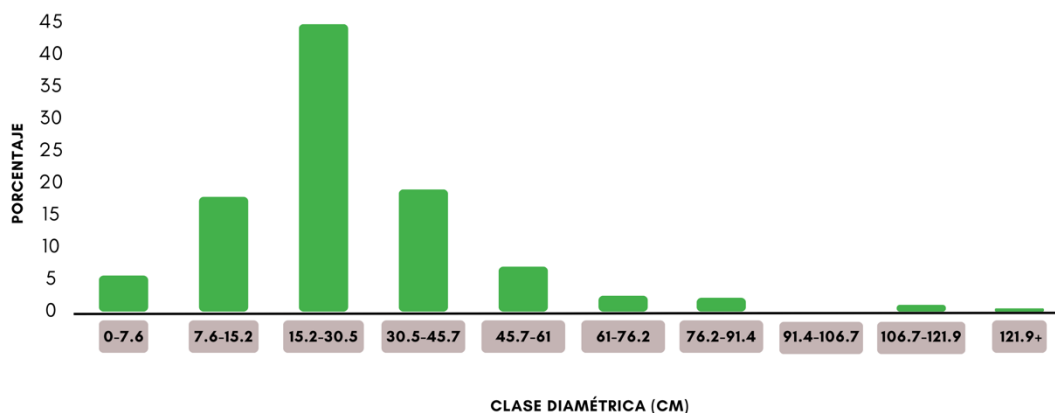


Figura 8. Clases diamétricas de los árboles.

La evaluación de los servicios ecosistémicos en este estudio revela una estrecha relación con las características de los árboles muestreados, como el diámetro, la altura y el tamaño de la copa. Se observa que los árboles con diámetros más grandes tienen una mayor superficie foliar saludable, lo que resulta en beneficios significativos proporcionados por el arbolado urbano. Los resultados presentados en la Figura 9 muestran que los parques de mayor tamaño tienen una mayor área foliar, como es el caso del parque Río La Silla, debido a la presencia de árboles con los diámetros más grandes entre todos los parques muestreados.

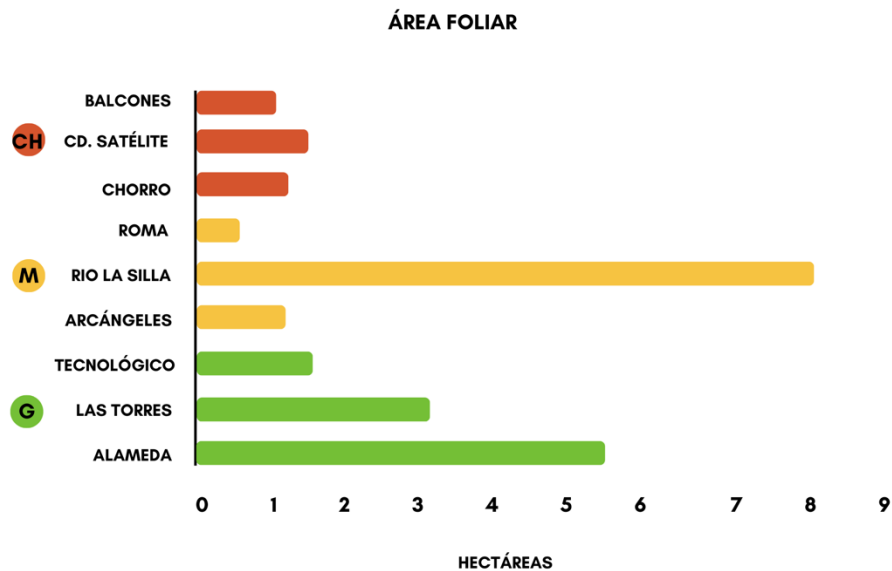


Figura 9. Área foliar en hectáreas de cada parque.

En términos de diversidad de especies, se observa que los parques de mayor tamaño, como Alameda y Las Torres, presentan una mayor cantidad de especies muestreadas en las parcelas, con 14 y 11 especies, respectivamente. Por otro lado, el parque Roma se destaca por tener el número más bajo de especies encontradas en las parcelas, con solo dos especies registradas. Sin embargo, es importante destacar que el valor del índice de diversidad de Simpson es más alto en el parque Río La Silla. La Tabla 2 proporciona una descripción detallada de

los parques, permitiendo una comparación de los valores de área foliar. Se observa que aquellos parques con una baja riqueza de especies también presentan una cobertura foliar reducida.

Tabla 2. Caracterización de la vegetación en los diferentes parques estudiados.

	Parque	Número de árboles	Porcentaje de población	Árboles/ha	Área foliar (ha)	SPP/ha	Riqueza	I. Simpson
G	Alameda	489	20.3%	76.3	5.83	21.8	14	4.8
	Las Torres	318	13.2%	112.3	3.06	38.6	11	4.7
	TEC	268	11.1%	107.1	1.52	15.9	4	1.3
M	Arcang	320	13.3%	273.5	1.16	59.8	7	5.7
	Roma	209	8.7%	184.2	0.56	17.5	2	1.4
	Rio La Silla	297	12.3%	166.7	8.16	38.9	7	6.1
CH	Balcones	173	7.2%	260.9	1.04	87.0	6	3.6
	CDSatelite	207	8.6%	291.7	1.45	41.7	3	1.4
	Chorro	126	5.2%	160.5	1.19	61.7	5	6.4
	Área de estudio	2,408	100.0%	133.8	23.98	17.1	31	4.4

7.2 Servicios ecosistémicos evaluados

7.2.1 Reducción de la contaminación

La cantidad de contaminantes capturados por los árboles muestreados se estima en 0.00038 toneladas por hectárea al año. Aunque estos valores pueden parecer bajos, es importante tener en cuenta que se refieren a un área de superficie no mayor a 17.6 ha. Al analizar los resultados por categoría de tamaño de parques, se observa que, en promedio, los parques grandes capturan una mayor cantidad de contaminantes en comparación con los parques pequeños. Sin embargo, los valores para los parques medianos son muy similares a los de los parques grandes, mientras que los parques pequeños muestran valores considerablemente más bajos, esto se puede observar en la Tabla 3.

Tabla 3. Captación de contaminantes por tamaño de parque.

Contaminante	Cantidad gramos/ha/año		
	G	M	CH
Ozono (O ₃)	1335.1	1234.1	485.3
Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	150.99	139.6	54.87
Dióxido de Azufre (SO ₂)	316.31	292.36	114.99
Partículas Menores a 2.5	62.74	58.04	22.83
Partículas Menores a 10	1143.02	1056.5	415.48
Captación de contaminantes	3008.2	2780.6	1093.5

Es relevante destacar que la temporada del año en la que se recopilaron los datos también influye en la captación de contaminantes en el área de estudio. Se observa que la contaminación captada es mayor durante el verano en comparación con la temporada de invierno. Esto se debe a que, durante el verano, el área foliar de los árboles es mayor, mientras que en otoño e invierno se produce una pérdida de hojas. Estos cambios estacionales afectan la capacidad de los árboles para capturar contaminantes, lo cual se refleja en los resultados mostrados en la Figura 10.

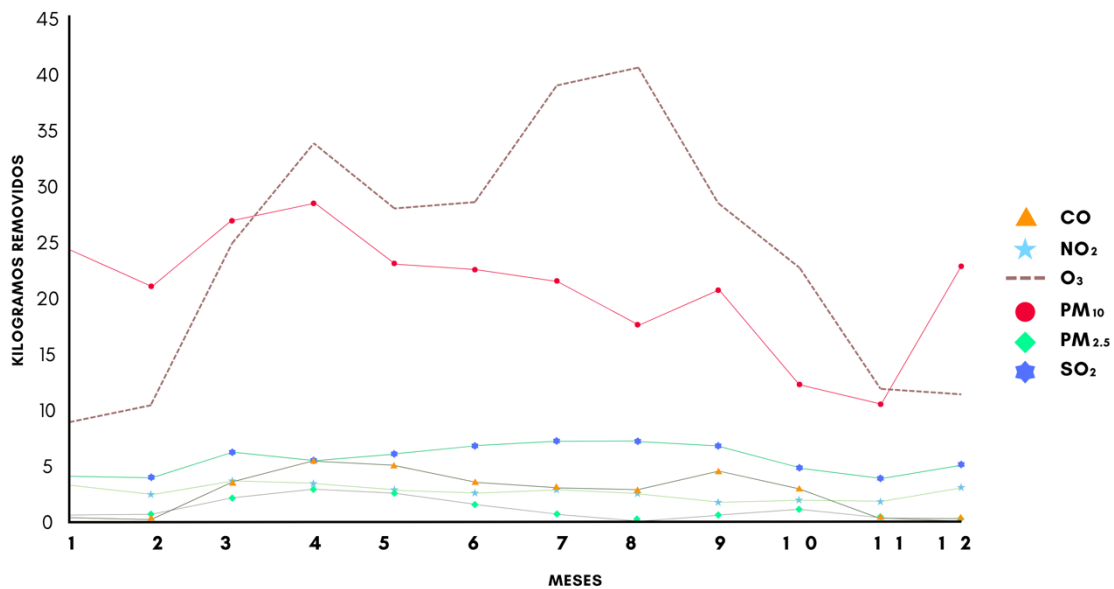


Figura 10. Captación de contaminantes a través de los meses.

El principal contaminante capturado por los árboles en el área de estudio es el ozono (O₃), seguido de las partículas PM₁₀. Además, se observa una disminución en la concentración de los demás contaminantes durante los últimos meses del año, excepto en el caso de las PM₁₀, cuya concentración aumenta durante ese período. Esta información sugiere que los árboles tienen una capacidad significativa para capturar y reducir la presencia de ozono y partículas PM₁₀ en el entorno, lo cual es beneficioso para la calidad del aire en la zona estudiada.

7.2.2 Captura de carbono.

Se ha estimado que los parques muestreados capturan un total de 25.33 de dióxido de carbono (CO₂) al año. Al analizar los resultados de forma individual, se identificaron las 10 especies con mayor capacidad de captura de carbono en toda el área de estudio (Figura 11).

La especie que presenta la mayor contribución en este servicio ecosistémico es *Fraxinus americana*, con una captura de aproximadamente 10 toneladas de CO₂ al año, seguida de ~~cerca por~~ la especie *Quercus virginiana* con una captura de 5.5 toneladas de CO₂ al año. Estas dos especies son las únicas que superan la marca de 1 tonelada de captura de carbono, lo que demuestra su importante papel en la mitigación del cambio climático y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

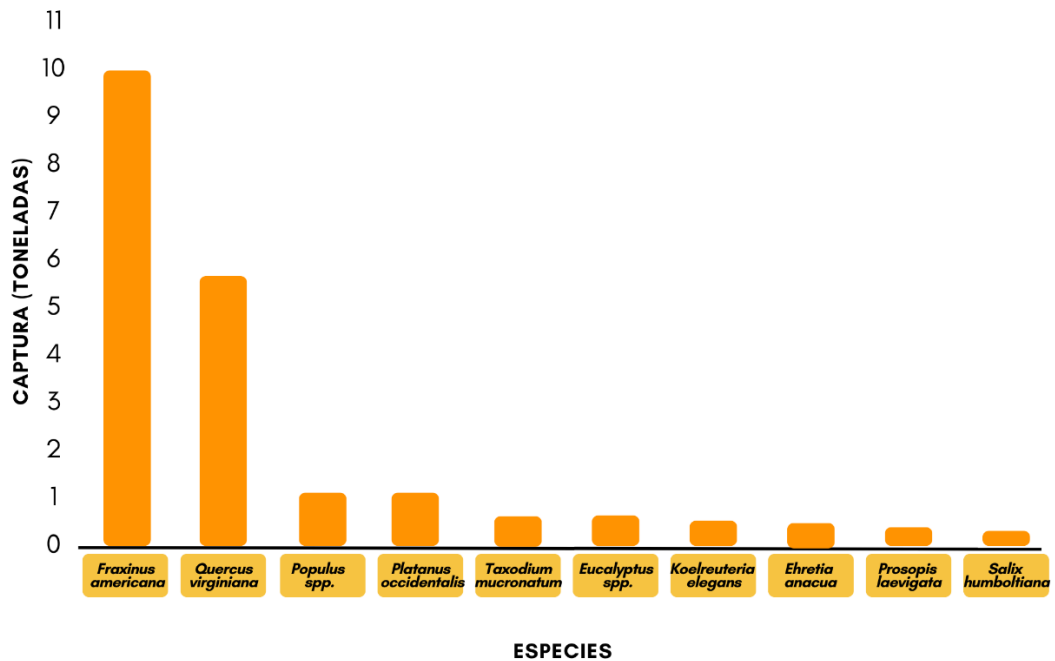


Figura 11. Captura de CO₂ de las principales 10 especies observadas en los parques.

Los resultados obtenidos para cada tamaño de parque fueron calculados tomando en cuenta la media global de los 3 parques de cada categoría, considerando también la superficie de los sitios.

La Figura 12 presenta los resultados de la captura promedio por hectárea, revelando que los parques de tamaño pequeño muestran una mayor capacidad de captura en comparación con los parques grandes, mientras que los parques medianos presentan el valor más bajo de captura.

Esto indica que, en términos relativos, los parques más pequeños son más eficientes en la captura de carbono por unidad de área, mientras que los parques grandes muestran una menor eficacia en este aspecto.

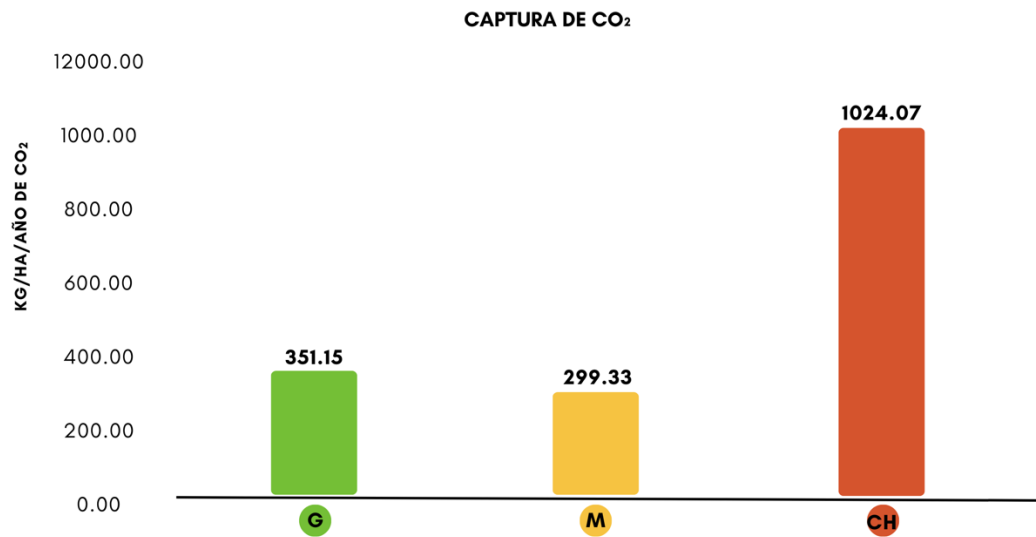


Figura 12. Captura de CO₂ media de los tamaños de parques.

7.2.3 Intercepción de agua de lluvia

El volumen de escorrentía evitada en el conjunto de parques muestreados se estima en 742 m³ por año. En cuanto a las especies que contribuyen en mayor medida a la reducción de la escorrentía, se destaca el *Fraxinus americana* con aproximadamente 350 m³, seguido por el *Taxodium mucronatum* con 100 m³. La Figura 13 muestra el aporte de las demás especies en este aspecto.

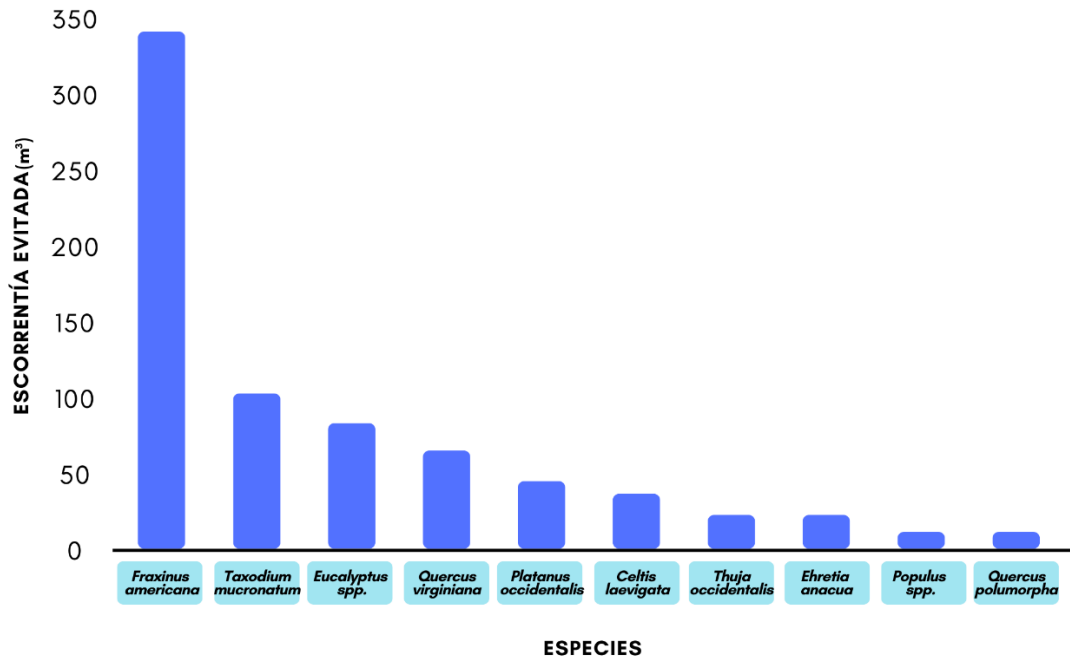


Figura 13. Volumen de escorrentía evitada por las principales especies.

Los resultados muestran que, en promedio, los parques de menor tamaño tienen una mayor capacidad para evitar la acumulación de agua en comparación con los parques de tamaño mediano y grande. Aunque la diferencia entre los parques pequeños y medianos es mínima, con solo 0.22 m³ de separación, los parques más grandes presentan una capacidad de retención de agua considerablemente inferior (Figura 14).

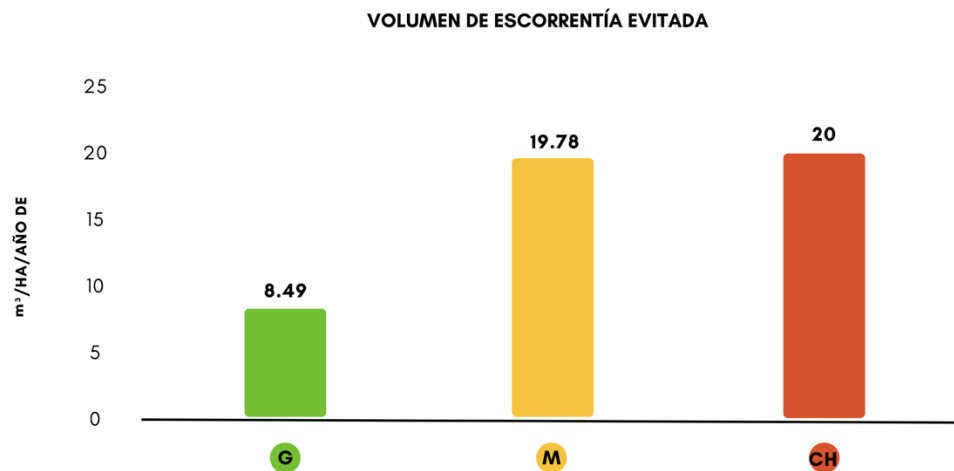


Figura 14. Escorrentía evitada media según el tamaño de parque.

7.3 Compuestos orgánicos volátiles biogénicos

Según los resultados obtenidos, se estima que en total se emiten 93.8 kg por año de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) en el arbolado de los parques muestreados. De esta cantidad, se estima que los isoprenos representan 58.4 kg por año, mientras que los monoterpenos corresponden a 35.3 kg por año. Es importante destacar que no todas las especies muestreadas emiten estos compuestos químicos naturales, ya que solo 10 de las 31 especies evaluadas son responsables de las emisiones de VOCs (Anexo 1), lo cual no indica una situación alarmante en el caso particular de los parques estudiados. Sin embargo, los resultados revelan que dos géneros *Quercus* y *Eucalyptus*, son responsables de la mayor parte de las emisiones, representando el 60.5% y el 28.2% del total de emisiones, respectivamente, mientras que el resto de las especies contribuye en menor medida.

8. DISCUSIÓN

En esta sección se analizan los resultados obtenidos en relación con los objetivos planteados para este estudio. Uno de los principales resultados observados se refiere a la relación entre el tamaño de los parques y los servicios ecosistémicos que proporcionan. Se observó cómo su tamaño y las diferentes características de los sitios influye en la prestación de estos servicios.

Los resultados para cada servicio ecosistémico muestran similitudes y diferencias según el servicio evaluado. En cuanto a la remoción de contaminantes, los parques grandes y medianos presentan cifras similares, esto indica que no hay una gran diferencia en la capacidad de remoción de contaminantes entre estos tamaños de parques. Sin embargo, los parques pequeños muestran una diferencia notable, ya que remueven un tercio de los parques grandes. En comparación, se encontró una remoción mucho menor en los parques de Texcoco, con solo 0.06 mg de contaminantes por año, debido a sus dimensiones más pequeñas de 2.3 ha en contraste con las 17.6 ha de esta investigación. Por otro lado, Arceo y colaboradores (2023) presentaron resultados superiores en la remoción de contaminantes en un espacio verde en la ciudad de Colima, con 214.3 kg de contaminantes removidos. Varios factores pueden influir en estos resultados, como la cantidad de contaminantes presentes en la ciudad, la cantidad de árboles evaluados y las especies presentes en los sitios (Malpartida Perez, 2021).

La cantidad de dióxido de carbono (CO₂) capturado en los 9 parques evaluados en este estudio varía en menor medida entre los parques grandes y medianos, mostrando resultados similares a los obtenidos en la remoción de contaminantes. En promedio, los parques más grandes capturan 351.15 kg de CO₂, mientras que los parques medianos capturan 299.33 kg, lo que representa una diferencia de solo 52 kg de CO₂. Sin embargo, la mayor diferencia se observa en los parques más pequeños, donde se capturaron 1024.07 kg de CO₂. Esto indica que los

parques de menor tamaño son los que capturan la mayor cantidad de dióxido de carbono. Contrastante con lo reportado en un estudio en China, donde reportan la estimación de captura de CO₂ en 4973 toneladas (Song *et al.*, 2020), una cantidad muy superior a lo reportado en esta investigación, debido a que fueron evaluados diferentes estratos de áreas verdes. Por otra parte, con un estudio realizado en el jardín botánico Celestino Mutis, en Bogotá, en donde se reporta 18.94 toneladas de CO₂ capturado, utilizando i-Tree como modelo para la estimación (Martínez y Venegas, 2021). Estos resultados están relacionados directamente con la estructura y composición del arbolado urbano presente en los diferentes tamaños de parques. En los parques más grandes, se encuentran árboles de dimensiones superiores, lo que indica que son individuos más viejos que están completando su ciclo de vida. Además, es importante mencionar que estos parques también presentan una menor densidad de árboles. Por otro lado, en los parques medianos se encuentran árboles con características similares en términos de dimensiones y cobertura. En contraste, los parques más pequeños albergan principalmente árboles jóvenes, con diámetros que oscilan entre 15.2 y 30.5 cm, lo que significa que tienen un mayor potencial para capturar CO₂ (Castillo-Ruperti, 2022). Además, los parques más pequeños presentan una mayor densidad en comparación con los parques más grandes, lo cual se correlaciona directamente con los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que los parques de tamaño pequeño contribuyen en promedio a capturar una mayor cantidad de agua de lluvia en comparación con los parques de otros tamaños. Estos parques evitan una escorrentía de aproximadamente 20 m³ por hectárea por año. Por otro lado, hay una diferencia mínima entre los parques de tamaño mediano en relación con los pequeños, ya que en promedio evitan una escorrentía de 19.78 m³. La mayor diferencia se observa en los parques de tamaño grande, ya que solo contribuyen con 8.49 m³ en la retención de agua de lluvia. En comparación con lo reportado en la ciudad de Querétaro, donde se analizó los efectos hidrológicos a detalle en 28.28 ha de áreas verdes, donde se reporta que la aportación de los árboles en

la reducción de escorrentía fue de 590.2 m³ anuales (Rodríguez, 2022), lo que demuestra una aportación superior de este servicio ecosistémico. Es importante destacar que en muchos proyectos donde se utiliza el modelo i-Tree Eco, se asume que el área de interés está compuesta en su totalidad por vegetación (Hirabayashi, 2013). Sin embargo, este supuesto no se cumple en todos los estudios. En el caso de los parques de tamaño grande, se observa una característica común: la composición del espacio presenta un alto porcentaje de superficies impermeables. Un ejemplo de esto es el parque La Alameda, el cual cuenta con diferentes áreas para diversos usos y una densidad de árboles notablemente baja.

Los compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico son emitidos por la vegetación y desempeñan un papel importante en los componentes físicos y químicos de la atmósfera. Estos compuestos pueden reaccionar con otros contaminantes en concentraciones más altas, lo que resulta en la formación de ozono troposférico y un aumento en los niveles de contaminantes (Caicedo, 2010). En este estudio, los resultados del modelo i-Tree Eco en relación con los VOCs se presentan a nivel de área de estudio, sin incluir la observación a nivel de tamaño de parque. Se encontró que el género de plantas que emite la mayor cantidad de VOCs en este estudio es *Quercus*, seguido por el género *Eucalyptus*. Estos resultados coinciden con los reportados por San Juan y colaboradores (2019) en la evaluación de los servicios ecosistémicos del bosque urbano de Madrid, donde se observó que *Quercus ilex* fue la segunda especie con mayor emisión de compuestos orgánicos volátiles en todo el arbolado evaluado. En otro estudio donde se utilizó la misma metodología, en el parque Ecuador en la ciudad de Concepción, en Chile, se presentaron resultados similares en cuanto a la emisión de compuestos orgánicos volátiles producidos por las plantas, donde anualmente se emiten 50.48 kg de VOCs, en una superficie mayor a la reportada en el presente estudio, pero inferior a lo reportado en Madrid (Barra López, 2019).

9. Conclusión

Sin duda, los parques urbanos y las áreas verdes dentro de las ciudades desempeñan un papel crucial al brindar servicios ecosistémicos. A diferencia de las zonas con vegetación cercanas a los asentamientos urbanos, los parques tienen como objetivo proporcionar una amplia gama de servicios naturales y están diseñados para ser accesibles a la población.

Los resultados muestran que no hay diferencias considerables en el potencial de los parques para brindar estos servicios en función de su tamaño. Sin embargo, se observa que la calidad del diseño y el mantenimiento de los parques influye en la efectividad de los servicios proporcionados.

Por lo tanto, se concluye que, aunque los parques no sean extensos, una gestión adecuada que priorice el aumento de la cobertura arbórea puede generar grandes beneficios. Entre los factores que influyen en los resultados se destaca la selección de especies presentes en los parques. Aunque la mayoría de las especies sean nativas de América del Norte, no son propias de la región y pueden ser vulnerables a las condiciones climáticas locales. Además, la presencia excesiva de algunas especies puede afectar la biodiversidad en los parques.

En base a los hallazgos de la presente investigación, se recomienda mejorar las prácticas de mantenimiento de los parques para potenciar los beneficios actuales. Esto incluye reemplazar árboles muertos o enfermos, promover especies nativas de mayor tamaño para obtener una mejor calidad de copas y aumentar las áreas permeables para mejorar la infiltración del agua de lluvia. Todas estas acciones deben ser implementadas estratégicamente para mitigar los impactos negativos propios de las áreas urbanas.

10. Bibliografía

- Angeoletto, F., Essy, C., Ruiz Sanz, J. P., Fonseca da Silva, F., Massulo Albertin, R., & Maciel Correa Santos, J. W. (2015). Ecología Urbana: la Ciencia Interdisciplinaria del Planeta Ciudad. *Desenvolvimento em Questão*, 13(32), 6-20.
- Antonio Flores, A. E. (2020). La conservación de la biodiversidad, un paso hacia el desarrollo sostenible de la ciudad de Monterrey (Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Arceo, S. E. V., Rivera, M. D. P. R., Díaz, S. A., & Enríquez, J. J. S. (2023). Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México. *Madera y Bosques*, 29(1).
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta Ecológica*, 84-85, 8-15.
- Barra López, D. (2019). Análisis del efecto del arbolado urbano sobre la absorción de material particulado respirable (MP2, 5), mediante el software I-Tree Eco al interior del Parque Ecuador en la ciudad de Concepción.
- Caicedo, Y. C., Ortiz, T. R. B., & Mancilla, A. Á. (2010). Emisiones de compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico y su contribución a la dinámica atmosférica. *Intropica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, 5(1), 77-86.
- Castillo-Ruperti, R. J., Rodríguez-Guerrero, B., & Bravo-Meza, K. (2022). Fijación de carbono (CO₂) del arbolado de los parques La Rotonda y La Madre, Manabí, Ecuador. *Revista Científica Multidisciplinaria Arbitrada YACHASUN*, 6(10), 8-21.

Comisión de Conurbación del Área Metropolitana de Monterrey. (1988). Plan director de desarrollo urbano del Área Metropolitana de Monterrey, 1988-2010. Grafo Print. Recuperado de iucn.org/downloads/urbes-brochure-final-print.pdf

Contreras, J. L. A., & González, G. (1999). Análisis espectral del viento y de partículas menores de 10 micrómetros (PM10) en el área metropolitana de Monterrey, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 15(2), 95-102.

Costanza, R., R. D'Arge, R. S. De Groot, S. Farber, M. Grasso, B. Hannon, K. Limburg, S. Naeem, R. V. O'Neill, J. Paruelo, R. G. Raskin y P. Sutton. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387, 253-260.

Cowett, F. D. (2014). Methodology for spatial analysis of municipal street tree benefits. *Arboriculture & Urban Forestry*, 40(2), 112-118. Recuperado de <http://www.hort.cornell.edu/uhi/research/articles/cowett-auf-2014.pdf>

Díaz, U., Pascual, M., Stenseke, B., Martín-López, B., R.T. Watson, Z. Molnár, R. Hill, K. M. A. Chan, I. A. Baste, K. A. Brauman. (2018). Assessing nature's contributions to people. *Science*, 359, 270-272.

Estrada-Castillón, E., J. Á. Villarreal-Quintanilla, E. Jurado-Ybarra, C. Cantú-Ayala, M.A. García-Aranda, J. Sánchez-Salas, J. Jiménez-Pérez y M. Pando-Moreno. (2012). Clasificación, estructura y diversidad del matorral submontano adyacente a la planicie costera del Golfo Norte en el noreste de México. *Botanical Sciences*, 90(1), 37-52.

7. FAO. (2021). Servicios de regulación. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado el 23 de noviembre de 2021, de

<https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es/>

Fisher, B., Turner, K. R., & Morling, P. (2009). Defining and classifying ecosystem services for decision making. *Ecological Economics*, 68, 643-653.

Flores, G. J. A. (2005). El arbolado urbano en el área metropolitana de Monterrey. *Ciencia UANL*, 8(1), 20-32.

García, E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Autónoma de México. Series Libros. Pág. 90.

Halpern, B. S., Klein, C. J., Brown, C. J., Beger, M., Grantham, H. S., Mangubhai, S., & Possingham, H. P. (2013). Achieving the triple bottom line in the face of inherent trade-offs among social equity, economic return, and conservation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(15), 6229-6234.

Hirabayashi, S. (2013). i-Tree Eco precipitation interception model descriptions. US Department of Agriculture Forest Service: Washington, DC, USA, 1, 0-21.

i-Tree Eco users manual. (2020). I-Tree Eco User's Manual 2020. Recuperado el 24 de marzo de 2022 de: <https://goo.su/gD7W>

INEGI. (2020). Censo de Población y Vivienda 2020. Recuperado el 25 de marzo de 2022 de: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>.

Jennings, V., Johnson Gaither, C., & Gragg, R. S. (2012). Promoting environmental justice through urban green space access: a synopsis. *Environmental Justice*, 5(1), 1-7.

- Larondelle, N., & Haase, D. (2013). Urban ecosystem services assessment along a rural–urban gradient: A cross-analysis of European cities. *Ecological Indicators*, 29, 179-190.
- Li, F., & Wang, R. (2003). Evaluation, planning and prediction of ecosystem services of urban green space: A case study of Yangzhou City. *Acta Ecologica Sinica*, 23, 1929-1936.
- Lopera, F. G. (2005). Las zonas verdes como factor de calidad de vida en las ciudades. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 37(144), 417-436.
- Malpartida Perez, A. G. (2021). Rol del arbolado urbano sobre la captura de monóxido de carbono mediante el Software i-Tree en el parque Santo Domingo, Carabayllo 2021.
- Martin, N. A., A. H. Chappelka, G. J. Keever & E. F. Loewenstein. (2011). A 100 % tree inventory using i-Tree Eco protocol: a case study at Auburn University, Alabama, U.S. *Arboriculture & Urban Forestry*, 37(5), 207-212.
- Martínez Sánchez, K. & Vanegas Casas, K. S. (2021). Evaluación de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de la Localidad de Fontibón mediante i-Tree. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11349/26463>.
- Martínez-Trinidad, T., Hernández López, P., López-López, S. F., & Mohedano Caballero, L. (2021). Diversity, structure and ecosystem services of trees in four parks in Texcoco using i-Tree Eco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 12(67), 202-223.
- Martínez-Valdés, V., Silva Rivera, E., & González Gaudiano, E. J. (2020). Parques urbanos: un enfoque para su estudio como espacio público. *Intersticios Sociales*, (19), 67-86.

- Mooney, H. A. & P. R. Ehrlich. (1987). Ecosystem services: a fragmentary history. En: G. C. Daily (ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, D C. Pp: 11-22.
- Nowak, D. J., R. Hoehn & D. E. Crane. (2007). Oxygen production by urban trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(3), 220-226. Recuperado de https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2007/nrs_2007_nowak_001.pdf.
- Pataki, D. E., McCarthy, H. R., Litvak, E., & Pincetl, S. (2011). Transpiration of urban forests in the Los Angeles metropolitan area. *Ecological Applications*, 21(3), 661-677.
- Rees, W., Wackernagel, M., (1996). Urban ecological footprints: why cities cannot be sustainable—and why they are a key to sustainability. *Environmental Impact Assessment Review*, 16, 223–248.
- Rodríguez, E. D. R. (2022). *Función Ecosistémica del Bosque Urbano, Caso Querétaro*.
- San Juan, A. M., Carrascosa, N. B., & Millán, J. B. (2019). Valor del bosque urbano de Madrid. *PARJAP: Boletín de la Asociación Española de Parques y Jardines*, 92, 24-31.
- Seitz, J. & Escobedo, F. (2008). *Urban Forests in Florida: Trees Control Stormwater runoff and Improve Water Quality*. School of Forest Resources and Conservation Department, UF/IFAS Extension.
- Seto, K. S., Reenberg, A., Boone, C. C., Fragkias, M., Haase, D., Langanke, T., Marcotullio, P., Munroe, D. K., Olah, B., Simon, D. (2012). *Teleconnections and*

sustainability: new conceptualizations of global urbanization and land change. Proceedings of the National Academy of Sciences U.S.A., 109(20), 7687-7692.

Song, P., Kim, G., Mayer, A. L., 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.

United State Department of Agriculture-Forest Service, USDA. (2018). i-Tree Eco Field guide V6.0.
<https://www.itreetools.org/documents/274/EcoV6.FieldManual.2020.07.23.pdf>

US Forest Service International Programs, & Davey Tree Expert Company. (2017). Adaptación Del Programa I-Tree Eco a México.
<https://www.itreetools.org/index.php>.

Vásquez, A. E. (2016). Infraestructura verde, servicios ecosistémicos y sus aportes para enfrentar el cambio climático en ciudades: el caso del corredor ribereño del río Mapocho en Santiago de Chile. Revista de Geografía Norte Grande, 63, 63-86.

Young, R. F. (2010). Managing municipal green space for ecosystem services. Urban Forestry & Urban Greening, 9, 313–321.

11. ANEXOS

Anexo 1. Emisión de compuestos orgánicos volátiles por especie.

VOC Emissions of Trees by Species

Location: Monterrey, Monterrey, Nuevo Leon, Mexico
 Project: Tesis MCF MIDE, Series: 07 2022, Year: 2022
 Generated: 8/17/2022



Species Name	Monoterpene (kg/yr)	Isoprene (kg/yr)	Total VOCs (kg/yr)
Acacia farnesiana	0.8	0.0	0.8
Caesalpinia mexicana	0.0	0.0	0.0
Celtis laevigata	0.7	0.0	0.7
Citrus x limon	0.0	0.0	0.0
Diospyros	0.1	0.0	0.1
Ebenopsis ebano	0.2	1.9	2.1
Ehretia anacua	0.0	0.0	0.0
Eucalyptus	73.2	190.9	264.1
Fraxinus americana	0.0	0.0	0.0
Juniperus	0.0	0.0	0.0
Koelreuteria elegans	0.0	0.0	0.0
Lagerstroemia indica	0.0	0.0	0.0
Leucaena leucocephala	0.2	0.0	0.2
Ligustrum japonicum	0.0	0.0	0.0
Morus	1.0	0.0	1.0
Parkinsonia aculeata	0.1	0.0	0.1
Pinus teocote	1.4	0.0	1.4
Platanus occidentalis	0.1	24.4	24.5
Populus	1.2	21.1	22.3
Populus tremuloides	0.2	4.2	4.4
Prosopis glandulosa	0.0	0.0	0.0
Prosopis laevigata	0.0	0.0	0.0
Quercus	3.7	5.0	8.6
Quercus polymorpha	19.1	25.8	44.9
Quercus virginiana	217.3	293.0	510.2
Salix humboldtiana	0.2	11.8	12.0
Syagrus romanzoffiana	0.0	0.3	0.4
Taxodium mucronatum	31.3	0.0	31.3
Washingtonia filifera	0.0	0.3	0.3
Washingtonia robusta	0.0	1.2	1.2
Yucca filifera	0.0	0.0	0.0
Total	350.9	579.8	930.7

Anexo 2. Listado de especies arbóreas encontradas en los sitios.



Population Summary by Species

Location: Monterrey, Monterrey, Nuevo Leon, Mexico
 Project: Tesis MCF MIDE, Series: 07 2022, Year: 2022
 Generated: 8/17/2022

Species	Number of Trees	Percent of Population
Fraxinus americana	1,119	46.5%
Quercus virginiana	366	15.2%
Eucalyptus	129	5.4%
Prosopis laevigata	110	4.5%
Ehretia anacua	99	4.1%
Celtis laevigata	80	3.3%
Platanus occidentalis	69	2.9%
Washingtonia robusta	40	1.7%
Taxodium mucronatum	40	1.6%
Ebenopsis ebano	39	1.6%
Parkinsonia aculeata	30	1.2%
Populus	30	1.2%
Koelreuteria elegans	29	1.2%
Quercus polymorpha	29	1.2%
Morus	20	<0.1%
Leucaena leucocephala	20	<0.1%
Salix humboldtiana	20	<0.1%
Yucca filifera	10	<0.1%
Diospyros	10	<0.1%
Juniperus	10	<0.1%
Populus tremuloides	10	<0.1%
Quercus	10	<0.1%
Washingtonia filifera	10	<0.1%
Syagrus romanzoffiana	10	<0.1%
Prosopis glandulosa	10	<0.1%
Ligustrum japonicum	10	<0.1%
Acacia farnesiana	10	<0.1%
Citrus x limon	10	<0.1%
Caesalpinia mexicana	10	<0.1%
Pinus teocote	10	<0.1%
Lagerstroemia indica	10	<0.1%
Total	2,408	100%

Anexo 3. Fotografías de los parques Grandes

ALAMEDA



COL. TECNOLÓGICO



COL. LAS TORRES



Anexo 4. Fotografías de los parques Medianos

ROMA



RÍO LA SILLA



LOS ARCANGELES



Anexo 5. Fotografías de los parques Chicos

BALCONES DE ALTAVISTA



PARQUE DEL CHORRO



CD. SATÉLITE

