



Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Xochimilco

División de Ciencias Biológicas y de la Salud

Departamento: El hombre y su ambiente

Licenciatura en BIOLOGÍA

Proyecto registrado de servicio social:

Planificación ambiental y provisión de servicios ecosistémicos

Informe de conclusión de servicio social

“Contribución ecosistémica del arbolado urbano en la mitigación del carbono y la calidad del aire”

Solicitante: Carlos Andrés Delgadillo Morazán

Matricula: 2193027504

Asesores:

Mtro. Gilberto Sven Binnquist Cervantes, Departamento El Hombre y su Ambiente División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM-X. No. Económico. 20032

Dr. Juan José Von Thaden Ugalde, Departamento El Hombre y su Ambiente División de Ciencias Biológicas y de la Salud, UAM-X. No. Económico. 45613

Fecha de Inicio: 5 de febrero del 2025

Fecha de conclusión: 5 de octubre del 2025

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que me ayudaron a realizar este proyecto, ya que fueron de vital importancia y sin ustedes yo no hubiera llegado hasta aquí.

A mis padres que siempre me han apoyado en todos mis proyectos de vida, nunca me ha faltado nada y agradezco todo el esfuerzo y el cariño, sin ustedes yo no sería quien soy.

Luisa Vidal Soriano que me ayudó a medir cada árbol de la universidad, meses de arduo trabajo con o sin ganas, siempre estuvo ahí, siendo mi apoyo en las buenas y en las malas. Por acompañarme en cada etapa, por tu paciencia, comprensión y por recordarme constantemente que podía lograrlo, incluso cuando yo lo dudaba. Dentro y fuera del proyecto eres mi soporte y te agradezco todo lo que haces por mí.

Karlos Padron que me instruyó en las técnicas de muestreo, me ayudó con la identificación de las especies, me regañó y me enseñó como un maestro en la biología. Gracias por el tiempo dedicado, tus observaciones y tu guía enriquecieron este resultado.

Lidia Reséndiz, que me dio el último empujón para terminar de medir los cientos de árboles de la universidad, gracias por la ayuda, por las risas, el apoyo, las conversaciones, consejos y momentos compartidos que hicieron este camino más llevadero.

A mis profesores Juan José y Gilberto que fueron guía y camino para el cumplimiento de mis metas, gracias por el tiempo, la dedicación, la empatía, y sobre todo gracias por darlo todo por enseñar. por su guía, paciencia y por impulsarme a cuestionar, mejorar y no conformarme con lo mínimo. Sus comentarios fueron clave para darle forma a este trabajo. Son los mejores profesores.

También agradezco a la Universidad Autónoma Metropolitana por brindarme las facilidades y recursos necesarios para la realización de este proyecto, el apoyo y las becas nunca faltan en esta maravillosa institución, de la que siempre estaré orgulloso de pertenecer.

Contenido

1.	Introducción	1
1.	Antecedentes	3
2.1	<i>Evolución del concepto, valoración y cuantificación de servicios ecosistémicos</i>	<i>3</i>
2.2	<i>La cuantificación de servicios ecosistémicos del arbolado urbano:</i>	<i>4</i>
2.3	<i>Uso de iTree para cuantificar los servicios ecosistémicos del arbolado urbano</i>	<i>5</i>
2.	Objetivo general.....	6
3.	Objetivos específicos	6
4.	Materiales y métodos	6
5.1	<i>Inventario florístico y dasométrico del arbolado</i>	<i>7</i>
5.2	<i>Composición florística del arbolado</i>	<i>8</i>
5.3	<i>Estructura del arbolado</i>	<i>8</i>
5.4	<i>Almacenamiento de carbono</i>	<i>9</i>
5.5	<i>Secuestro de carbono</i>	<i>9</i>
5.6	<i>Remoción de contaminantes</i>	<i>10</i>
5.7	<i>Distribución espacial de los resultados</i>	<i>10</i>
5.8	<i>Zonificación.....</i>	<i>11</i>
5.9	<i>Lista de sustitución de especies</i>	<i>11</i>
5.	Resultados.....	11
6.1	Composición del arbolado	11
6.2	<i>Estructura del arbolado</i>	<i>16</i>
6.3	<i>Mantenimiento del arbolado.....</i>	<i>20</i>
6.4	<i>Plagas y enfermedades</i>	<i>21</i>
6.	Servicios ecosistémicos	23
7.1	<i>Almacenamiento de carbono</i>	<i>23</i>
7.2	<i>Secuestro de carbono.....</i>	<i>26</i>
7.3	<i>Remoción de contaminantes.</i>	<i>28</i>
8.	Zonificación	35
8.1	<i>Servicios ecosistémicos de regulación.....</i>	<i>35</i>
8.2	<i>Provisión conjunta de servicios ecosistémicos</i>	<i>36</i>
8.3	<i>Áreas prioritarias para la regulación del carbono y contaminantes atmosféricos</i>	<i>37</i>
8.4	<i>Valor de flujo económico del arbolado.....</i>	<i>38</i>
8.5	<i>Valor de stock económico del arbolado.....</i>	<i>39</i>
9.	Lista de sustitución de especies	42
10.	Conclusiones.....	43
11.	Recomendaciones	44

12.	Bibliografia.....	45
-----	-------------------	----

1. Introducción

Los servicios ecosistémicos (SE) se definen como todos los beneficios bienes y servicios que la humanidad obtiene de la naturaleza (MEA, 2003). A pesar de su relevancia, muchos de estos servicios pasan desapercibidos pues no se valoran, cuantifican ni mapean adecuadamente. Esta falta de reconocimiento limita la capacidad para gestionar y conservar los ecosistemas de manera sostenible (Caro-Caro & Torres-Mora, 2015; Cordoves & Vallejos, 2019; Ferraro et al., 2011; González-Hernández et al., 2023).

En este sentido, el valor de los SE surge de la interacción entre la percepción humana de su utilidad y la capacidad natural del ecosistema para proveerlos. Esta capacidad puede evaluarse mediante el análisis de los procesos biofísicos que los sustentan y los beneficios directos o indirectos que las personas obtienen de ellos (Lattera et al., 2011) y la posibilidad de considerar su contribución en otros aspectos como el bienestar físico, emocional y social (Liu & Opdam, 2014). A ello se suma su contribución al bienestar físico, emocional y social, lo que refuerza la necesidad de incorporarlos en la planificación y gestión ambiental (Liu & Opdam, 2014).

Las actividades humanas han alterado el medio ambiente, generando problemas como contaminación del aire, islas de calor y cambios en ciclos biogeoquímicos. A pesar de ello, la vegetación, especialmente los árboles urbanos, pueden mitigar estos problemas, favoreciendo ecosistemas urbanos sostenibles que mejoran la calidad de vida (Pimienta-Barrios et al., 2014). Por lo tanto, para garantizar la permanencia de estos beneficios, es clave una planificación, gestión y diseño adecuados de las áreas verdes (López-Moyao & Rosillo-Pantoja, 2021).

En los ambientes urbanos, esta relación cobra especial importancia frente a los efectos de las actividades humanas sobre el medio ambiente, como la contaminación del aire, las islas de calor y las alteraciones en los ciclos biogeoquímicos (López-López et al., 2018). Ante este panorama, la vegetación, particularmente el arbolado urbano, contribuye a la provisión de servicios ecosistémicos de regulación, entre los que destacan el secuestro de carbono y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Freeman, 2009). Estos servicios favorecen ecosistemas urbanos más sostenibles y mejoran la calidad de vida, por lo que su permanencia depende de una adecuada planificación, gestión y diseño de las áreas verdes (Pimienta-Barrios et al., 2014; López-Moyao & Rosillo-Pantoja, 2021).

Un árbol maduro puede capturar hasta 150 kg de CO₂ anualmente, dependiendo de la especie y el clima (FAO, 2016). El impacto del arbolado urbano en la reducción del carbono atmosférico puede ser mayor que en bosques no urbanos debido a su crecimiento y su interacción con la eficiencia energética de los edificios (Nowak & Crane, 2002). Ya que, modera el clima urbano proporcionando sombra, disminuyendo temperaturas mediante evapotranspiración y reduciendo la velocidad del viento, lo que disminuye el consumo energético en climatización (del Río, 2018).

Además, el arbolado urbano actúa como filtro natural al capturar contaminantes como dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono (O₃) mediante las estomas o la deposición de partículas en sus superficies, mitigando su impacto en la salud (Nowak et al., 2006). Aunque históricamente los árboles urbanos han sido seleccionados por cuestiones sociales, culturales, y económicas, en la actualidad es importante enfatizar las interacciones del arbolado con la atmósfera y con la biodiversidad local (Criollo et al., 2016).

En este contexto, las instituciones universitarias representan espacios estratégicos para reconocer, evaluar y gestionar la contribución del arbolado urbano a la provisión de servicios ecosistémicos.

En los últimos cinco años, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) ha mostrado su compromiso con el desarrollo sostenible y la mitigación del cambio climático, a partir de la

formulación y aprobación por el Colegio Académico del Plan de Desarrollo Sostenible ante el Cambio Climático (2022-2030). Este plan se conforma por 10 programas que consideran temáticas como: 1) Coordinación institucional; 2) Disminución de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por el consumo de energía; 3) Disminución de emisiones de gases efecto invernadero causadas por la movilidad de la comunidad universitaria; 4) Gestión sostenible del agua; 5) Gestión integral de los residuos; 6) Infraestructura y comunidad universitaria resilientes; 7) Gestión de las áreas verdes; 8) Consumo responsable; 9) Divulgación del conocimiento relacionado con el cambio climático y la sostenibilidad, y 10) Fomento a la acción participativa del alumnado.

El programa de Gestión de las áreas verdes tiene como objetivo general el “Gestionar las áreas verdes como espacios recreativos y hábitat para especies nativas ante su adaptación al cambio climático”. Para lo cual, considera dos aproximaciones generales: 1) Identificar el estado de conservación de las áreas verdes de la Universidad, y 2) Incrementar la capacidad adaptativa de las especies de fauna nativa al cambio climático mediante la conservación de su hábitat en la Universidad.

Cabe hacer notar que, el programa de Gestión de las áreas verdes no aborda el papel de la vegetación de las unidades académicas como un activo para la provisión de servicios ecosistémicos de regulación, especialmente en el caso de la reducción de contaminación atmosférica, y el almacenamiento como el secuestro de carbono. Para entender esta situación, la Rectoría de la Unidad Xochimilco realizó en 2025 el estudio: Evaluación y Servicios Ecosistémicos del Arbolado Urbano en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Coyoacán, Ciudad de México, en donde se cuantifica y evalúa el estado del arbolado urbano en la Unidad Xochimilco, el Predio “Las Ánimas”, el Centro de investigaciones acuícolas y biológicas de Cuernavaca (CIBAC) y las Clínicas estomatológicas. El objetivo principal fue caracterizar la estructura, diversidad y servicios ecosistémicos proporcionados por 1, 787 árboles.

El estudio constituye una contribución significativa para posicionar el tema de los servicios ecosistémicos de regulación en la agenda ambiental de la Unidad Xochimilco. Asimismo, presenta un análisis puntual de la ubicación de cada árbol en el campus. No obstante, no considera la distribución espacial continua de la capacidad del arbolado para la captura de carbono, ni la remoción de contaminantes atmosféricos. Esta omisión limita la definición de estrategias y medidas para la sustitución del arbolado con afectación fitosanitaria, así como la selección de una paleta vegetal acorde con las condiciones de la Unidad Xochimilco, particularmente en lo relativo a las características del suelo, los requerimientos hídricos, la forma y dimensión de la copa, el espacio necesario según el comportamiento de las raíces y la capacidad de los árboles para la remoción de contaminantes, incluido el almacenamiento y secuestro de carbono.

El propósito de este estudio es evaluar la contribución del arbolado de la Unidad Xochimilco en la reducción de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes atmosféricos, a partir de la cuantificación del almacenamiento y secuestro de carbono, así como de la remoción de contaminantes. Con ello, se busca generar información que permita reconocer la importancia del arbolado urbano en la provisión de servicios ecosistémicos de regulación y aportar elementos para su manejo y gestión dentro de la UAM, además, contribuir a fortalecer el Programa de Gestión de Áreas Verdes, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza que potencien la sostenibilidad en la institución y el bienestar de la comunidad.

1. Antecedentes

2.1 Evolución del concepto, valoración y cuantificación de servicios ecosistémicos

El concepto de servicios ecosistémicos surgió en respuesta a la crisis ambiental global identificada en las décadas de 1960 y 1970. Informes como *Silent Spring* de Rachel Carson (1962) y el informe del Club de Roma (Meadows et al., 1975) destacaron los impactos negativos de los modelos industriales y capitalistas en los ecosistemas y alertaron sobre los límites del crecimiento. En este contexto, surgió el desarrollo sustentable como un paradigma para reconciliar el desarrollo económico con la conservación de los recursos naturales (Lélé, 1991). Dos corrientes principales, la economía ambiental y la economía ecológica, han moldeado este paradigma. Mientras que la economía ambiental propone valorar la naturaleza como capital natural (Pierri, 2005), la economía ecológica critica esta perspectiva y subraya los riesgos de tratar los recursos finitos de la biosfera como sustituibles por capital manufacturado (O'Connor, 1994).

El concepto de servicios ecosistémicos, derivado del paradigma del desarrollo sustentable, busca demostrar la interdependencia entre la conservación de los ecosistemas y el bienestar humano. Paul Ehrlich y Harold Mooney (1983) introdujeron la idea de que los ecosistemas no solo proporcionan recursos, sino también desempeñan funciones críticas para la estabilidad socioecológica. Posteriormente, Costanza et al. (1997) estimaron el valor económico global de los servicios ecosistémicos, resaltando su importancia como sostenedores biológicos de la vida humana (Daily, 1997).

La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA, 2003) clasificó los servicios ecosistémicos en provisión, regulación, culturales y soporte, destacando su papel esencial en la calidad de vida humana y su vulnerabilidad ante actividades antropogénicas. La "Cascada de Servicios Ecosistémicos" desarrollada por Potschin y Haines-Young (2018) proporcionó un marco que vincula estructuras y procesos ecosistémicos con el bienestar humano, aunque desde un enfoque antropocéntrico que prioriza la valoración económica (Valencia, 2019).

Más recientemente, la Plataforma Intergubernamental para la Biodiversidad y los Servicios Ecosistémicos (IPBES) redefinió los servicios ecosistémicos como "contribuciones de la naturaleza a las personas", promoviendo una visión inclusiva que integra diversos sistemas de conocimiento (IPBES, 2019). Este concepto busca facilitar la comprensión de la relación entre sociedades humanas y ecosistemas, conciliando enfoques ecológicos y económicos (Caro-Caro & Torres-Mora, 2015).

La valoración económica de los servicios ecosistémicos es crucial para integrar el capital natural en la dinámica económica mediante análisis de costo-beneficio (Costanza et al., 1997). Sin embargo, esta metodología enfrenta críticas. La externalización de costos sociales y la distribución desigual de beneficios fomentan la sobreexplotación de recursos (Scheffer & Westley, 2000). Además, la asignación de valores monetarios a servicios ecosistémicos puede entrar en conflicto con otros enfoques éticos y sociales, reduciendo la naturaleza a un valor económico utilitario (Paruelo, 2011).

Los métodos tradicionales de valoración económica presentan limitaciones. Se centran en valores monetarios y carecen de adaptabilidad a contextos locales. Por ello, enfoques alternativos como los participativos han ganado relevancia, al integrar percepciones y valores de comunidades locales (Mangione & Centeno, 2021). Además, la valoración integral de servicios ecosistémicos requiere modelos ecológicos que capturen respuestas no lineales, umbrales críticos y riesgos de colapso, así como inventarios detallados que incluyan valores económicos y socioculturales (Kallis et al., 2013).

Iniciativas como la Clasificación Internacional Común de Servicios Ecosistémicos (CICES) buscan estandarizar la medición y evaluación de los servicios ecosistémicos a nivel global (Haines-Young & Potschin, 2018). En Europa, el proyecto ESMERALDA desarrolla metodologías para integrar el conocimiento sobre servicios ecosistémicos en la planificación y gestión política, promoviendo un enfoque armonizado y adaptado a diversas escalas geográficas (Burkhard et al., 2018).

El mapeo y la cuantificación de servicios ecosistémicos a nivel local son esenciales para la planificación efectiva de la biodiversidad. Estas herramientas generan datos críticos que facilitan la integración de los servicios ecosistémicos en estrategias de uso del suelo y desarrollo sostenible, promoviendo la conservación y el uso racional de recursos naturales. Además, estos enfoques contribuyen a cerrar brechas de conocimiento y a implementar políticas adaptadas a las realidades locales (Santos-Martin et al., 2018).

La cuantificación de servicios ecosistémicos es fundamental para desarrollar modelos de gestión de recursos y formular políticas públicas efectivas. Sin embargo, existen desafíos técnicos significativos que demandan un profundo conocimiento de los procesos ecológicos y metodológicos. Las metodologías biofísicas evalúan aspectos estructurales y funcionales de los ecosistemas, mientras que las valoraciones socioeconómicas y socioambientales integran conceptos de capital natural y valores culturales (De Groot & Boumans, 2002; Ferraro et al., 2011).

2.2 La cuantificación de servicios ecosistémicos del arbolado urbano:

A nivel internacional, son pocos los estudios que abordan la cuantificación de servicios ecosistémicos enfocados en el arbolado urbano. Calderón (2009) estudió en Madrid, España, la contribución del arbolado urbano en la mejora de la calidad del aire, específicamente en la remoción de contaminantes atmosféricos en beneficio de la sociedad. Encontró que los árboles contribuyen significativamente a la reducción de los niveles de contaminación y aportó información relevante para la gestión y planificación sostenible.

En Chile, diversos estudios han destacado el papel crucial del arbolado urbano en la mejora de la calidad de vida. Criollo (2015) evidenció la relación entre contaminación atmosférica y afecciones respiratorias, subrayando la importancia de la vegetación nativa en la remoción de contaminantes. Rubio (2022) profundizó en la contribución del arbolado urbano a la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, resaltando el valor de las áreas verdes en la protección del patrimonio natural y el bienestar humano. Ambos estudios convergen en la necesidad de gestionar el arbolado urbano eficientemente, priorizando especies nativas y estrategias que permitan a los tomadores de decisiones comprender los múltiples beneficios del arbolado, desde la mejora de la calidad del aire hasta la conservación de la biodiversidad.

En Colombia, Acuña-Simbaqueva et al., (2021) estudiaron la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero por parte del arbolado urbano, identificando variaciones entre especies en su capacidad de almacenar y secuestrar carbono. El estudio estima que el arbolado fija el 2.3% de las emisiones de la ciudad, proporcionando una base para el monitoreo futuro y la gestión del arbolado en el contexto del cambio climático.

En México, aunque en los últimos años ha crecido la investigación sobre el papel del arbolado urbano en la provisión de servicios ecosistémicos, esta sigue siendo limitada. Velasco et al. (2014) analizaron fuentes y sumideros de CO₂ en una zona residencial/comercial de la Ciudad de México durante 15 meses. Evaluaron el papel del arbolado en la mitigación del carbono aplicando ecuaciones alométricas de biomasa y modelos predictivos de crecimiento. Hallaron que el inventario de emisiones sobrestimaba el flujo de emisiones en 2.8 veces. Este estudio sirve como referencia para ciudades subtropicales con patrones de urbanización similares.

López-López et al. (2018) analizaron los reservorios de biomasa y carbono en el bosque urbano de Chapultepec, México. Evidenciaron la falta de ecuaciones alométricas específicas para bosques urbanos debido a la mezcla de especies exóticas y nativas. Destacaron la importancia del bosque urbano en la mitigación del carbono en proporción con las emisiones locales, aportando evidencia sobre el papel de la vegetación urbana frente al cambio climático.

Un estudio reciente de Macías-Muro et al. (2022) evaluó la salud de árboles urbanos en Guadalajara, México, mediante imágenes satelitales. Encontraron que estas imágenes son útiles para evaluar la salud del arbolado, pero es crucial considerar la diversidad de especies. La clasificación por tipo de follaje fue el método más eficaz.

2.3 Uso de iTree para cuantificar los servicios ecosistémicos del arbolado urbano

Entre las herramientas utilizadas para la cuantificación de servicios ecosistémicos del arbolado urbano destaca i-Tree, una plataforma desarrollada por el Servicio Forestal de los Estados Unidos (USDA Forest Service) para evaluar la estructura, condición y contribución ambiental del arbolado en contextos urbanos y periurbanos. En particular, i-Tree Eco permite estimar servicios ecosistémicos de regulación como el almacenamiento y secuestro de carbono, la remoción de contaminantes atmosféricos y otros beneficios asociados al funcionamiento del arbolado, a partir de variables dasométricas, de cobertura y de condición del árbol, integradas con información ambiental y meteorológica (Nowak, 2021). Debido a ello, esta herramienta ha sido ampliamente utilizada en distintos contextos para generar información útil en la gestión ambiental urbana y en la valoración de los beneficios del arbolado, por ejemplo:

Hernández-Castán et al. (2023), en Puebla, aplicaron i-Tree para estimar servicios como la captura de carbono, regulación de temperatura y mejora de la calidad del aire. Este estudio resalta cómo el software puede adaptarse a contextos locales, generando datos relevantes para la gestión ambiental.

Flores-Ulloa et al. (2024) usaron i-Tree en Monterrey, enfocándose en un bosque urbano. Subrayaron la importancia de esta herramienta para valorar servicios ecosistémicos en entornos densamente poblados y promover estrategias que mejoren la calidad de vida.

En Barcelona, Orellana Asenjo (2022) utilizó i-Tree para evaluar servicios ecosistémicos. Este trabajo destacó su utilidad para proporcionar datos comparativos y apoyar el diseño de políticas públicas sostenibles.

En Texcoco, México, Martínez-Trinidad et al. (2021) aplicaron i-Tree Eco para analizar la diversidad y estructura del arbolado en parques urbanos. Este estudio destacó cómo el software permite comprender la relación entre biodiversidad y beneficios ecológicos.

López-Moyao y Rosillo-Pantoja (2021), en el parque Jardines de la Hacienda, subrayaron la importancia de las áreas verdes urbanas para ciudades sostenibles. Con i-Tree, cuantificaron la contribución de estos espacios a la mitigación del cambio climático y al bienestar comunitario.

Finalmente, González Hernández et al. (2018), en Tabasco, México, usaron i-Tree para analizar los servicios ecosistémicos de *Tabebuia rosea*. Demostraron que esta especie es clave en la captura de carbono y regulación hídrica en entornos urbanos.

2. Objetivo general

Evaluar la contribución del arbolado en la reducción de la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes emitidos a la atmósfera.

3. Objetivos específicos

- Cuantificar el almacenamiento y secuestro de carbono
- Cuantificar la remoción de contaminantes atmosféricos
- Zonificar las áreas verdes más relevantes en cuanto a su provisión de servicios ecosistémicos de regulación

4. Materiales y métodos

Área de estudio La UAM-X se localiza en Ciudad de México, en la delegación Coyoacán, en el límite con la delegación Xochimilco, coordenadas 19.3042° N, 99.1030° W, a 2,240 metros sobre el nivel del mar (msnm). Colinda al norte con calzada de las bombas, al este se encuentra próxima al Canal Nacional y el área natural protegida “Ejidos de Xochimilco y San Gregorio Atlapulco” por lo que es una zona de transición entre Coyoacán y Xochimilco (Figura 1).

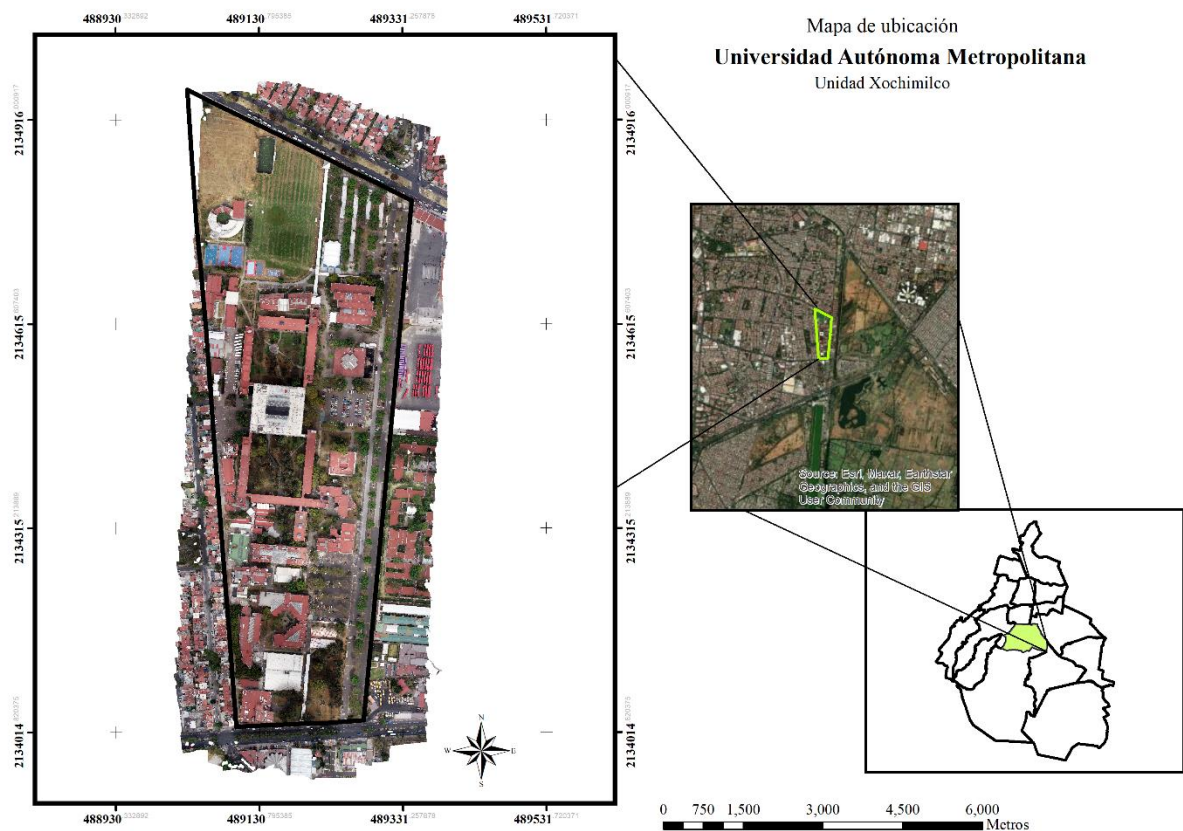


Figura 1. Ubicación, UAM-X.

5.1 Inventario florístico y dasométrico del arbolado

Para el análisis de servicios ecosistémicos se empleó la herramienta de iTree-eco en formato de inventario completo, para lo que fue necesario realizar un censo del arbolado con enfoque florístico, dasométrico y fitosanitario.

Para la aplicación de i-Tree Eco en el análisis de los servicios ecosistémicos, se requirió realizar un censo completo con enfoque florístico, dasométrico y fitosanitario. Para llevar a cabo el censo de los árboles se establecieron bloques con el propósito de facilitar la identificación de zonas de interés (Figura 2). Estas zonas son espacios reconocibles para la comunidad de la UAM-X y que concentran el arbolado representativo de la unidad.

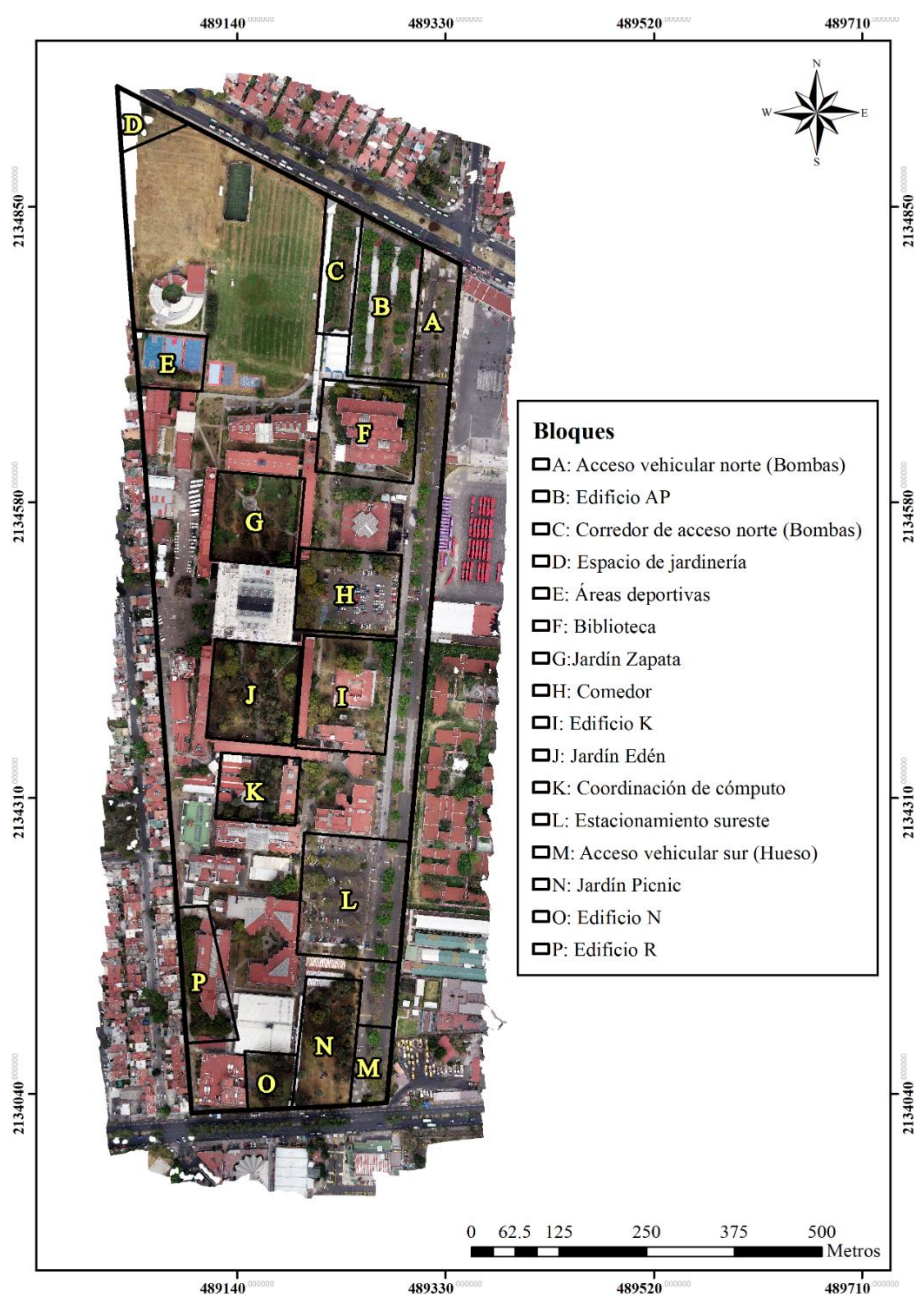


Figura 2. Segmentación de la UAM-X en bloques.

Se tomaron medidas de diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total, altura a la base, altura a la copa viva, diámetros de copa (N/S, E/O), porcentaje ausente de copa, muerte regresiva y exposición a la luz. Las mediciones dasométricas del arbolado se realizaron a partir del “Protocolo estandarizado para la evaluación del arbolado urbano” de iTree, conforme al manual de campo de iTree-Eco (USDA Forest Service, 2019).

Se incorporaron variables complementarias relacionadas con el manejo y condición sanitaria del arbolado para contar con un contexto más amplio sobre el estado funcional del arbolado de la Unidad Xochimilco. En el caso del mantenimiento, se registró la presencia de prácticas de daños mecánicos, podas y otras intervenciones visibles, así como su tipo y aparente intensidad. En cuanto a la condición sanitaria, se documentó la presencia de síntomas asociados a plagas, enfermedades o signos de estrés ambiental o humano, sin realizar identificación específica de agentes causales.

La colecta de datos se realizó directamente en campo tomando en cada individuo ubicación geográfica con GPS Garmin 700, y recolectando la información mediante formularios digitales, utilizando la aplicación Survery 123. Esta aplicación se seleccionó dado que el laboratorio de Planeación ambiental cuenta con este recurso y ofrece ventajas como practicidad, diseño personalizado de formularios inteligentes y flexibles, captura de datos sin conexión a internet, uso intuitivo con mínima capacitación, integración con la plataforma ArcGIS, y reportes y análisis automatizados.

La identificación taxonómica se efectuó a nivel de especie y género apoyándose en claves taxonómicas, bibliografía especializada y colaboración con profesionales del laboratorio de taxonomía y sistemática vegetal de la UAM-X, del Departamento, El hombre y su Ambiente.

5.2 Composición florística del arbolado

Con la identificación botánica se realizó un listado taxonómico actualizado de las especies arbóreas de la UAM-X a partir del sistema APG IV (Angiosperm Phylogeny Group, 2016) para angiospermas y la clasificación propuesta por Maarten J.M Christenhusz et al. (2011) para gimnospermas, verificando los nombres en bases de datos como El Sistema Global de Información sobre Biodiversidad (GBIF), Plants of the World Online (POWO) y World Flora Online (WFO). Para cada especie se consignó familia, género, especie y estatus biogeográfico (nativo o exótico).

El análisis de iTree-eco determinó la densidad arbórea por medio de la fórmula general, que considera el número de individuos (n) entre el área total muestreada (A) (Nowak, 2020), y el valor de importancia a partir de la suma del porcentaje de población (abundancia relativa) y el porcentaje de área foliar (dominancia relativa) (Nowak et al., 2008).

5.3 Estructura del arbolado

La estructura se determinó a partir del DAP, área basal, área foliar, y la biomasa foliar, variables se estimaron mediante iTree-eco con el modelo UFORE. El modelo calcula el área basal individual a partir del diámetro del tronco (DAP), Si el árbol es multicaulinar, se calcula el área de cada tallo y se suma (Nowak, 2020).

Por su parte, el área foliar se determinó a través de ecuaciones de regresión alométricas que, de manera general, utilizan la relación entre el volumen de copa, la densidad del follaje y el factor de transparencia para determinar la superficie foliar proyectada. El área foliar se utiliza posteriormente para derivar la biomasa foliar, donde se divide el área foliar entre el peso seco de hoja, usando la fórmula del área foliar específica (SLA) (Nowak, 1996).

5.4 Almacenamiento de carbono

Para estimar el almacenamiento de carbono el modelo de iTree-eco utiliza ecuaciones de volumen y factores de densidad de la madera específicos de cada especie obtenidos de la Base de datos mundial sobre densidad de la madera obtenidos a partir del software iTree (Zanne et al., 2009). El modelo de biomasa de iTree incorpora información del tamaño y características de los árboles, junto con factores específicos como la densidad de la madera, para calcular el carbono almacenado, en un proceso preciso y que se adapta a las condiciones de cada región y especie. Primero, se calcula el volumen aéreo del árbol usando la relación entre el diámetro del tronco a la altura del pecho (DBH) y la altura total del árbol. Luego, este volumen se convierte en biomasa aérea al multiplicarlo por la densidad de la madera y un factor que incluye ramas y hojas (McPherson et al., 2016).

Para obtener la biomasa total, se añade la biomasa subterránea, que se estima como el 26% de la biomasa aérea (Cairns et al., 1997). Después, la biomasa total se convierte en peso seco mediante factores específicos para cada especie y, finalmente, se calcula el carbono almacenado al multiplicar el peso seco por un factor estándar de 0.5, que indica que el 50% del peso seco es carbono (Nowak & Crane, 2000).

5.5 Secuestro de carbono

Para estimar el secuestro de carbono, el modelo iTree utiliza ecuaciones de crecimiento y modelos polinómicos que se adaptan a la especie y la región climática, disponibles en el Archivo de Datos de Investigación del Servicio Forestal. Estos modelos proyectan el crecimiento del diámetro del tronco (DBH) y la altura del árbol a lo largo del tiempo, permitiendo calcular el crecimiento anual en biomasa mediante ecuaciones alométricas (McPherson et al., 2016).

El crecimiento anual del DBH se calcula usando tasas promedio específicas según el uso del suelo (urbano, parque o forestal) y ajustadas a la clase de diámetro del árbol. Estas tasas se modifican según la duración de la temporada de crecimiento (número de días sin heladas) y el estado de salud del árbol. Para lograrlo, se estandarizan las tasas de crecimiento de otras regiones, ajustándolas a la duración local de la temporada de crecimiento, y se incorpora la exposición a la luz de la copa (CLE, Crown Light Exposure) como factor de corrección. Con esto, se estima la biomasa adicional generada por el crecimiento anual del árbol, que representa el carbono secuestrado. Este valor se multiplica por un factor estándar de conversión (0.5) para determinar el carbono almacenado en la nueva biomasa (Nowak & Crane, 2000).

El cálculo final considera la mortalidad y descomposición de los árboles. El secuestro neto de carbono se obtiene restando las emisiones generadas por la descomposición y mortalidad del carbono secuestrado anualmente debido al crecimiento de los árboles (Nowak, 1986).

5.6 Remoción de contaminantes

Los árboles remueven la contaminación del aire interceptando partículas en suspensión con la superficie foliar y la absorción de contaminantes gaseosos a través de los estomas en las hojas (Nowak et al., 2014). Esta superficie foliar se utiliza para calcular las tasas de deposición seca de contaminantes atmosféricos y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVB) de distintas especies arbóreas (Benjamin y Winer, 1998). El modelo de remoción de contaminantes de iTree-eco toma del inventario variables clave como: cobertura de la copa, altura total del árbol, especie del árbol, estado de salud del árbol y porcentaje de copa viva, y cobertura del suelo bajo el árbol para calcular las deposiciones secas (eliminación de contaminantes en periodos sin precipitación) por hora de contaminantes del aire en las copas de los árboles basándose en la cubierta arbórea, y en los datos de concentración de contaminantes del aire y meteorológicos por hora (Nowak & Crane, 2000).

La deposición seca se calcula mediante un modelo que estima el flujo de contaminantes (F) como el producto de la velocidad de deposición seca (Vd) y la concentración del contaminante (C) obtenida de datos locales de monitoreo de calidad del aire.

$$F = Vd \cdot C$$

La velocidad de deposición seca (Vd) se determina como el inverso de la suma de la resistencia aerodinámica (Ra) calculada a partir de la velocidad del viento y la rugosidad del terreno; la resistencia de capa límite (Rb) depende de las propiedades del aire y la velocidad del viento (Pederson et al., 1995); y de la resistencia de la superficie del dosel (Rc) (Baldocchi et al., 1987).

$$Vd = 1 / Ra + Rb + Rc$$

La resistencia de la superficie del dosel depende de la Resistencia estomática, relacionada con la transpiración de las hojas la resistencia mesofilica (Rm) que varía según el contaminante y su capacidad para penetrar las; y la resistencia cuticular (Rt) basada en la capacidad del contaminante de depositarse en superficies no transparentes como la corteza (Baldocchi et al., 1987; Baldocchi et al., 1988).

El cálculo utiliza datos meteorológicos horarios (temperatura, velocidad del viento, humedad, radiación solar) para ajustar las resistencias y estimar el comportamiento del dosel arbóreo. La remoción de contaminantes se calcula para O₃ (ozono), NO₂ (dióxido de nitrógeno), SO₂ (dióxido de azufre), y CO (monóxido de carbono). El flujo de contaminantes se multiplica por el área total del dosel arbóreo para estimar la remoción total en la ciudad (Nowak & Crane, 2000).

5.7 Distribución espacial de los resultados

Para la espacialización de los servicios ecosistémicos se utilizaron como insumo los resultados del censo fitosanitario y del análisis de servicios ecosistémicos de iTree Eco. Cada árbol fue representado como un punto georreferenciado con atributos asociados al almacenamiento y secuestro de carbono, la remoción de contaminantes y su condición fitosanitaria. A partir de esta información se generaron superficies continuas mediante el método de interpolación Inverse Distance Weighted (IDW) en el software ArcMap 10.8.2, el cual estima valores en sitios no muestreados a partir de la influencia de los árboles cercanos, asignando mayor peso a los valores más próximos. El IDW permitió conservar gradientes espaciales relevantes a la escala de análisis y ofreció una representación cartográfica clara, precisa y técnicamente adecuada para la interpretación del fenómeno.

5.8 Zonificación

Con el propósito de identificar las áreas verdes más relevantes de la Unidad Xochimilco en términos de los servicios ecosistémicos evaluados, se llevó a cabo un proceso de normalización de las capas temáticas, mediante la estandarización de cada una de las variables mapeadas. Posteriormente, se generaron capas compuestas que representan valores agregados, como el carbono total (almacenamiento + secuestro) y la remoción total de contaminantes atmosféricos (NO₂, SO₂, O₃, entre otros), lo que permitió facilitar su comparación, ponderación y análisis espacial dentro del área de estudio.

La normalización es un proceso útil para transformar valores originales de una variable a una escala adimensional entre 0 y 1, permitiendo estandarizar variables con distintas unidades y magnitudes, evitar que variables con rangos numéricos mayores dominen el análisis y facilita la integración multicriterio.

Para la normalización de capas temáticas (Min (0) y Max (1)), se aplicó la fórmula de valor normalizado:

$$\text{Valor normalizado} = (\text{Valor} - \text{Mínimo}) / (\text{Máximo} - \text{Mínimo})$$

5.9 Lista de sustitución de especies

Las especies arbóreas nativas aportan servicios ecosistémicos adaptados a las condiciones locales, favorece a la fauna local como polinizadores, aves, mamíferos y microorganismos, y reducen el riesgo de impactos negativos como invasiones, por lo que son esenciales sostener en el tiempo los servicios ecosistémicos (CONANP, 2021). La lista de sustitución de especies consiste en una propuesta de taxones nativos de México, seleccionados por su alta capacidad para proveer servicios ecosistémicos de regulación, tales como el secuestro de carbono y la remoción de contaminantes atmosféricos, que además, favorecen a la fauna local.

Aclaración sobre la elaboración de las figuras

Las figuras son de elaboración propia realizadas a partir de los datos obtenidos del análisis en iTree-Eco, con excepción de la Figura 4, que es parte resultado del análisis de iTree-Eco.

5. Resultados

6.1 Composición del arbolado

Se realizó un censo del arbolado urbano con enfoque florístico, dasométrico y fitosanitario. El muestreo se realizó durante los meses de febrero a diciembre del año 2025. Asimismo, se registraron 1042 árboles en total, con 58 especies, 49 géneros y 31 familias (Tabla 1). Sin embargo, hubo zonas a las que no se pudo acceder, por lo que no se contabilizaron cerca de 10 árboles. La UAM-X tiene una extensión de 21ha aproximadamente, por lo que la densidad arbórea es de 49.6 árboles/ha.

Tabla 1. Listado taxonómico de especies arbóreas identificadas en UAM-X

Familia	Género	Especie	Estatus	No. Árboles
Anacardiaceae	Schinus	<i>Schinus molle</i>	Exótico no invasivo	11
Anacardiaceae	Schinus	<i>Schinus terebinthifolius</i>	Exótico invasor	1
Annonaceae	Annona	<i>Annona cherimola</i>	Exótico no invasivo	1
Araliaceae	Heptapleurum	<i>Heptapleurum actinophyllum</i>	Exótico no invasivo	3
Araucariaceae	Araucaria	<i>Araucaria heterophylla</i>	Exótico no invasivo	4
Arecaceae	Phoenix	<i>Phoenix canariensis</i>	Exótico no invasivo	13
Arecaceae	Washingtonia	<i>Washingtonia robusta</i>	Nativo (México)	1
Asparagaceae	Yucca	<i>Yucca gigantea</i>	Nativo (México)	3
Bignoniaceae	Crescentia	<i>Crescentia alata</i>	Nativo (México)	1
Bignoniaceae	Jacaranda	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Exótico no invasivo	150
Casuarinaceae	Casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i>	Exótico invasor	131
Cupressaceae	Cupressus	<i>Cupressus sempervirens</i>	Exótico no invasivo	59
Cupressaceae	Hesperocyparis	<i>Hesperocyparis lusitanica</i>	Nativo (México)	47
Cupressaceae	Platycladus	<i>Platycladus orientalis</i>	Exótico no invasivo	22
Cupressaceae	Taxodium	<i>Taxodium mucronatum</i>	Endémico	37
Fabaceae	Acacia	<i>Acacia retinodes</i>	Exótico no invasivo	8
Fabaceae	Bauhinia	<i>Bauhinia variegata</i>	Exótico no invasivo	3
Juglandaceae	Juglans	<i>Juglans cinerea</i>	Exótico no invasivo	6
Scrophulariaceae	Buddleja	<i>Buddleja cordata</i>	Endémico	2
Lauraceae	Persea	<i>Persea americana</i>	Nativo (México)	3
Magnoliaceae	Magnolia	<i>Magnolia grandiflora</i>	Exótico no invasivo	2
Malvaceae	Ceiba	<i>Ceiba speciosa</i>	Exótico no invasivo	1
Malvaceae	Hibiscus	<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	Exótico no invasivo	2
Malvaceae	Talipariti	<i>Talipariti tiliaceum</i>	Exótico no invasivo	1
Moraceae	Ficus	<i>Ficus benjamina</i>	Exótico no invasivo	87
Moraceae	Ficus	<i>Ficus carica</i>	Exótico no invasivo	3
Moraceae	Ficus	<i>Ficus elastica</i>	Exótico no invasivo	1
Moraceae	Ficus	<i>Ficus microcarpa</i>	Exótico invasor	6
Moraceae	Morus	<i>Morus alba</i>	Exótico invasor	1
Myrtaceae	Melaleuca	<i>Melaleuca citrina</i>	Exótico no invasivo	24

Familia	Género	Especie	Estatus	No. Árboles
Myrtaceae	Eucalyptus	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	Exótico invasor	13
Myrtaceae	Acca	<i>Acca sellowiana</i>	Exótico no invasivo	1
Myrtaceae	Psidium	<i>Psidium guajava</i>	Nativo (México)	5
Myrtaceae	Syzygium	<i>Syzygium paniculatum</i>	Exótico no invasivo	1
Oleaceae	Fraxinus	<i>Fraxinus uhdei</i>	Nativo (México)	198
Oleaceae	Ligustrum	<i>Ligustrum lucidum</i>	Exótico invasor	50
Oleaceae	Olea	<i>Olea europaea</i>	Exótico no invasivo	2
Pinaceae	Pinus	<i>Pinus cembroides</i>	Endémico	3
Pinaceae	Pinus	<i>Pinus greggii</i>	Endémico	2
Platanaceae	Platanus	<i>Platanus mexicana</i>	Endémico	1
Proteaceae	Grevillea	<i>Grevillea robusta</i>	Exótico no invasivo	1
Proteaceae	Macadamia	<i>Macadamia integrifolia</i>	Exótico no invasivo	1
Rosaceae	Crataegus	<i>Crataegus mexicana</i>	Endémico	4
Rosaceae	Cydonia	<i>Cydonia oblonga</i>	Exótico no invasivo	2
Rosaceae	Eriobotrya	<i>Eriobotrya japonica</i>	Exótico no invasivo	8
Rosaceae	Malus	<i>Malus domestica</i>	Exótico no invasivo	3
Rosaceae	Prunus	<i>Prunus cerasifera</i>	Exótico no invasivo	4
Rosaceae	Prunus	<i>Prunus domestica</i>	Exótico no invasivo	13
Rosaceae	Prunus	<i>Prunus persica</i>	Exótico no invasivo	8
Rutaceae	Casimiroa	<i>Casimiroa edulis</i>	Nativo (México)	2
Rutaceae	Citrus	<i>Citrus × latifolia</i>	Exótico no invasivo	1
Rutaceae	Citrus	<i>Citrus limon</i>	Exótico no invasivo	8
Rutaceae	Citrus	<i>Citrus sinensis</i>	Exótico no invasivo	4
Salicaceae	Populus	<i>Populus alba</i>	Exótico invasor	5
Salicaceae	Salix	<i>Salix babylonica</i>	Exótico no invasivo	7
Salicaceae	Salix	<i>Salix bonplandiana</i>	Nativo (México)	52
Sapindaceae	Acer	<i>Acer negundo</i>	Exótico invasor	8
Sapindaceae	Dimocarpus	<i>Dimocarpus longan</i>	Exótico no invasivo	1

De las especies registradas 70% son exóticas y 30% nativas (Tabla 1), sin embargo, la composición del arbolado (Figura 3) estuvo dominada por especies exóticas no invasivas (44.7%), seguidas por especies nativas (29.9%) y exóticas invasoras (20.6%), mientras que las especies endémicas representaron solo el 4.7% de los individuos. Lo que muestra una dominancia de especies exóticas, común en el arbolado urbano donde predominan especies ornamentales, forestales introducidas y frutales que moldean la estética urbana, pero también la provisión de servicios ecosistémicos, la resiliencia ecológica y condicionan la biodiversidad local.

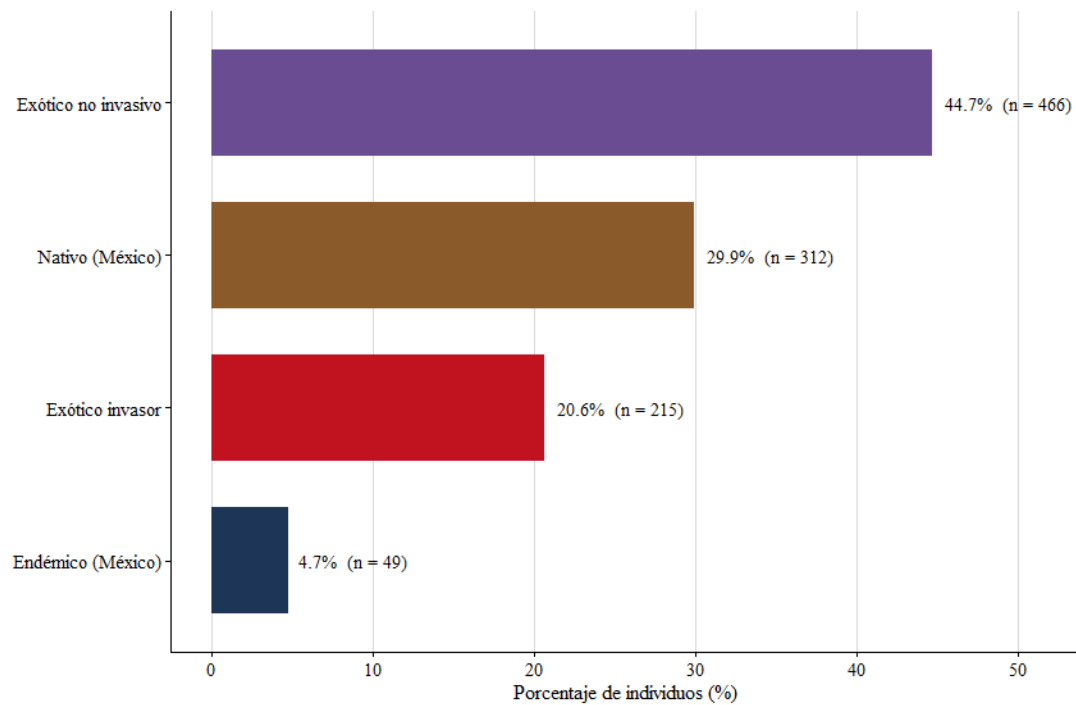


Figura 3. Estatus de origen de las especies.

Las especies exóticas predominan en los espacios recreativos de la UAM-X (Figura 4), mientras que las especies nativas se distribuyen principalmente sobre espacios funcionales de la universidad como estacionamientos. Las especies exóticas invasoras se concentran principalmente en los jardines principales (O, N, J, G) dominados por *Casuarina equisetifolia* (Casuarina), mientras que la distribución de las especies endémicas es acotada y concentrada en núcleos dispersos por la unidad, en particular la matriz verde sobre coordinación de cómputo y áreas deportivas (K, E) con especies como *Taxodium mucronatum* (Ahuehuete).

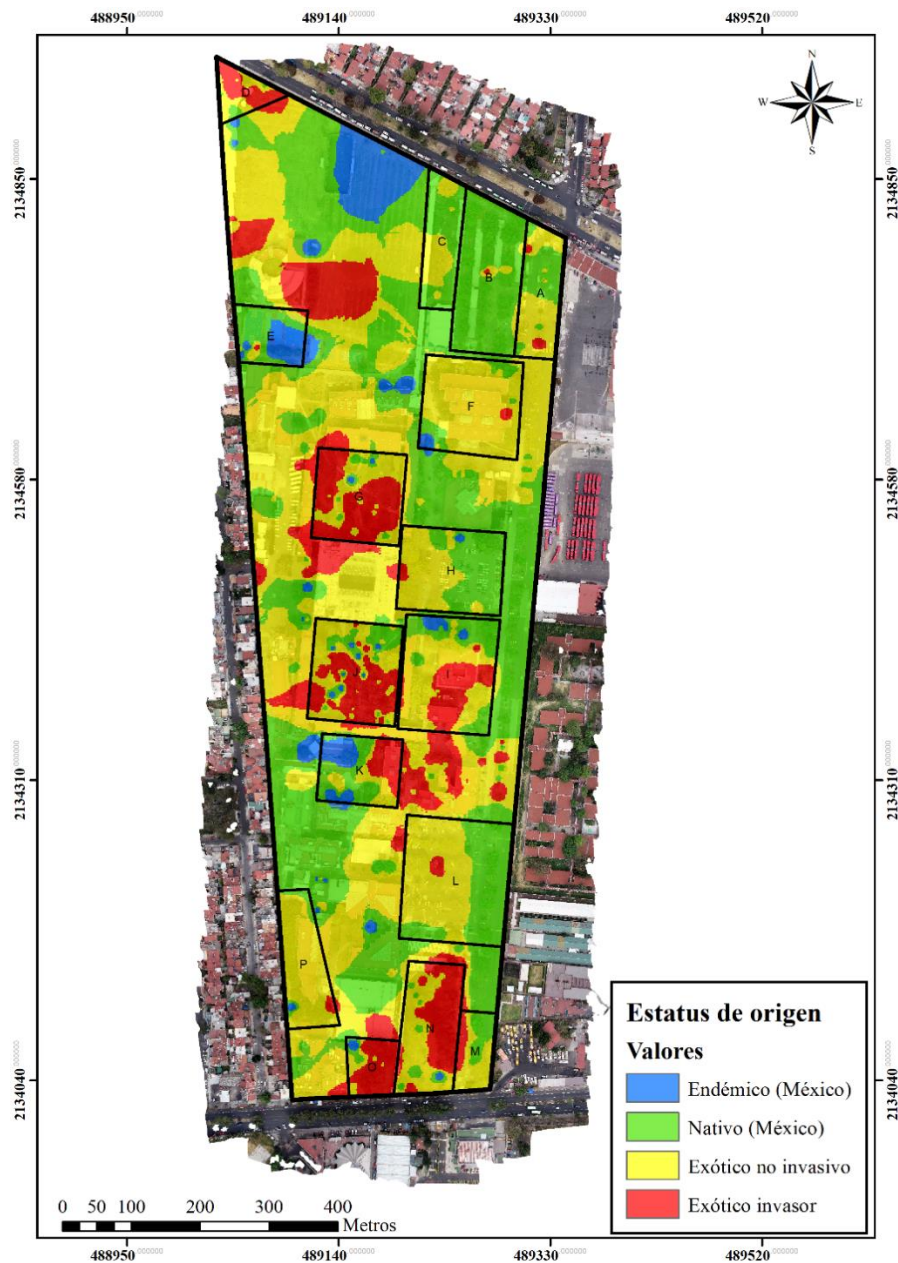


Figura 4. Distribución espacial del estatus de las especies arbóreas.

Las especies *Fraxinus uhdei* (Fresno), *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda) y *Casuarina equisetifolia* (Casuarina) concentraron la mayor abundancia de individuos en el área de estudio (Figura 2), reflejando su papel dominante en la estructura y composición del arbolado. Sin embargo, se identificó una extensa variedad de especies con baja abundancia (con pocos individuos) que muestran una estructura heterogénea, pero vulnerable a plagas, enfermedades y estrés ambiental, por la alta dominancia de individuos de unas pocas especies.

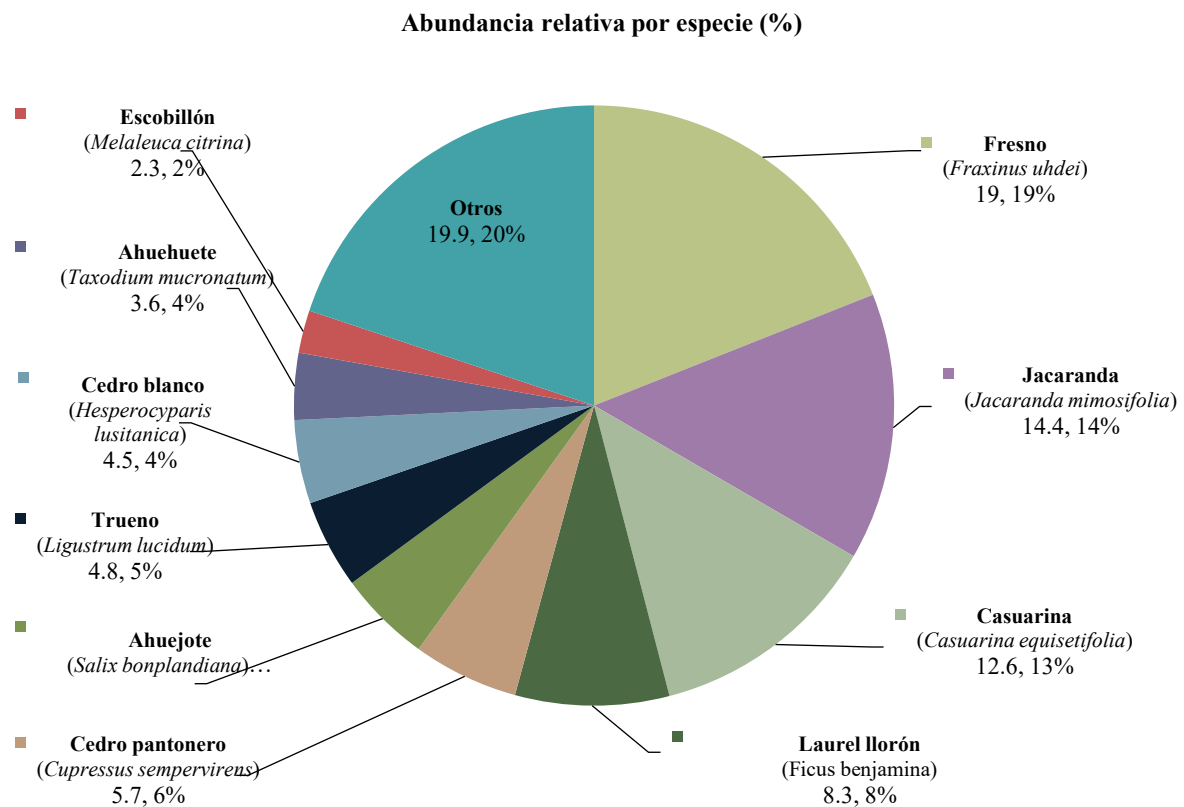


Figura 5. Porcentaje de población según la especie.

6.2 Estructura del arbolado

La estructura diamétrica del arbolado está dominada por dos clases de DAP: el 26 % de los individuos presenta diámetros entre 30.5 y 45.7 cm, y el 25 % entre 15.2 y 30.5 cm (Figura 6). En conjunto, estas clases concentran más de la mitad de la población arbórea de la institución, lo que sugiere una estructura poblacional relativamente homogénea en términos de tamaño, sin predominio de individuos de gran tamaño individual.

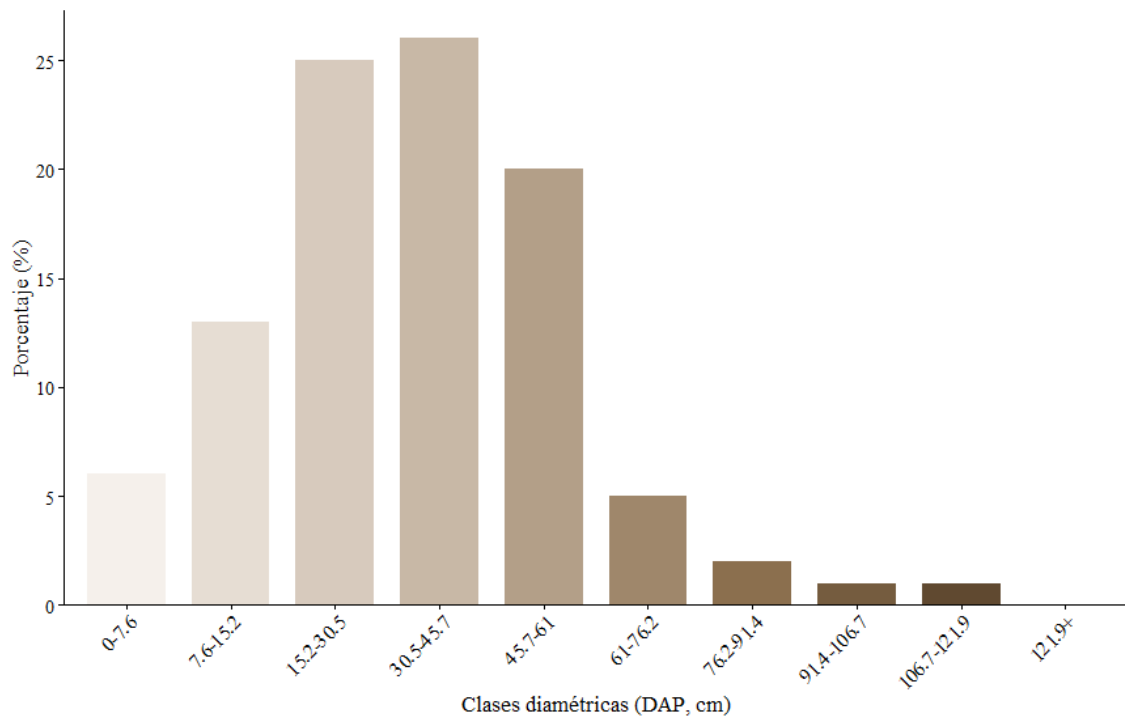


Figura 6. Porcentaje de árboles según su DAP.

Las Casuarinas y los Fresnos conforman la canopea principal del arbolado de la Unidad Xochimilco en dos clases diamétricas; media y alta (Figura 7). Sin embargo, se observa una estructura desequilibrada con muchas especies invasoras ornamentales jóvenes como el Escobillón pero con una brecha preocupante con las especies nativas de gran porte como el ahuehuete, que no parecen tener suficientes reemplazos con diámetros pequeños.

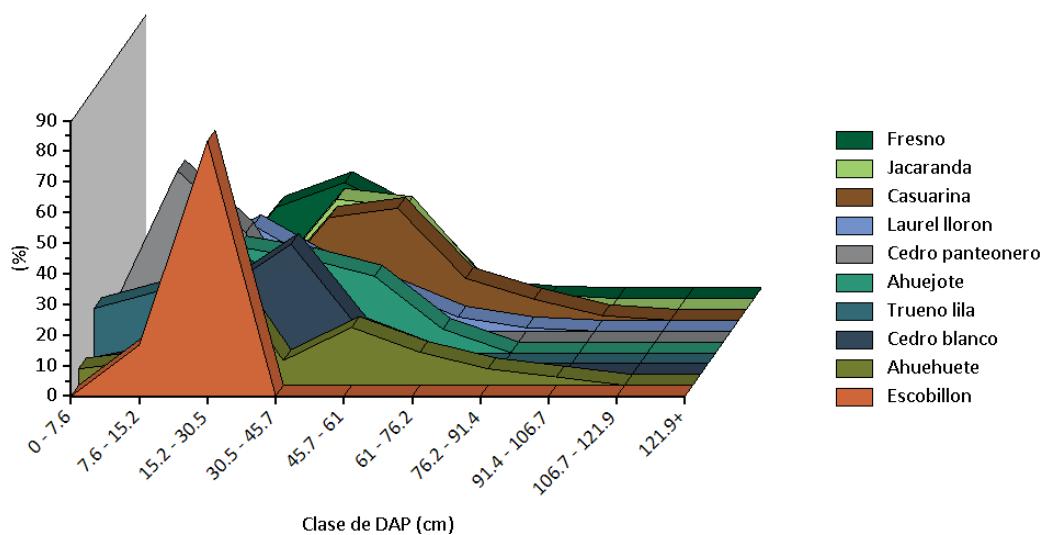


Figura 7. Clases diamétricas del arbolado.

El área basal total del arbolado de la UAM-X, se estimó con un valor de 130 m² lo que equivale aproximadamente a 6.2 m²/ha. El área basal representa la ocupación estructural del arbolado, al integrar el tamaño de los fustes a la altura del pecho. Este valor indica una estructura dominada por individuos de pequeño y mediano diámetro, característica de arbolado urbano con baja ocupación leñosa.

La biomasa foliar estimada fue de 17,193.1 kg, (17.2 toneladas) lo que es consistente con la estructura del arbolado, dominada por individuos de mediana y pequeño tamaño, tanto de diámetro como de copa. Suficiente para sostener procesos de regulación ambiental, pero limitada en comparación con sistemas forestales densos.

En el arbolado de UAM-X las especies más dominantes en términos de Área de las hojas (área foliar) son: Jacaranda, Fresno, y Cedro blanco, respetivamente. Juntando todas las especies arbóreas, su área foliar proporciona 20.16 hectáreas, lo que indica que, juntando hoja por hoja en un plano horizontal, la cobertura foliar podría abarcar casi en su totalidad la extensión de la UAM-X (21ha). Se enumeran las 10 especies con el Valor de Importancia (VI) más altos en la Tabla 2. Estos valores denotan la dominancia actual de la estructura del bosque urbano, no implica que estos árboles deban procurarse para el futuro. VI se calcula como la suma del Porcentaje de la Población y el porcentaje de Área de las hojas.

Tabla 2. Valor de importancia (VI)

Especie	(%) población	(%) del área de las hojas	Valor de importancia
Fresno	19%	27.80%	46.8
Jacaranda	14.40%	31.30%	45.7
Casuarina	12.60%	5.20%	17.8
Laurel llorón	8.30%	5.70%	14.1
Cedro blanco	4.50%	5.80%	10.4
Ahuehuate	3.60%	5.10%	8.7
Ahuejote	5%	2.10%	7.1
Trueno lila	4.80%	2.10%	6.9
Cedro panteonero	5.70%	0.60%	6.3
Eucalipto rojo	1.20%	3.70%	4.9

De las 58 especies determinadas en la UAM-X, el 17.8% de las especies concentra aproximadamente el 80% de los individuos de la unidad. En la Figura 8 se aprecia la distribución espacial de las especies más abundantes de la UAM-X.



Figura 8. Especies más abundantes de la UAM-X.

6.3 Mantenimiento del arbolado

La condición general de salud se expresa en la Figura 9. Del total de árboles registrados en la UAM-X, el 80% se encuentra en buenas condiciones de salud y requieren una atención normal y rutinaria, mientras que el 17.5% de los árboles muestran signos de presencia de plaga o enfermedad y requieren atención inmediata. Finalmente, tan solo el 1.7% se encuentran en una condición crítica de salud, que requiere una atención prioritaria. Estos son árboles que se encuentran con graves afectaciones fitosanitarias o muertos, que precisan tratamiento o remoción.

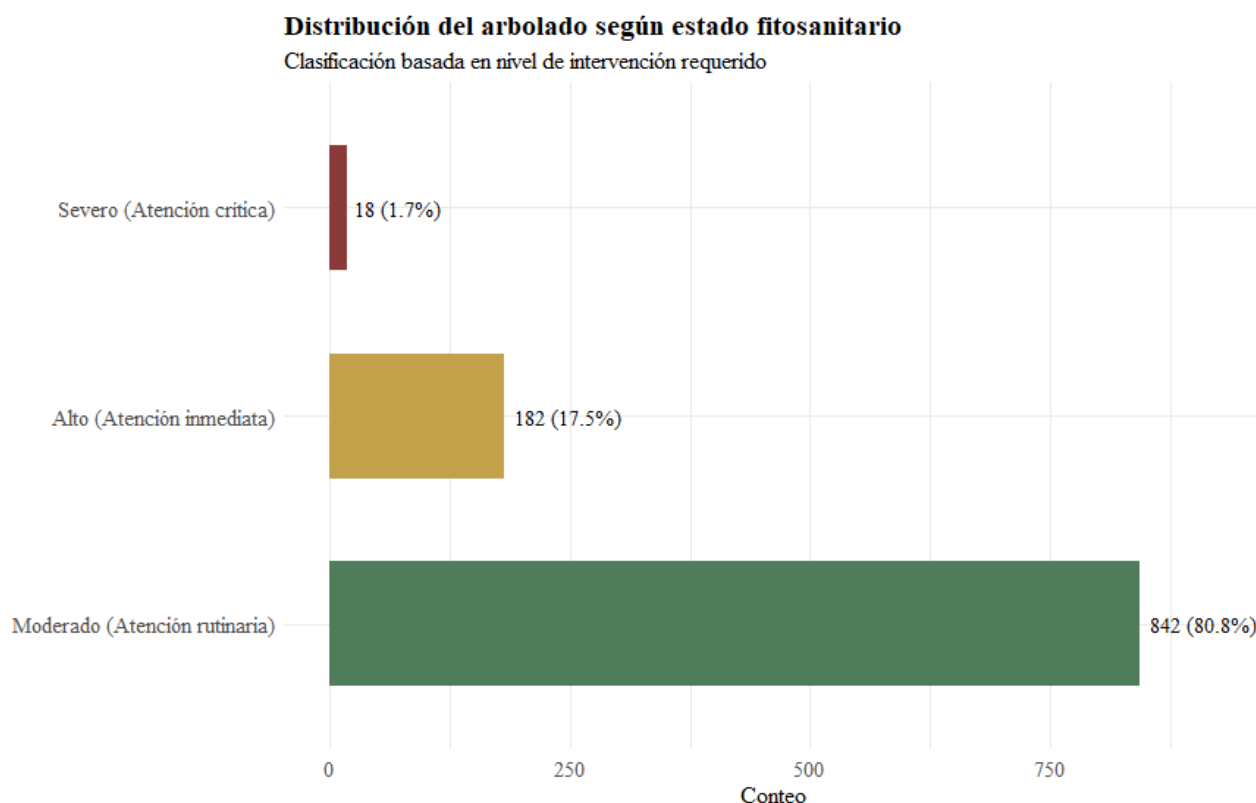


Figura 9. Condición del arbolado de UAM-X.

Las tareas de mantenimiento son el conjunto sistemático de intervenciones operativas estructurales y fitosanitarias aplicadas a los árboles establecidos en el entorno urbano, con el objetivo de conservar y mejorar el estado, condición y funcionalidad del ecosistema urbano. En la UAM-X el 47% del arbolado se encuentra sano y no requiere de ninguna tarea de mantenimiento en particular, sin embargo; el 38.4% se encuentra en la necesidad de aplicar tratamiento para plagas o enfermedades. Asimismo, solo el 12.8% requiere una limpieza de copa y un 1.4% requiere ser removido. Es decir, la mayoría del arbolado no requiere intervención, pero hay una proporción relevante que sí demanda un tratamiento fitosanitario, y las acciones críticas de remoción son minoritarias (Figura 10).

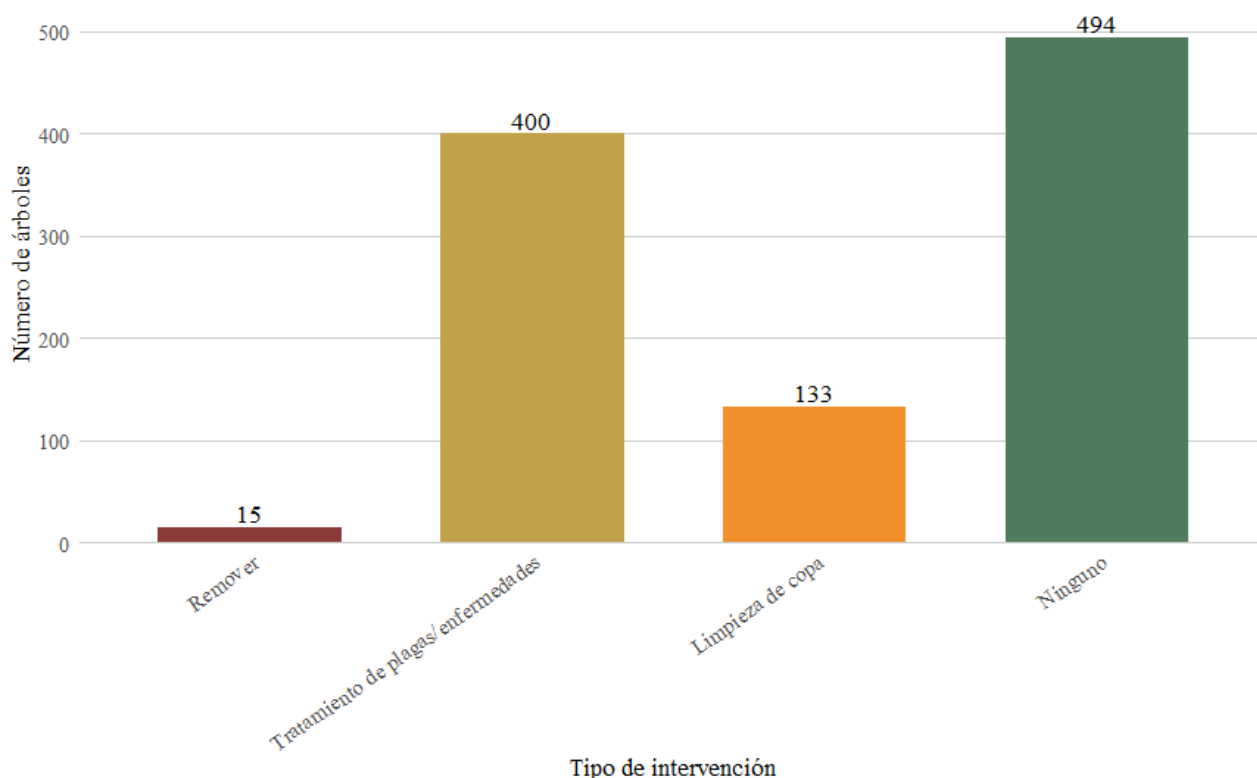


Figura 10. Tareas de mantenimiento del arbolado UAM-X.

6.4 Plagas y enfermedades

El análisis del censo fitosanitario permitió identificar dos afecciones principales que afectan al arbolado de la UAM- X. En primera instancia se identificó al muérdago como la principal plaga que afecta al arbolado de la UAM-X, al concentrar la mayor proporción de individuos con algún tipo de afectación respecto a otras plagas registradas, con presencia de dos géneros de muérdago, *Struthanthus* y *Cladocolea*, ambos pertenecientes al grupo de las plantas hemiparásitas vasculares. Estas especies se establecen sobre ramas y fustes de los árboles hospederos, donde desarrollan haustorios que penetran los tejidos conductores, permitiéndoles extraer agua y nutrientes minerales. Los árboles infestados con muérdago ven degradadas sus funciones y estructura lo que los vuelve vulnerables a otras plagas y enfermedades que pueden resultar en la muerte parcial o total del árbol.

La segunda afección con más presencia fue el Heno de Bola (*Tillandsia recurvata*). A diferencia del muérdago, *T. recurvata* es una planta epífita atmosférica y no parasitaria. No obstante, su proliferación excesiva sobre ramas y fustes puede interferir con diversos procesos funcionales del arbolado, como la captación de luz, el intercambio gaseoso y el desarrollo normal de brotes y follaje. En este sentido, aunque *Tillandsia recurvata* no constituye una plaga parasitaria en sentido estricto, su alta abundancia puede aumentar la vulnerabilidad del arbolado urbano, especialmente en individuos estresados o con condiciones fisiológicas comprometidas.

La Figura 11 muestra la distribución espacial del muérdago y de *Tillandsia recurvata* en la UAM-X. Las especies que coinciden con la presencia de muérdago son, *Salix bonplandiana* (Ahuejote), *Prunus domestica* (Ciruelo), *Fraxinus uhdei* (Fresno), *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda), *Ligustro lucidum* (Trueno lila), *Taxodium mucronatu* (Ahuehuete).

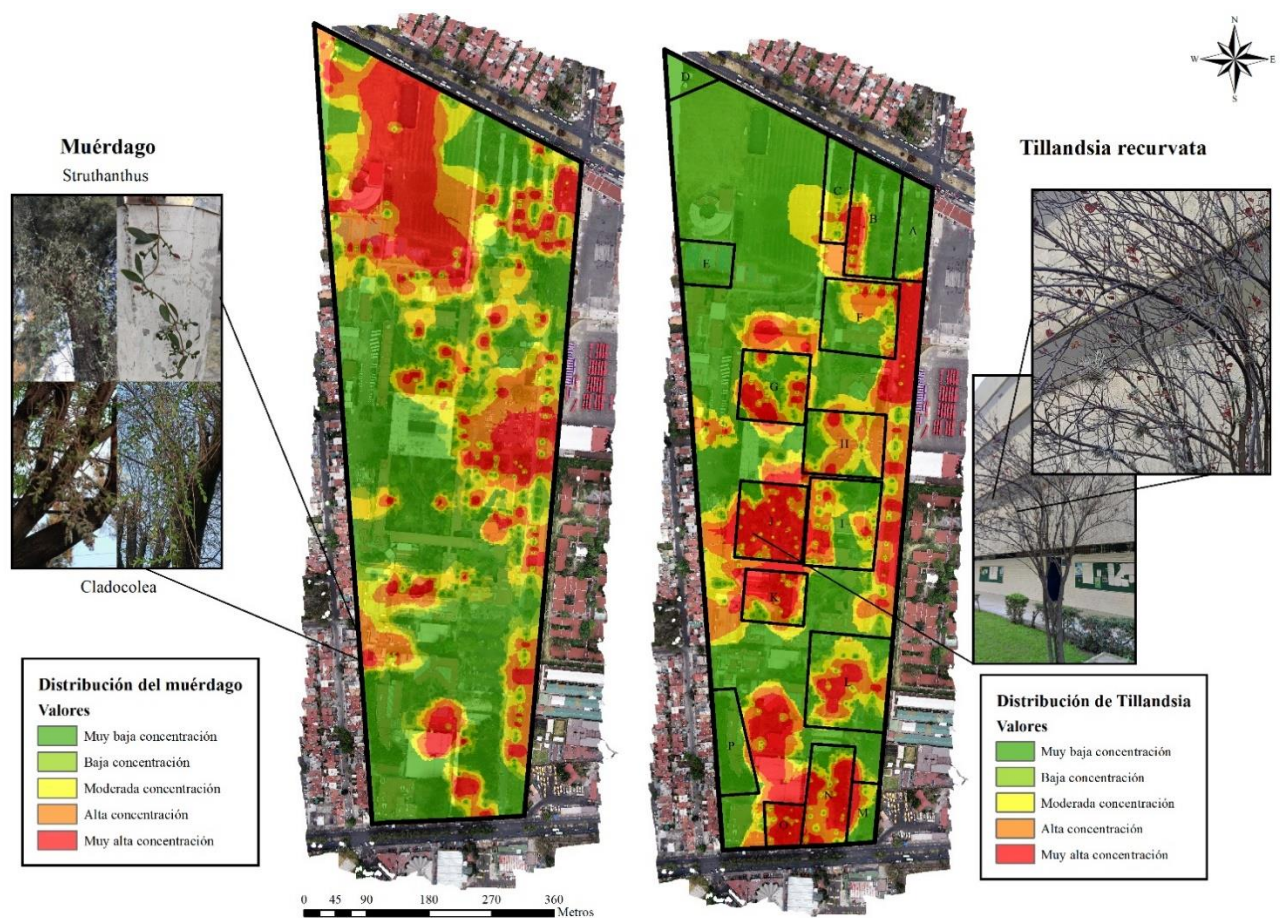


Figura 11. Distribución del arbolado con afectación fitosanitaria por Muérdago y Heno de Bola de la UAM-X.

6. Servicios ecosistémicos

7.1 Almacenamiento de carbono

Se estimó un almacenamiento de carbono total de 435.09 t C equivalente a 1,596.8 t CO₂. Considerando una superficie total de 21 ha. De las 58 especies determinadas, 10 especies concentraron el 92.6% del almacenamiento de carbono total. Las especies con mayor almacenamiento de carbono fueron *Casuarina equisetifolia* (Casuarina), *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda), *Fraxinus uhdei* (Fresno) y *Ficus benjamina* (Laurel llorón) (Figura 10).

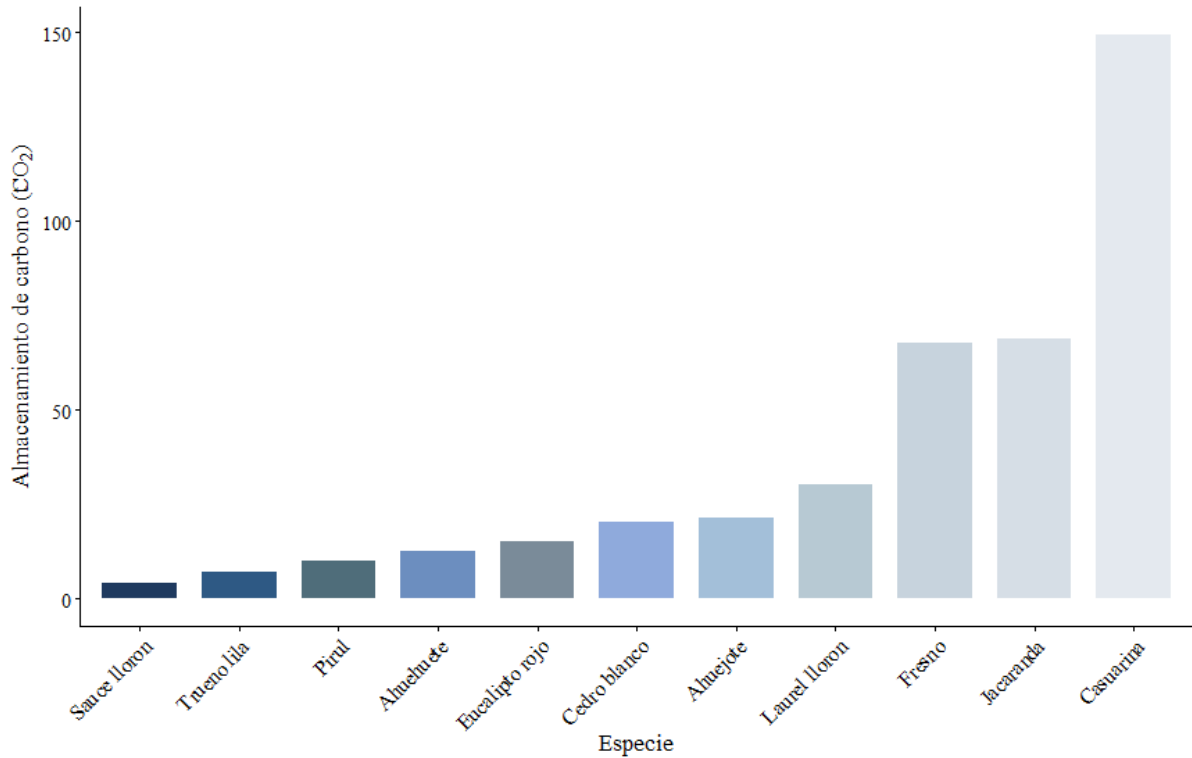


Figura 12. Especies con mayor almacenamiento de carbono.

Las especies que poseen mayor almacenamiento de carbono por árbol individual son *Ficus elastica* (Hule), *Eucalyptus camaldulensis* (Eucalipto rojo), *Casuarina equisetifolia* (Casuarina), *Schinus molle* (Pirul) y *Salix babylonica* (Sauce llorón) (Figura 11).

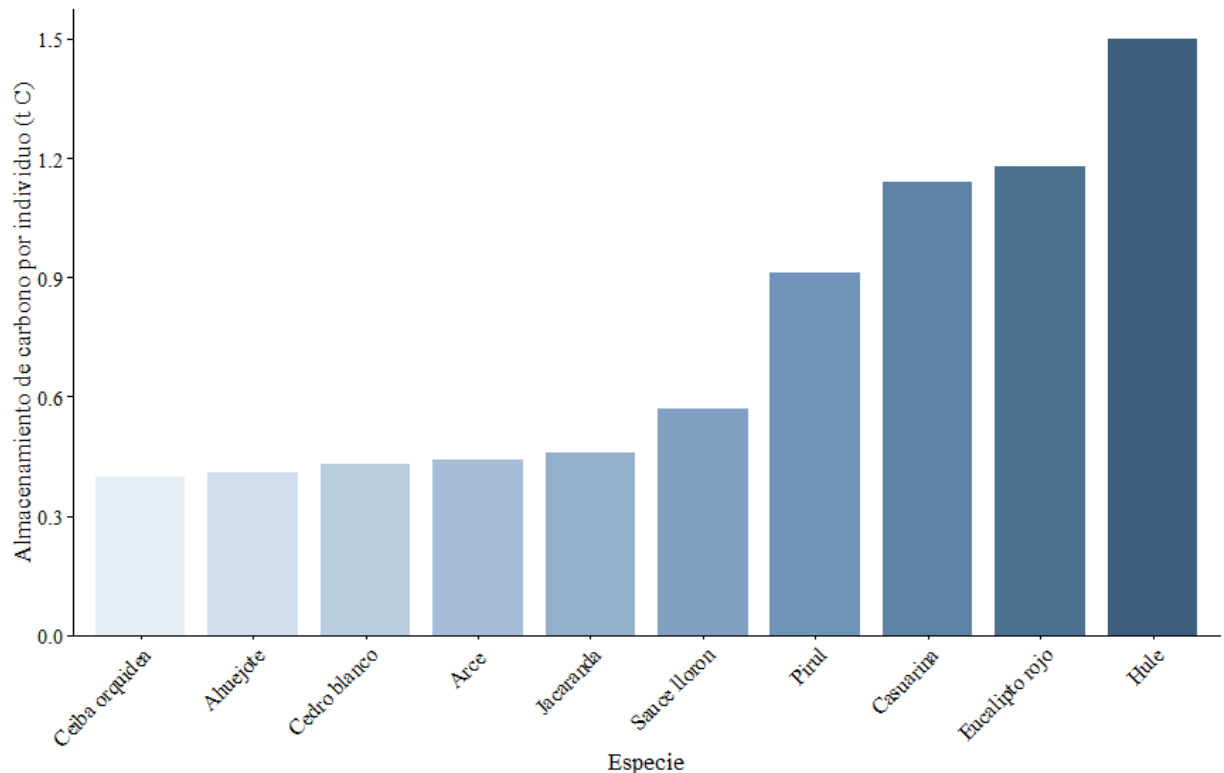


Figura 13. Almacenamiento de carbono por individuo.

Distribución espacial

El almacenamiento de carbono presenta una distribución heterogénea (Figura 12). Los valores más altos de almacenamiento se asocian principalmente con individuos de gran diámetro y alta biomasa aérea, lo que indica que el servicio está determinado por la estructura del arbolado más que por su localización específica dentro de la UAM-X. Asimismo, se identifica la presencia de núcleos de altísimo almacenamiento concentrados en jardines principales: G, J y N (Zapata, Edén, Picnic), matrices de áreas verdes adyacentes a espacios académicos (O, P, K, F y B), espacios funcionales (H, E, D, C y L). Zonas con arbolado consolidado de gran porte como *Casuarina equisetifolia* (Casuarina), *Taxodium mucronatum* (Ahuehuete), *Ficus benjamina* (Laurel llorón), *Schinus molle* (Pirul), *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda) que se caracterizan por altos volúmenes de biomasa aérea acumulada.

En contraste, los valores intermedios de almacenamiento se distribuyen en parches irregulares asociados principalmente a estacionamientos, camellones o zonas de tránsito, donde predominan individuos juveniles o con diámetro de bajos a intermedio, con bajo desarrollo estructural. En estas zonas son frecuentes especies como *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda) y *Fraxinus uhdei* (Fresno), lo que sugiere que las condiciones asociadas a infraestructura y tránsito limitan el desarrollo estructural pleno del arbolado, restringiendo su potencial de almacenamiento.

El campus presenta una estructura etaria dominada por cohortes intermedias, con pocos individuos longevos que actúan como reservorios principales de carbono. El almacenamiento total del sistema de la UAM-X depende de un número reducido de individuos estructuralmente dominantes, lo que sugiere que su conservación es estratégica para mantener la capacidad de almacenamiento del sistema.

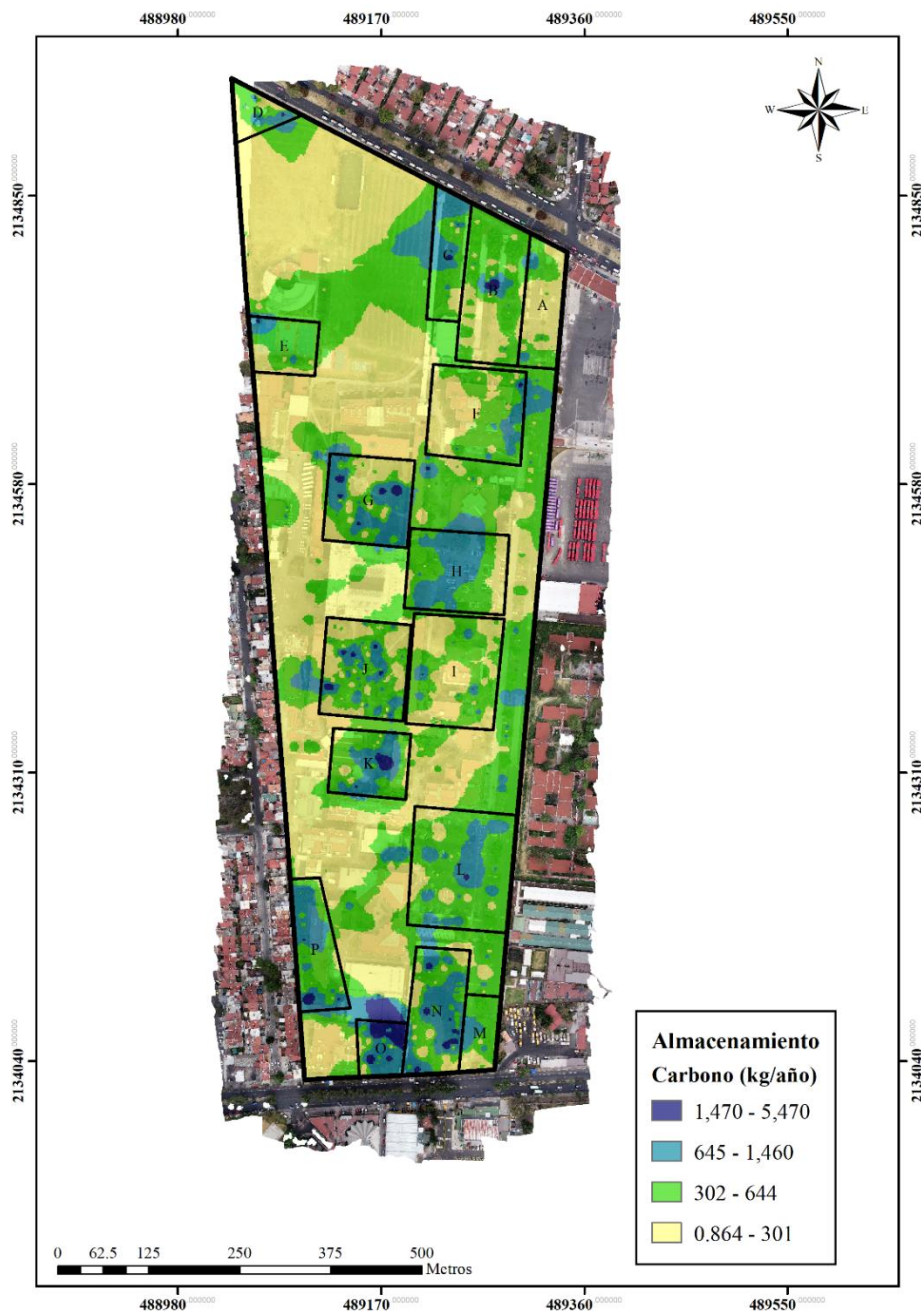


Figura 14. Almacenamiento de carbono en UAM-X.

7.2 Secuestro de carbono

Se estimó un secuestro de carbono total de 15.18 t C equivalente a 147, 156.64 \$MEX/año. Las 10 especies más dominantes concentraron el 92% del secuestro de carbono total. Las más destacadas son *Casuarina equisetifolia* (Casuarina), *Fraxinus uhdei* (Fresno), *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda), *Ficus benjamina* (laurel llorón) (Figura 13).

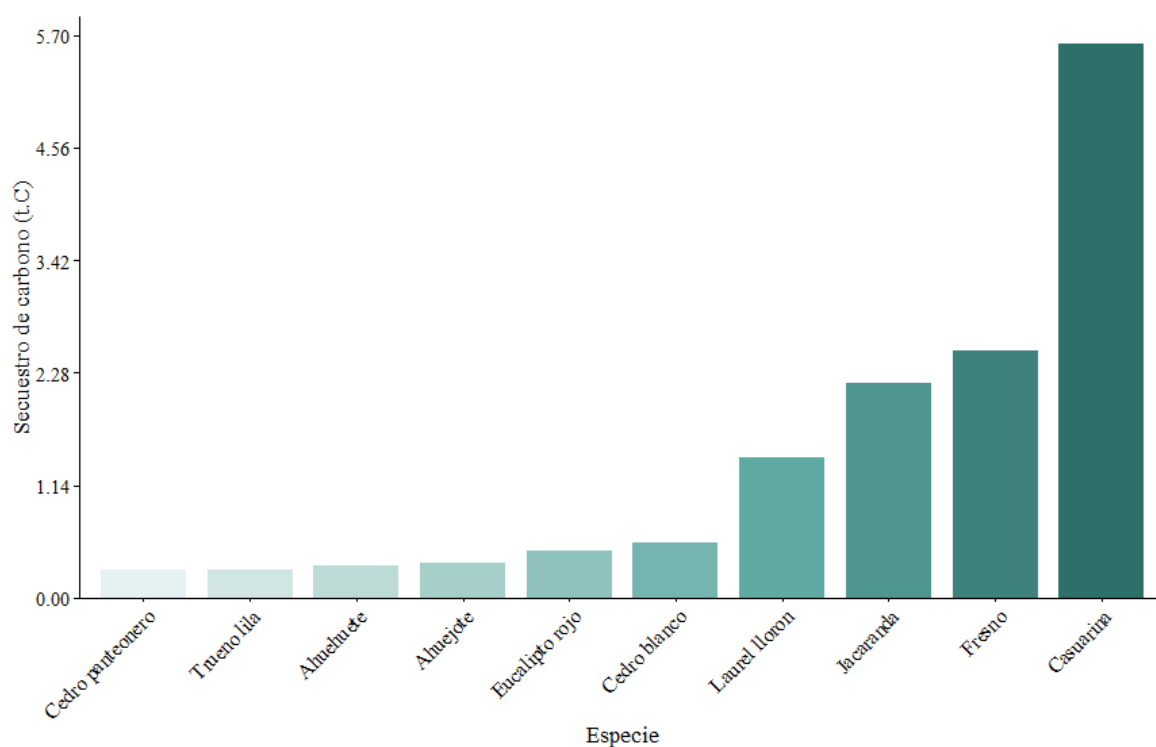


Figura 15. Especies con mayor secuestro de carbono.

Distribución espacial

El secuestro de carbono presenta una distribución espacial heterogénea (Figura 14), caracterizada por núcleos de alto valor concentrados en jardines consolidados (G, J y N) y áreas verdes estructuralmente desarrolladas (O, P, L, K, H, B y D). Estos parches coinciden principalmente con monocultivos establecidos de *Casuarina equisetifolia* (Casuarina) y alineaciones extensas de *Ficus benjamina* (Laurel llorón), así como con pequeñas áreas verdes rodeadas por edificios académicos donde predominan individuos de gran porte como *Taxodium mucronatum* (Ahuehuete), *Fraxinus uhdei* (Fresno) y *Casuarina equisetifolia* (Casuarina). La elevada captura anual en estas zonas se relaciona con la continuidad de copa, alta densidad arbórea y menor intervención por podas intensivas, condiciones que favorecen una mayor producción primaria neta.

En contraste, los valores intermedios predominan en estacionamientos y camellones extensos dominados por *Fraxinus uhdei* (Fresno) y *Jacaranda mimosifolia* (Jacaranda) de tamaño intermedio, donde la poda frecuente, el estrés y las restricciones del sitio limitan el desarrollo estructural completo y, por ende, el potencial de secuestro anual.

En conjunto, el sistema está dominado por individuos en fase estructural intermedia, con un amplio contingente de árboles en crecimiento activo. No obstante, el secuestro anual depende de manera significativa de núcleos con arbolado consolidado, caracterizados por menor interferencia antrópica y mayor continuidad de copa, lo que evidencia que la capacidad de captura de carbono de la UAM-X está condicionada tanto por la estructura poblacional como por el contexto de manejo y configuración espacial del arbolado.

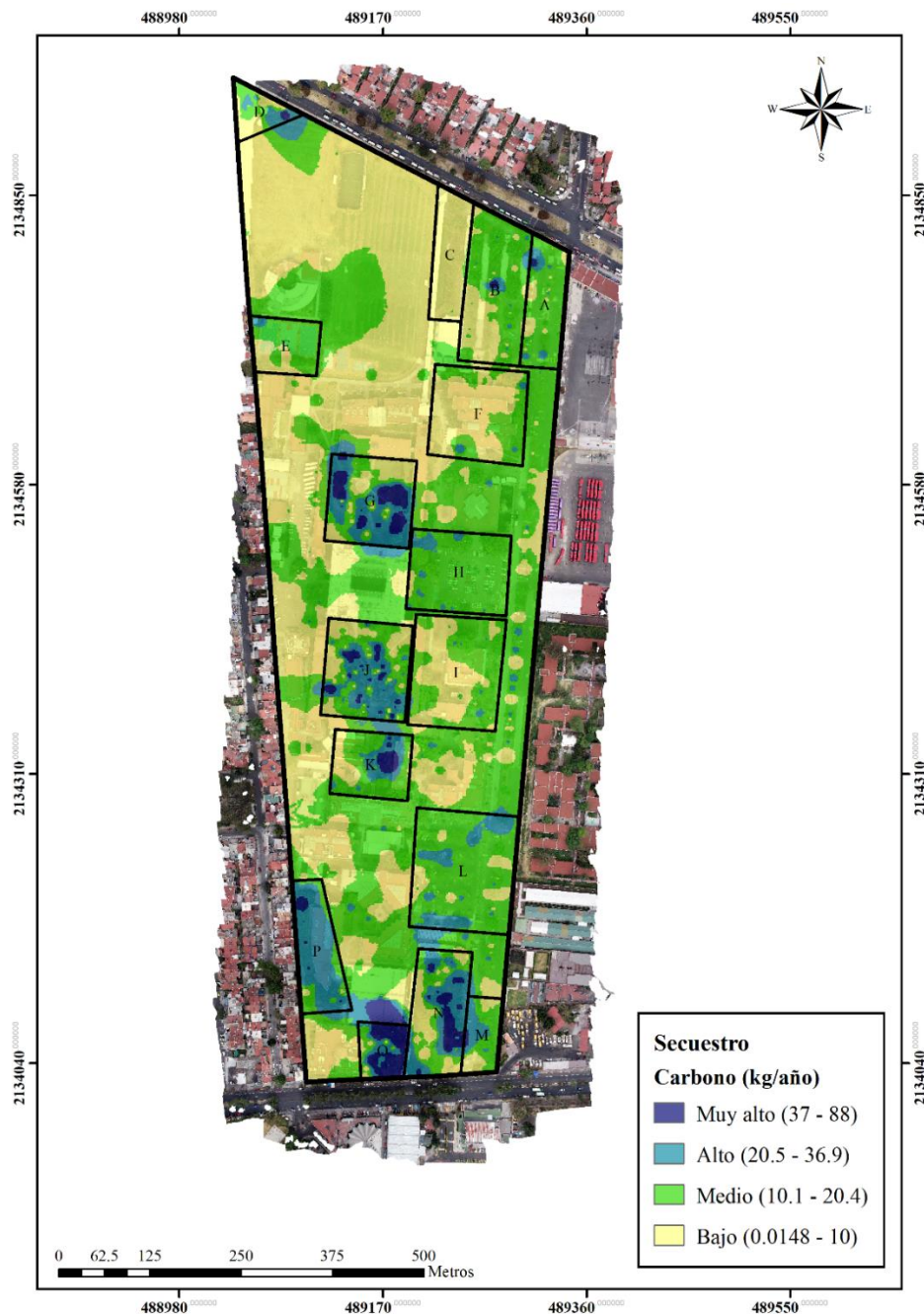


Figura 16. Secuestro de carbono en UAM-X.

7.3 Remoción de contaminantes.

La Figura 17 muestra la remoción mensual de contaminantes atmosféricos por el arbolado de UAM-X, el análisis evidencia patrones entre los contaminantes evaluados. El ozono (O_3) presentó los valores más altos de remoción, así como una mayor variación mensual, con picos en junio, septiembre y diciembre. Este comportamiento es consistente con lo reportado en estudios de deposición seca en bosques urbanos y con los algoritmos de cálculo implementados en i-Tree Eco. El ozono es un gas altamente oxidante y químicamente reactivo que puede difundirse hacia el interior de las hojas a través de los estomas durante los periodos de apertura estomática, y tiene una de las velocidades más altas de deposición entre los contaminantes atmosféricos gaseosos. En la Ciudad de México, la temporada de ozono inicia en febrero y concluye en junio, temporada de alta radiación solar, sin embargo, presenta sus valores más bajos a partir de junio, entrando en temporada de lluvias, lo cual coincide con los altos valores de remoción estimados.

En contraste, la remoción de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y CO fue considerablemente menor y presentó una variabilidad temporal más acotada, con valores relativamente constantes a lo largo del año. En el caso del CO, su baja reactividad química y solubilidad se traducen en velocidades de deposición muy reducidas, lo que limita su absorción foliar en comparación con otros contaminantes gaseosos. Por su parte, la deposición de material particulado depende principalmente de procesos físicos como la sedimentación gravitacional, el impacto inercial, la intercepción y la difusión browniana. Estos mecanismos están fuertemente condicionados por el tamaño de las partículas y por las características aerodinámicas del dosel. A diferencia de los contaminantes gaseosos, estas partículas no suelen penetrar en los tejidos vegetales, sino que se depositan sobre las superficies de hojas, ramas y corteza, donde pueden posteriormente ser removidas por procesos de lavado por lluvia o resuspensión atmosférica.

Los contaminantes gaseosos SO_2 y NO_2 presentaron un patrón temporal similar al observado para O_3 durante la mayor parte del año, aunque con valores de remoción considerablemente menores. Esta coincidencia puede explicarse porque los tres contaminantes comparten mecanismos de deposición asociados principalmente a procesos de absorción estomática y reacciones químicas en la superficie foliar, los cuales dependen de factores meteorológicos y fisiológicos similares. No obstante, durante el mes de septiembre se registró un incremento notable en la remoción de ambos gases, alcanzando valores comparables a los observados para O_3 . En particular, el SO_2 presentó el pico mensual más alto entre los contaminantes analizados, lo cual sugiere un aumento puntual en su concentración atmosférica o en las condiciones que favorecen su deposición seca durante ese periodo.

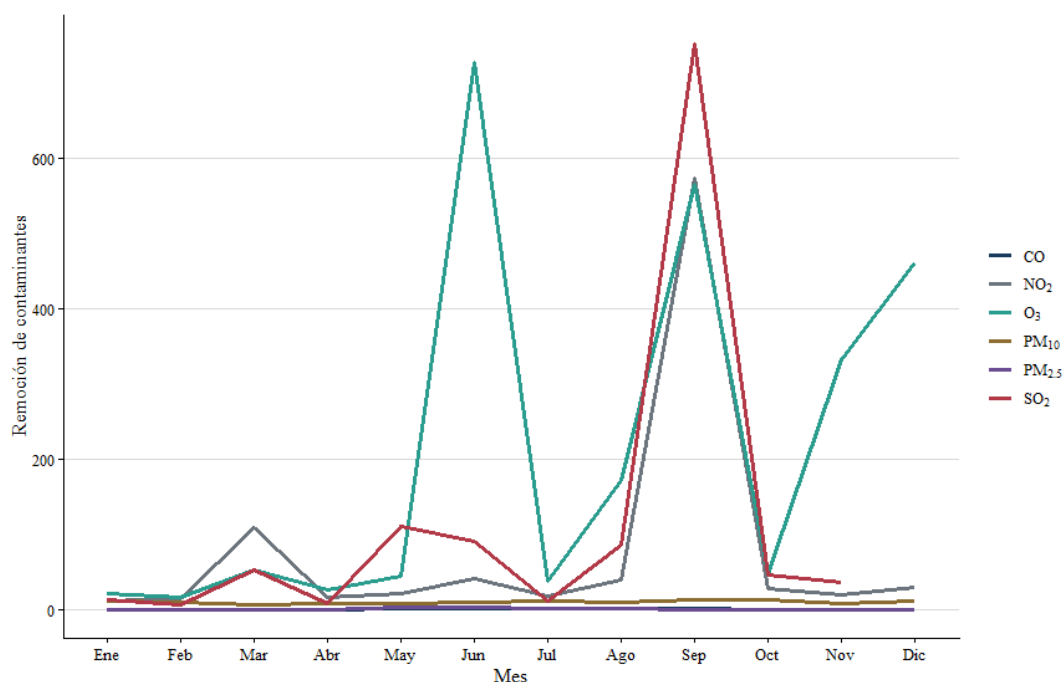


Figura 17. Remoción de contaminantes por mes,

La figura 18 muestra la remoción total por contaminante, y su contribución individual. Los tres valores más altos de remoción fueron de ozono (52.3%), dióxido de azufre (25.4%) y dióxido de nitrógeno (19.3%). Estos contaminantes gaseosos comparten mecanismos de deposición asociados principalmente a la absorción estomática y a reacciones químicas en la superficie foliar. el ozono es un contaminante secundario formado por reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles bajo condiciones de alta radiación solar, fenómeno particularmente relevante en la Ciudad de México. En este sentido, los altos valores de remoción observados reflejan tanto la capacidad del arbolado para mitigar contaminantes gaseosos como la elevada presencia de este compuesto en la atmósfera urbana, lo que refleja el papel del arbolado en la regulación de contaminantes atmosféricos, sobre todo en ciudades con alta contaminación del aire.

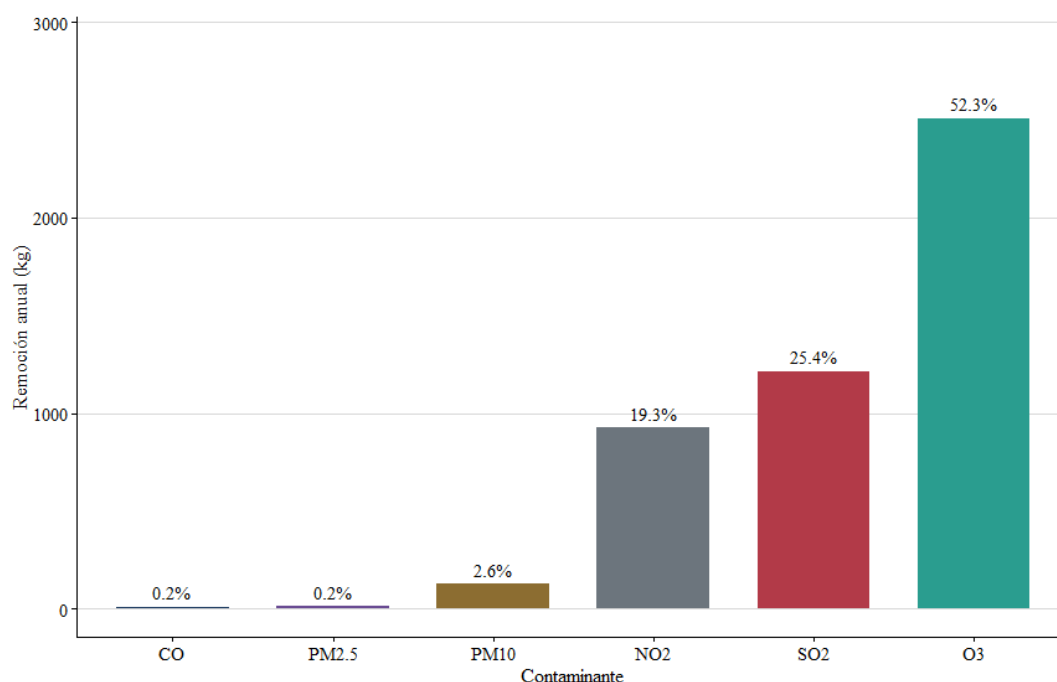


Figura 18. Contribución a la Remoción por contaminante.

La remoción de contaminantes por el arbolado de la UAM-X (Figura 19) muestra una tendencia general al alza a lo largo del año. Durante los primeros meses se observan valores relativamente bajos; sin embargo, estos aumentan conforme avanzan los meses. Los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre presentan incrementos pronunciados en la remoción estimada, mientras que abril, julio y octubre muestran descensos marcados. El incremento observado en marzo coincide con la fase temprana de la estación seca cálida, caracterizada por altas temperaturas y elevada radiación solar que favorecen la actividad fotoquímica en la atmósfera urbana. Por otro lado, los incrementos observados en junio y septiembre coinciden con el inicio y desarrollo de la temporada de lluvias, periodo caracterizado por precipitaciones frecuentes e intensas, siendo julio y agosto los meses con mayores acumulaciones de lluvia en la Ciudad de México.

La menor remoción observada durante la estación seca cálida podría relacionarse con una menor área foliar disponible, ya que el máximo desarrollo del dosel arbóreo suele ocurrir durante la temporada de lluvias. Esto es consistente con el hecho de que agosto y septiembre corresponden a los meses con mayor humedad atmosférica en la ciudad y coinciden con los valores más altos de remoción de contaminantes registrados en el análisis. En este periodo, el mayor desarrollo foliar y las condiciones ambientales favorables para la actividad fisiológica de la vegetación pueden incrementar los procesos de deposición seca, particularmente para contaminantes gaseosos cuya remoción ocurre mediante difusión hacia los estomas y reacciones químicas en la superficie foliar.

Finalmente, la caída abrupta de octubre puede estar relacionada con la transición estacional posterior a la temporada de lluvias. Donde suele haber una disminución progresiva de la radiación solar y cambios meteorológicos que pueden reducir la actividad fisiológica del arbolado. Estas variaciones pueden limitar los procesos de deposición seca y contribuir a la disminución en la remoción estimada de contaminantes.

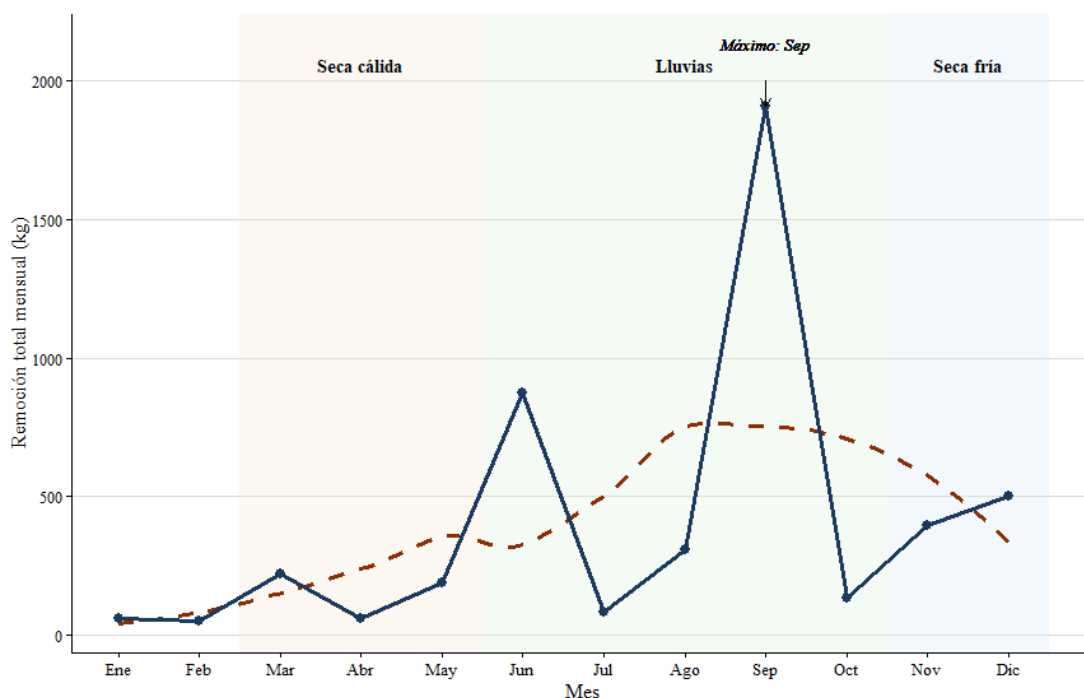


Figura 19. Estacionalidad en la remoción de contaminantes.

Distribución espacial

Capacidad espacial del arbolado para remover contaminantes

La configuración espacial de la remoción de contaminantes gaseosos (O_3 , NO_2 , SO_2 y CO) y partículas suspendidas (PM_{10} y $PM_{2.5}$) presenta un patrón espacial coincidente dentro de la UAM-X (Figuras 20–22), donde el valor de remoción constituye la principal variable de diferenciación entre contaminantes. En términos generales, la distribución espacial se caracteriza por la presencia de núcleos de valores altos de remoción distribuidos de manera heterogénea en distintos sectores funcionales del campus.

Los valores más altos se concentran principalmente en la matriz verde que rodea el nodo de Coordinación de Cómputo (bloque K), así como en las áreas verdes asociadas a los servicios académicos ubicados en los bloques H y F (comedor y biblioteca). Otros núcleos importantes de remoción se localizan en las áreas deportivas (bloques E y D) y en el corredor y acceso vehicular norte (bloques C y A), este último correspondiente al acceso por Bombas.

Los valores intermedios se distribuyen en parches localizados principalmente en el estacionamiento occidental (bloque L, cercano al servicio médico) y en la zona suroeste del acceso vehicular (bloque P), próximo al edificio R.

Las especies que coinciden de manera recurrente con estos patrones espaciales de remoción corresponden principalmente a *Taxodium mucronatum* (ahuehuete), *Jacaranda mimosifolia* (jacaranda), *Fraxinus uhdei* (fresno), *Ficus elastica* (hule), *Schinus molle* (pirul), *Phoenix canariensis* (palma canaria) y *Eucalyptus camaldulensis* (eucalipto rojo).

La remoción total estimada de ozono (O_3) fue de 2, 508, 451.4 g/año, mientras que, a nivel individual, los valores de remoción variaron entre 2.17 g/año y 26, 511.09 g/año por árbol. En el caso del dióxido de nitrógeno (NO_2) estimado fue de 924, 939.3 g/año, con valores individuales que oscilaron entre 0.79 g/año y 11, 021.13 g/año. Por otra parte, el dióxido de azufre (SO_2) presentó una remoción total estimada de 1, 276, 946.6 g/año, con valores individuales desde 1.11 g/año y 11, 098.16 g/año (Figura 20).

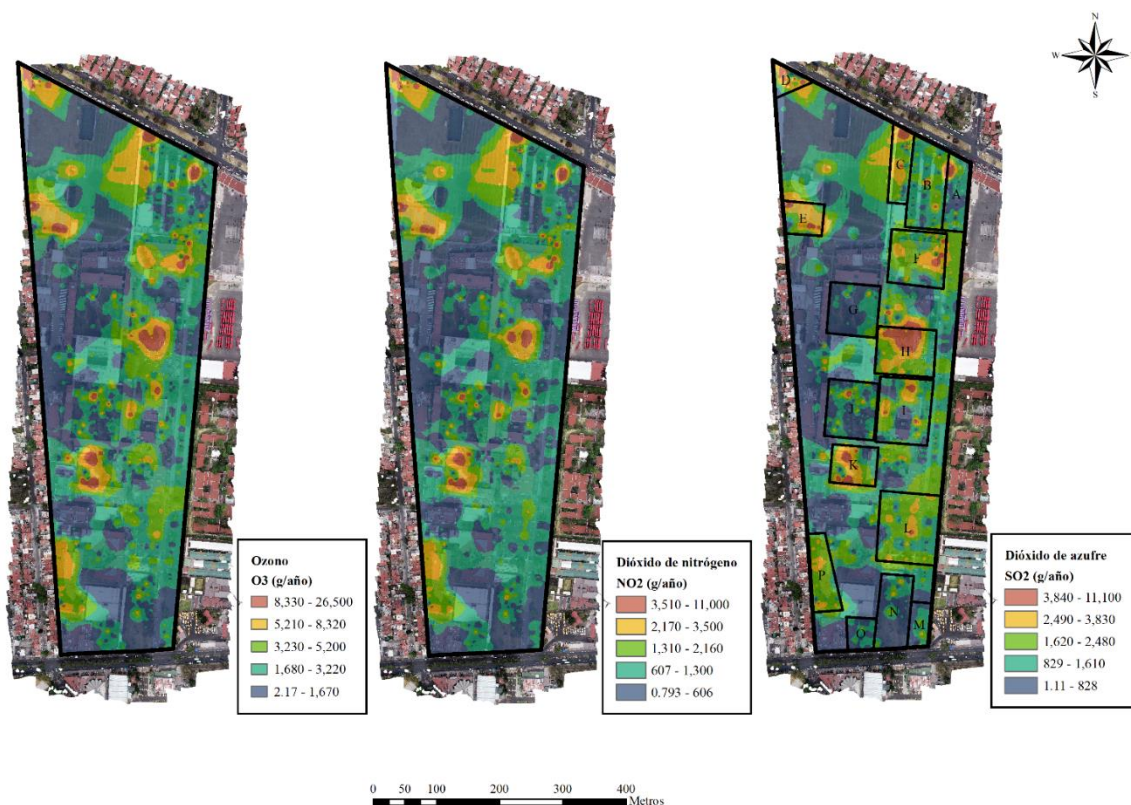


Figura 20. Remoción de contaminantes gaseosos en UAM-X.

La remoción total estimada de partículas suspendidas PM₁₀ fue de 125, 639.3 g/año, mientras que, a nivel individual, los valores de remoción variaron entre 0.11 g/año y 1, 632.01 g/año por árbol. En el caso de las partículas PM_{2.5} el valor total de remoción estimado fue de 11, 799.6 g/año, con valores individuales que oscilaron entre 0.01 g/año y 88.24 g/año (Figura 21).

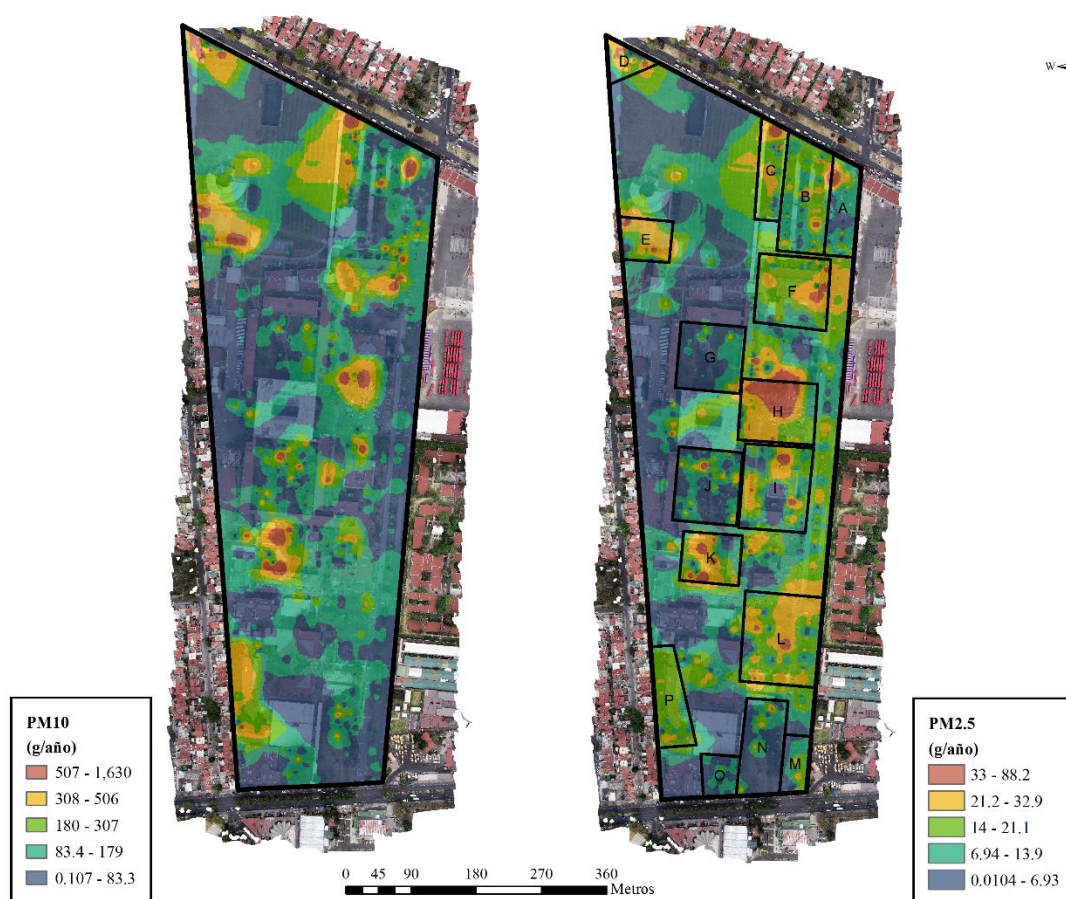


Figura 21. Remoción de partículas contaminantes en UAM-X.

La remoción total estimada de monóxido de carbono (CO) fue de 7, 892.3 g/año con valores individuales de 0.01 g/año y 56.28 g/año por árbol, siendo el contaminante con la menor remoción (Figura 22). Esto es común en la mayoría de estudios con iTree pues es un contaminante que depende casi exclusivamente de difusión física, no de reacciones químicas o deposición superficial. El modelo de iTree se basa en el proceso de deposición seca, en particular en la velocidad de deposición, y el CO posee una de las velocidades de deposición más bajas entre contaminantes atmosféricos.

Las magnitudes varían entre contaminantes pero la estructura espacial es consistente, lo que indica que la estructura arbórea (biomasa, densidad, área foliar) es el factor dominante del servicio de remoción, además, las especies coincidentes en los parches de remoción coinciden con especies arbóreas con alta densidad de copa, lo que refleja que el servicio está estructuralmente determinado por la arquitectura arbórea y el área foliar disponible para deposición seca, funcionando como un sistema de mitigación espacialmente consistente, independientemente del tipo de contaminante evaluado.

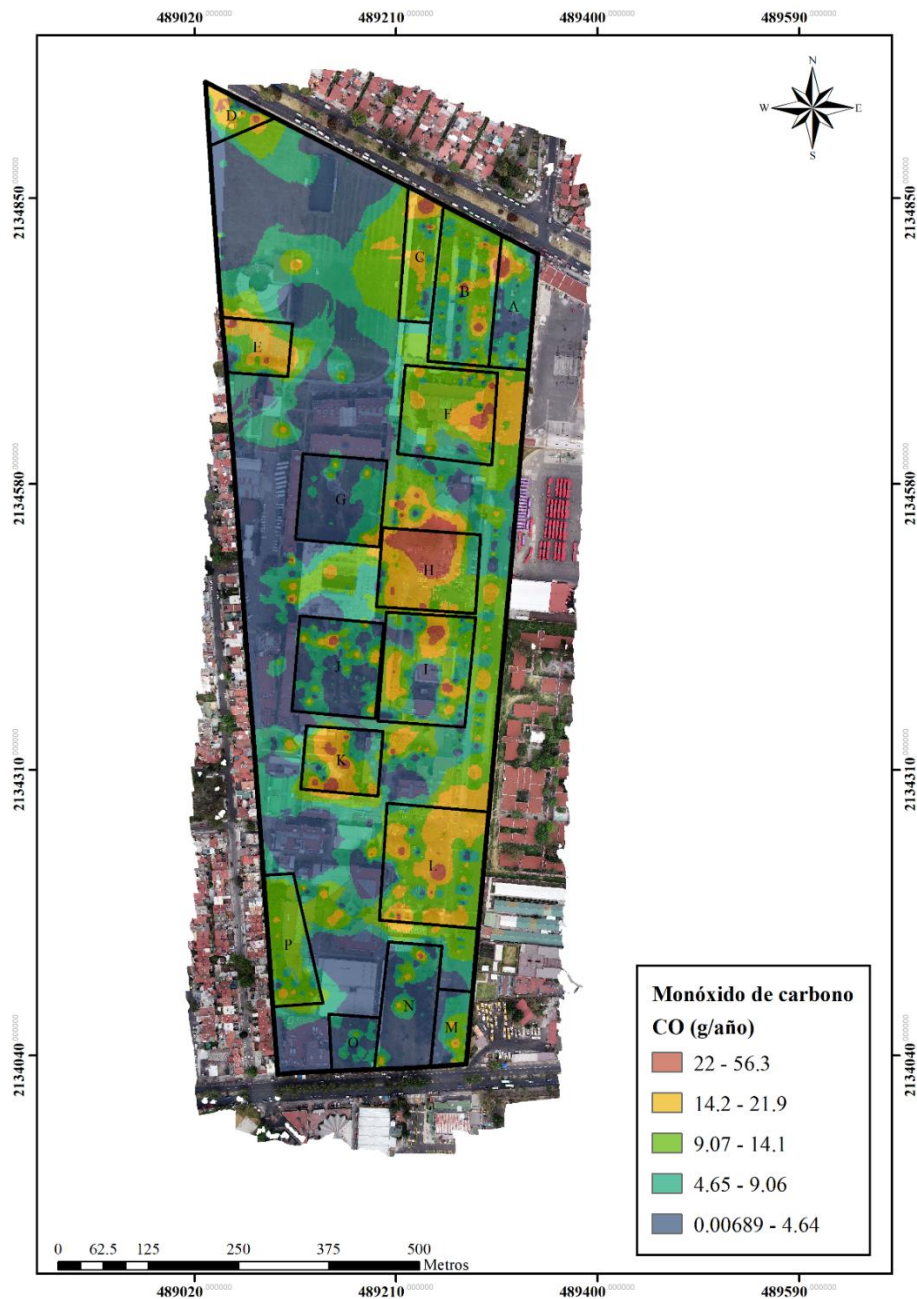


Figura 22. Remoción de contaminantes gaseosos de baja remoción en UAM-X.

8. Zonificación

8.1 Servicios ecosistémicos de regulación

Para contar con un panorama integral sobre la provisión de servicios ecosistémicos de regulación por el arbolado de la Unidad, los resultados del almacenamiento de carbono y remoción de contaminantes se normalizaron en un rango entre 0 y 1 (Figura 23). La normalización permite eliminar sesgos asociados a diferentes magnitudes y unidades, asegurando que ninguna variable domine el análisis únicamente por su escala numérica. De esta manera los valores normalizados representan la contribución relativa de cada pixel dentro de cada servicio ecosistémico, facilitando su interpretación espacial y su integración en evaluaciones conjuntas.

Para la elaboración del mapa “Carbono total” (Figura 23 a) se sumaron las capas normalizadas de almacenamiento y secuestro de carbono, mientras que para la elaboración del mapa de “remoción total” (Figura 23 b) se sumaron las capas temáticas normalizadas de los contaminantes analizados previamente (CO, O₃, NO₂, SO₂, PM₁₀ y PM_{2.5}), dando como resultado la contribución relativa de cada servicio en una escala adimensional comparable.

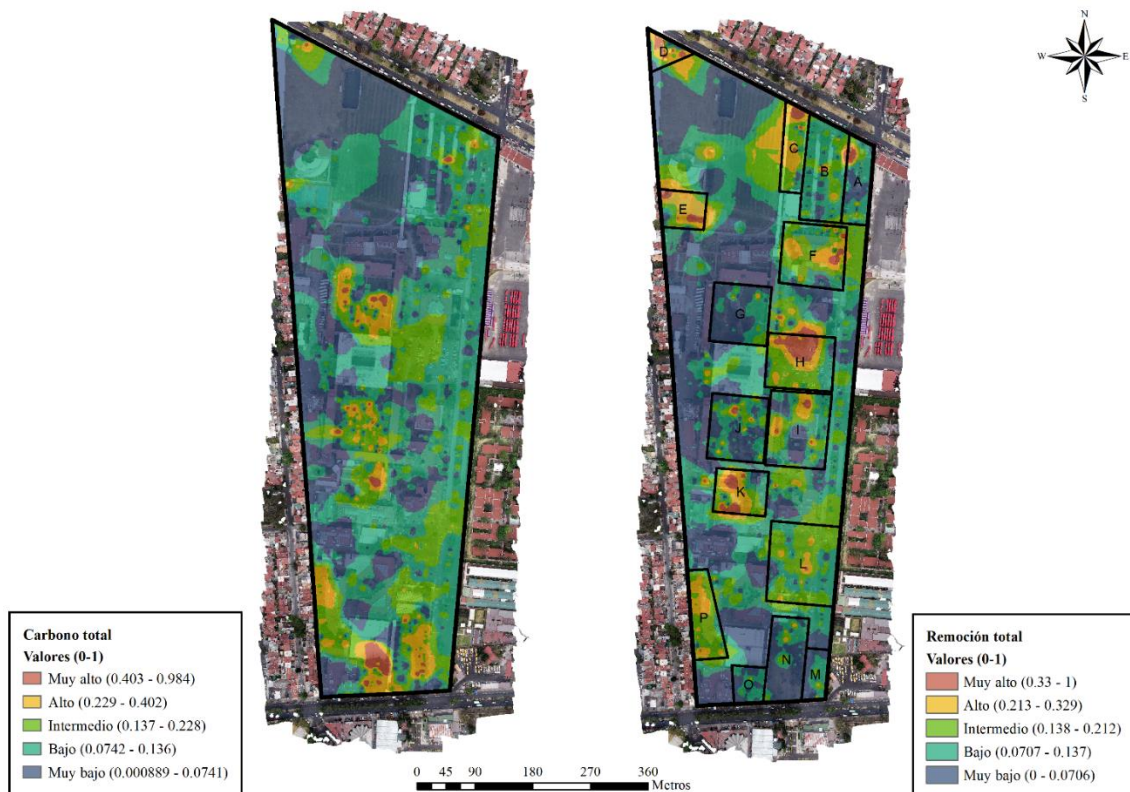


Figura 23. Carbono (a), Remoción de contaminantes (b).

Las zonas con mayor regulación del carbono son los Jardines principales, los bloques G, J, K, y N (Zapata, Edén y Picnic), y las áreas verdes aledañas a edificios académicos de la zona sur, los bloques O y P (edificio N y R). Por otro lado, las zonas con mayor remoción de contaminantes atmosféricos son las áreas verdes aledañas a espacios funcionales de la universidad, los bloques F, H, K y P (biblioteca, comedor, coordinación de cómputo y edificio R), el área deportiva, E y D (jardinería), el estacionamiento sureste, L, y la zona de acceso norte, A, B y C (edificio AP, acceso por bombas).

8.2 Provisión conjunta de servicios ecosistémicos

La Figura 24 presenta las zonas de la UAM-X donde el arbolado ofrece una mayor provisión conjunta de servicios ecosistémicos de regulación (suma de la remoción total de contaminantes y del almacenamiento y secuestro total de carbono).

Las zonas de muy alta provisión se concentran particularmente en la matriz verde que rodea el nodo de coordinación de cómputo (bloque K), así como las áreas verdes adyacentes a los servicios académicos ubicados en los bloques H, F (comedor y biblioteca), O y P (edificios R y N). Otros bloques de importancia en la provisión de servicios se localizan en áreas deportivas, en los bloques E y D (espacio de jardinería) y el corredor y acceso vehicular norte (bloques C y A), correspondiente al acceso por Bombas. Las zonas intermedias se concentran en los jardines principales, los bloques G, J y N (Zapata, Edén, Picnic), y el estacionamiento occidental (bloque L, cercano al servicio médico). Estas zonas son las que en conjunto proveen el mosaico de los servicios ecosistémicos en la UAM-X.

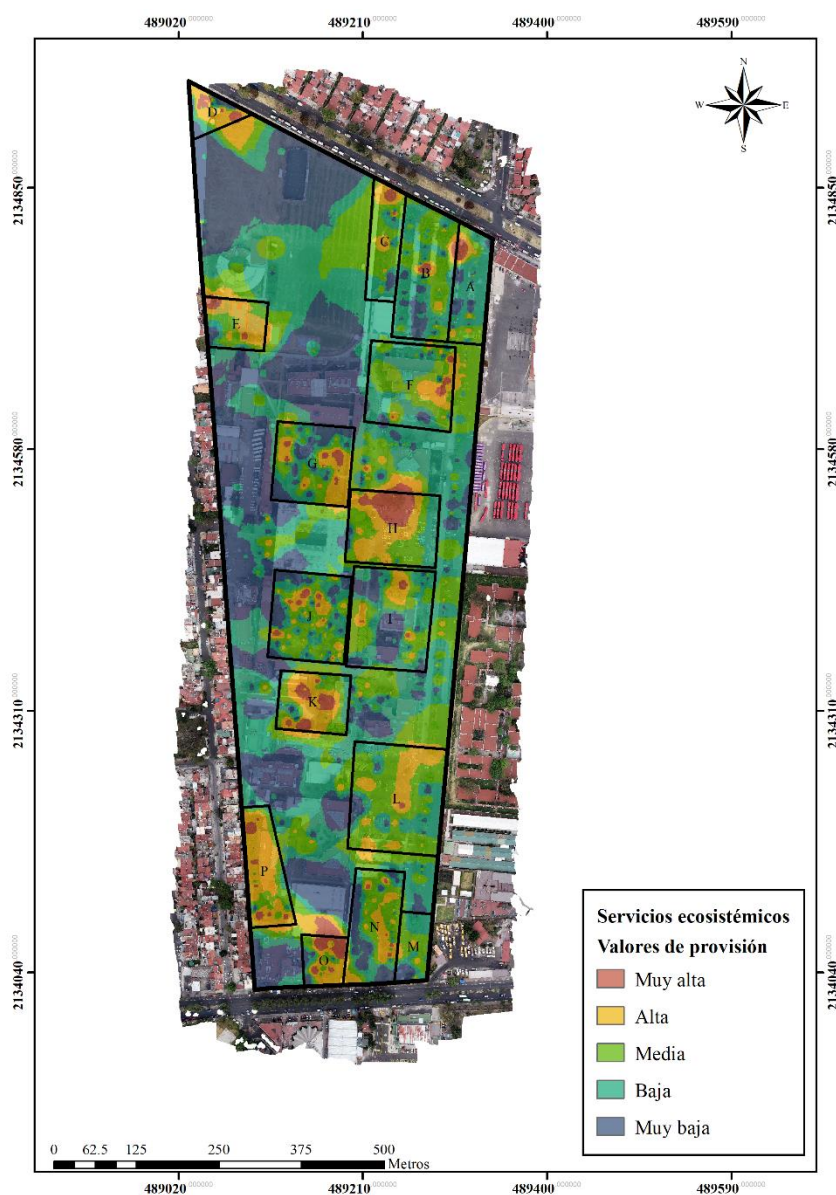


Figura 24. Servicios ecosistémicos de regulación.

8.3 Áreas prioritarias para la regulación del carbono y contaminantes atmosféricos

La figura 25 es el resultado de la resta de las capas temáticas de carbono y remoción totales, dando como resultado un mosaico con las áreas prioritarias para la conservación basado en su capacidad de provisión de servicios de regulación del carbono y contaminantes atmosféricos.

Las zonas donde predominan los valores positivos (Azul y verde) domina el carbono, variable dependiente de la acumulación de biomasa. Estas zonas se caracterizan por tener árboles grandes, zonas verdes maduras, con poca presión contaminante directa y alta densidad de madera, estas zonas funcionan como sumidero de carbono estructural. Por el contrario, en las zonas con valores muy negativos (Rojo y naranja) domina la remoción de contaminantes, variable dependiente del área foliar, conductancia estomática y deposición superficial. Son zonas verdes con mayor densidad de copa, mayor área foliar efectiva y con árboles fisiológicamente más activos que operan como filtros atmosféricos ante la alta presión contaminante de la ciudad.

Los valores cercanos a 0 representan el equilibrio funcional (Amarillo). Estas son zonas que encuentran balance entre regulación climática y calidad del aire. Lo que significa que el arbolado aporta tanto almacenamiento y secuestro de carbono como remoción de contaminantes en magnitudes similares.

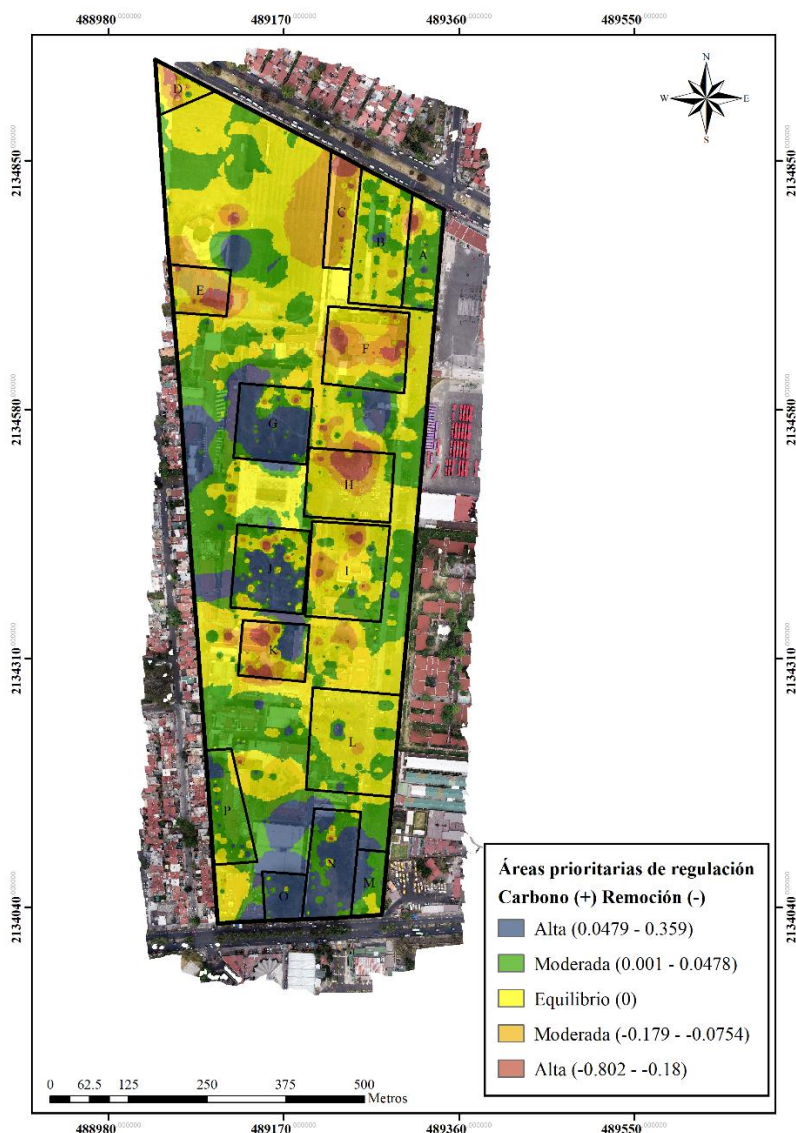


Figura 25. Áreas prioritarias para la regulación del carbono y contaminantes atmosféricos.

8.4 Valor de flujo económico del arbolado

El “valor económico” del almacenamiento y secuestro de carbono se refiere a la traducción en términos monetarios del beneficio que brindan los ecosistemas al capturar, retener y evitar la liberación de carbono a la atmósfera, contribuyendo así a mitigar el calentamiento global y la emisión de gases efecto de invernadero.

El valor económico bruto por secuestro de carbono anual estimado para la Unidad Xochimilco es de \$147,156.64 pesos mexicanos (MEX), mientras que el valor estimado por la remoción de contaminantes anual es de \$42,899.92. En conjunto suman alrededor de \$190,056 pesos anuales por la provisión de servicios ecosistémicos.

Este monto representa el valor económico del servicio un servicio de regulación ecosistémico a partir de los costos o perjuicios que se evitan a la comunidad universitaria gracias a su existencia. El arbolado funciona como un activo ambiental que produce beneficios valorados en \$190,056 pesos anuales. Por tanto, este valor refleja la magnitud de los costos ambientales y de salud pública que se evitan gracias a la provisión de servicios ecosistémicos, y puede ser interpretado como un indicador del capital natural y de la contribución socioambiental de la UAM-X.

Las zonas con mayor valor económico asociado a la provisión conjunta de servicios ecosistémicos de captura de carbono y remoción de contaminantes se localizan en: el entorno de la Coordinación de Cómputo (bloque K); las áreas verdes vinculadas a los servicios académicos en los bloques H, F y P; las áreas deportivas en los bloques E y D; y el corredor y acceso vehicular norte (bloques C y A), correspondiente al acceso por Bombas. La Figura 26 ilustra la distribución espacial de estos valores.

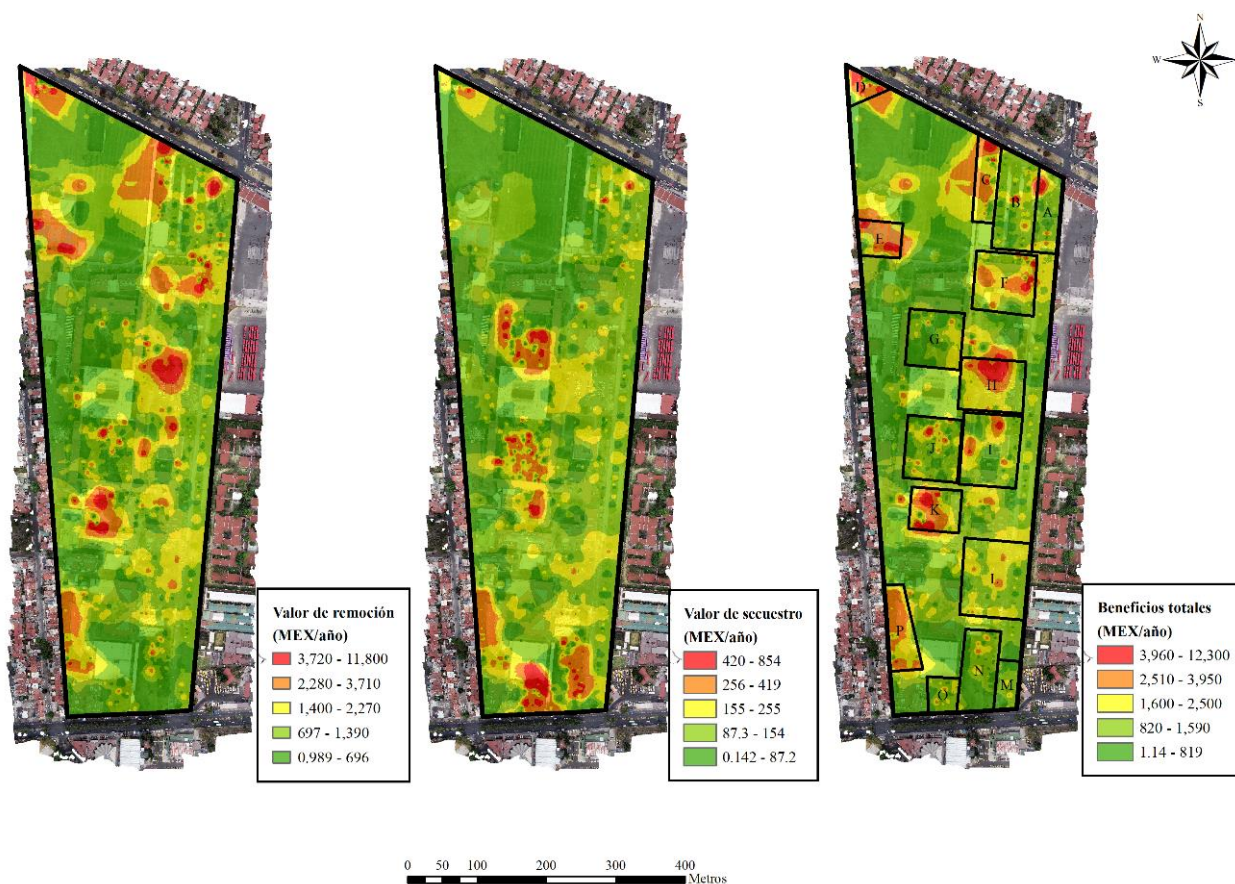


Figura 26. Zonas con mayor valor de almacenamiento y secuestro de carbono.

8.5 Valor de stock económico del arbolado

El valor de sustitución del arbolado estima cuánto costaría económicamente reemplazar un árbol existente por otro que proporcione beneficios equivalentes (Figura 27 a). El valor de sustitución total del arbolado es de \$57'227,534.06 (cincuenta y siete millones doscientos veinte y siete mil pesos de capital natural estimado).

Para el caso específico del almacenamiento de carbono, el valor económico total estimado fue de \$4,217,011 pesos, de acuerdo con los precios establecidos en los mercados internacionales de carbono. Este monto corresponde al costo social del carbono evitado, es decir, al valor de los daños que se habrían generado si dicho carbono estuviera presente en la atmósfera.

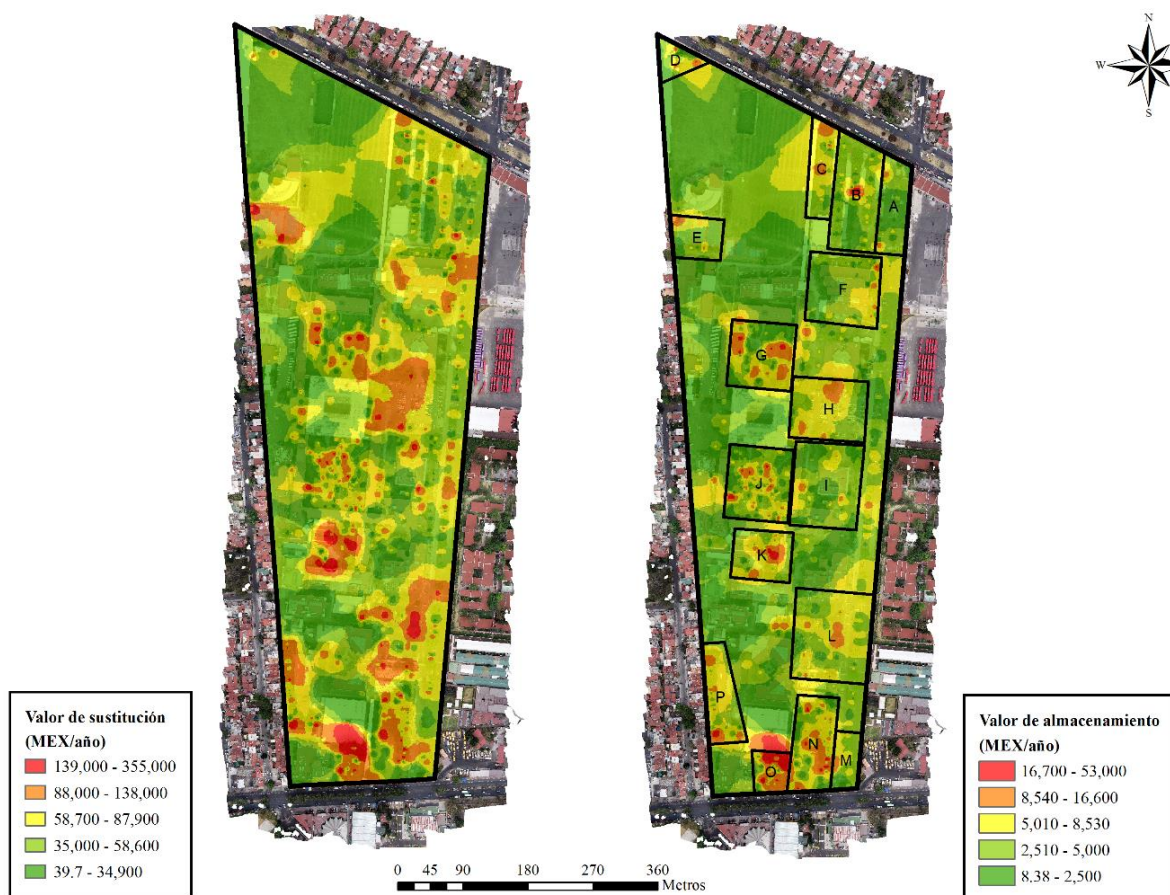


Figura 27. Zonas con mayor valor de almacenamiento y secuestro de carbono.

En la tabla 3 se presenta el valor de sustitución por especie para toda la composición del arbolado de la Unidad Xochimilco. Las cinco especies con mayor valor económico por la provisión de servicios ecosistémicos de regulación son *Casuarina equisetifolia* (casuarina), *Fraxinus uhdei* (fresno), *Jacaranda mimosifolia* (jacaranda), *Ficus benjamina* (laurel llorón) y *Taxodium mucronatum* (ahuehuete).

Tabla 3. Valor de sustitución por especie

Especie	(Mex\$)	No. Árboles
<i>Casuarina equisetifolia</i>	\$13,800,838.92	131
<i>Fraxinus uhdei</i>	\$11,290,135.57	198
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	\$11,141,315.09	150
<i>Ficus benjamina</i>	\$4,274,716.11	87
<i>Taxodium mucronatum</i>	\$3,093,872.91	37
<i>Hesperocyparis lusitanica</i>	\$2,696,301.91	47
<i>Salix bonplandiana</i>	\$2,216,708.85	52
<i>Ligustrum lucidum</i>	\$1,276,795.57	50
<i>Phoenix canariensis</i>	\$1,272,685.62	13
<i>Schinus molle</i>	\$906,754.59	11
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	\$851,130.90	13
<i>Cupressus sempervirens</i>	\$841,188.59	59
<i>Melaleuca citrina</i>	\$541,215.51	24
<i>Juglans cinerea</i>	\$369,264.08	6
<i>Salix babylonica</i>	\$265,105.64	7
<i>Acer negundo</i>	\$248,385.80	8
<i>Acacia retinodes</i>	\$174,866.45	8
<i>Bauhinia variegata</i>	\$159,465.28	3
<i>Platycladus orientalis</i>	\$152,602.60	22
<i>Ficus microcarpa</i>	\$151,131.11	6
<i>Populus alba</i>	\$132,609.51	5
<i>Ficus elastica</i>	\$127,077.42	1
<i>Pinus greggii</i>	\$121,284.79	2
<i>Araucaria heterophylla</i>	\$101,754.33	4
<i>Pinus cembroides</i>	\$87,720.70	3
<i>Eriobotrya japonica</i>	\$83,860.07	8
<i>Heptapleurum actinophyllum</i>	\$73,133.22	3
<i>Buddleja cordata</i>	\$72,632.42	2
<i>Prunus domestica</i>	\$66,662.03	13
<i>Crataegus mexicana</i>	\$62,808.09	4
<i>Persea americana</i>	\$54,241.86	3
<i>Morus alba</i>	\$49,831.98	1
<i>Ceiba speciosa</i>	\$45,741.01	1
<i>Yucca gigantea</i>	\$45,533.17	3
<i>Casimiroa edulis</i>	\$37,042.67	2
<i>Prunus persica</i>	\$35,034.08	8
<i>Psidium guajava</i>	\$33,112.39	5
<i>Citrus limon</i>	\$32,528.53	8
<i>Annona cherimola</i>	\$23,980.42	1
<i>Magnolia grandiflora</i>	\$22,336.60	2
<i>Hibiscus rosa-sinensis</i>	\$20,038.92	2
<i>Talipariti tiliaceum</i>	\$19,495.66	1
<i>Washingtonia robusta</i>	\$19,495.66	1

Especie	(Mex\$)	No. Árboles
<i>Citrus sinensis</i>	\$19,364.36	4
<i>Malus domestica</i>	\$18,410.62	3
<i>Grevillea robusta</i>	\$17,856.77	1
<i>Schinus terebinthifolius</i>	\$12,553.58	1
<i>Ficus carica</i>	\$12,352.02	3
<i>Cydonia oblonga</i>	\$7,972.49	2
<i>Prunus cerasifera</i>	\$7,337.69	4
<i>Platanus mexicana</i>	\$5,661.62	1
<i>Crescentia alata</i>	\$4,559.20	1
<i>Olea europaea</i>	\$3,637.66	2
<i>Citrus x latifolia</i>	\$3,520.61	1
<i>Acca sellowiana</i>	\$2,908.52	1
<i>Macadamia integrifolia</i>	\$2,892.19	1
<i>Syzygium paniculatum</i>	\$1,380.52	1
<i>Dimocarpus longan</i>	\$663.18	1
58	\$57'213,508	1042

9. Lista de sustitución de especies

La lista de sustitución de especies (Tabla 4) contiene especies adaptadas a las condiciones climáticas y sociales de la UAM-X, que pueden ser introducidas gradual y estratégicamente para sostener la provisión de servicios ecosistémicos al mismo tiempo que se favorece a la fauna local.

Tabla 4. Lista de especies de sustitución

Especie	Nombre común	Virtudes ecológicas / funcionales	Posible sustitución
<i>Quercus rugosa</i>	Encino quiebrahachas	Árbol estructural; alta biodiversidad asociada (insectos, aves); sombra y longevidad	Casuarina, eucalipto, laurel de la india
<i>Quercus laurina</i>	Encino laurelillo	Árbol estructural; importante para fauna; buena cobertura de copa	Casuarina, ficus benjamina, jacaranda
<i>Quercus crassipes</i>	Encino negro	Tolera suelos urbanos; gran productor de hojarasca que mejora suelo	Casuarina, eucalipto
<i>Alnus jorullensis</i>	Aliso mexicano	Fijador de nitrógeno; mejora suelos degradados; crecimiento rápido; útil cerca de zonas húmedas	Casuarina, Populus alba
<i>Crataegus mexicana</i>	Tejocote	Árbol pequeño/mediano; frutos para aves; tolera poda; ornamental y funcional	Prunus cerasifera, Malus domestica
<i>Arbutus xalapensis</i>	Madroño	Alta tolerancia a sequía; corteza ornamental; frutos para aves; adaptación a suelos pobres	Escobillón, Trueno chino
<i>Prunus serotina</i>	Cerezo criollo	Árbol mediano; frutos para fauna; crecimiento rápido; sustituto de frutales ornamentales	Ciruelo
<i>Buddleja cordata</i>	Tepozán	Especie pionera; coloniza suelos degradados; flores para polinizadores; crecimiento rápido	Trueno chino, Morus alba (moral blanco)
<i>Eysenhardtia polystachya</i>	Palo dulce	Fijador de nitrógeno; tolera sequía; tamaño medio adecuado para camellones	Trueno chino, Arce negundo
<i>Erythrina americana</i>	Colorín	Excelente para colibríes y polinizadores; crecimiento rápido; valor ornamental alto	Jacaranda, Tulipan chino
<i>Ipomoea arborescens</i>	Casahuate	Árbol pequeño; floración abundante; útil para polinizadores; tolera sequía	Escobillón, Trueno chino

10. Conclusiones

La composición de especies arbóreas de la UAM-X es relativamente diversa (58 especies); sin embargo, está dominada por especies exóticas, tanto en riqueza como en abundancia. Esta dominancia puede comprometer la estabilidad ecológica del arbolado urbano al favorecer la propagación de plagas y enfermedades, lo que potencialmente incrementa los costos de manejo e intervención. Por otra parte, la estructura del arbolado está dominada por individuos con diámetros bajos e intermedios, lo que refleja poblaciones relativamente homogéneas y una baja proporción de individuos longevos.

El 80 % del arbolado de la UAM-X se encuentra en buena condición general de salud; no obstante, más de la mitad de los individuos requiere algún tipo de tratamiento fitosanitario. El análisis fitosanitario sugiere que el daño mecánico provocado por podas inadecuadas reduce la capacidad de los árboles para defenderse de manera natural contra plagas y patógenos, favoreciendo la aparición de organismos oportunistas que deterioran progresivamente su estado sanitario. Asimismo, la alta presencia de muérdagos de los géneros *Struthanthus* y *Cladocolea* representa un riesgo fitosanitario importante, no solo para la UAM-X, sino también para otras áreas verdes de la Ciudad de México, debido a que puede generar pérdidas estructurales en el arbolado, reducir la provisión de servicios ecosistémicos y aumentar los costos asociados al saneamiento.

Los pocos individuos longevos y de gran tamaño presentes en la unidad son los que sostienen en mayor medida el almacenamiento y la regulación de carbono, concentrándose principalmente en zonas consolidadas con alta densidad arbórea. Sin embargo, una proporción importante de estos individuos corresponde a especies exóticas, como *Casuarina equisetifolia* (casuarina), las cuales pueden generar efectos indeseables en el ecosistema urbano, como la acidificación del suelo y una menor provisión de hábitat para la biodiversidad local.

La remoción de contaminantes atmosféricos es uno de los servicios ecosistémicos más relevantes proporcionados por el arbolado de la UAM-X; no obstante, los resultados sugieren la existencia de un equilibrio funcional entre los distintos servicios evaluados. Esta capacidad está estrechamente relacionada con la cobertura arbórea, la cual depende tanto del estado fitosanitario como de las necesidades operativas del espacio universitario. Por ejemplo, las intervenciones de poda pueden responder a requerimientos de seguridad, como la prevención de la caída de ramas en zonas de tránsito estudiantil.

En este contexto, la planificación estratégica de las áreas verdes debería orientarse a conciliar las necesidades operativas del campus con la maximización de los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado. Especies nativas como *Taxodium mucronatum* (ahuehuete), aunque representadas por pocos individuos en la universidad, concentran una proporción significativa de los servicios ecosistémicos, tanto en la regulación del carbono como en la remoción de contaminantes. Esto evidencia la alta capacidad de provisión de las especies nativas y su potencial beneficio en espacios urbanos.

Actualmente, la UAM-X no cuenta con una planificación estratégica clara para la selección e incorporación de especies arbóreas. En este sentido, orientar dicha planificación hacia la selección de especies nativas, la prevención de plagas y enfermedades, y la optimización de los servicios ecosistémicos podría traducirse en una mejora integral de los beneficios derivados del arbolado urbano.

En conjunto, los resultados evidencian que el arbolado de la UAM-X posee un potencial significativo para la provisión de servicios ecosistémicos urbanos; sin embargo, su sostenibilidad a largo plazo depende de mejorar la planificación en la selección de especies, fortalecer las prácticas de manejo fitosanitario y promover una estructura poblacional más diversa en términos de edades y tamaños.

11. Recomendaciones

- 1) Se recomienda realizar estudios que profundicen en el estado fitosanitario del arbolado de la UAM-X, con el fin de identificar con mayor precisión las plagas y enfermedades presentes en las áreas verdes de la unidad, así como de desarrollar estrategias de manejo y tratamientos especializados que contribuyan a mejorar la salud del arbolado.
- 2) Se recomienda desarrollar una planificación estratégica para la selección de especies y la configuración espacial del arbolado, considerando tanto los requerimientos fitosanitarios como la provisión de servicios ecosistémicos en el campus de la UAM-X.
- 3) Se sugiere establecer mecanismos de coordinación entre las distintas dependencias involucradas en la gestión del arbolado, incluyendo la academia (laboratorios y especialistas), la gestión ambiental institucional y el personal de jardinería encargado del trabajo de campo.
- 4) La UAM-X cuenta con profesionales especializados en gestión ambiental, taxonomía y sistemática vegetal, así como con instancias administrativas dedicadas a la gestión ambiental. No obstante, estos recursos institucionales no siempre se articulan de manera efectiva con la toma de decisiones sobre el manejo del arbolado y las áreas verdes del campus.
- 5) Se recomienda fortalecer las capacidades operativas del personal de jardinería mediante la adquisición de equipo especializado que permita realizar labores de manejo y mantenimiento del arbolado de manera segura y eficiente.
- 6) Se recomienda orientar la gestión del arbolado hacia la consolidación de individuos longevos y estructuralmente estables, priorizando la planificación a largo plazo sobre el incremento indiscriminado del número de árboles. En este sentido, se sugiere promover la sustitución gradual y estratégica de especies exóticas por especies nativas que se adapten mejor a las condiciones ecológicas locales y que permitan mantener o mejorar la provisión de servicios ecosistémicos.

12. Bibliografía

- Acuña-Simbaqueva, L. M., Andrade, H. J., Segura, M. A., Sierra-Ramírez, E., Canal-Daza, D. S., & Greñas-Corrales, O. E. (2021). Mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero de hogares por arbolado urbano en Ibagué, Colombia. *Ambiente & Sociedade*, 24, e01911.
- Angiosperm Phylogeny Group. (2016). An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181(1), 1–20. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>
- Baldocchi, D. D., Hicks, B. B., & Camara, P. (1987). A canopy stomatal resistance model for gaseous deposition to vegetated surfaces. *Atmospheric Environment*, 21, 91–101.
- Benjamin, M. T., & Winer, A. M. (1998). Estimating the ozone-forming potential of urban trees and shrubs. *Atmospheric Environment*, 32(1), 53–68.
- Bonilla-Duarte, S., Díaz, G., Cortés, L., & Jáuregui-Haza, U. (2021). *El arbolado en ciudades y la protección de los recursos hídricos: Preguntas y respuestas*.
- Burkhard, B., Maes, J., Potschin-Young, M., Santos-Martín, F., Geneletti, D., Stoev, P., & Zulian, G. (2018). Mapping and assessing ecosystem services in the EU: Lessons learned from the ESMERALDA approach of integration. *One Ecosystem*, 3.
- Cairns, M. A., Brown, S., Helmer, E. H., & Baumgardner, G. A. (1997). Root biomass allocation in the world's upland forests. *Oecologia*, 111, 1–11.
- Calderón Guerrero, C., & Saiz de Omeñaca, G. (2009). Contribución del arbolado urbano y periurbano del municipio de Madrid en la mejora de la calidad del aire y sumidero de contaminantes atmosféricos como beneficio para la sociedad. En *Congresos Forestales*.
- Caro-Caro, C. I., & Torres-Mora, M. A. (2015). Servicios ecosistémicos como soporte para la gestión de sistemas socioecológicos: Aplicación en agroecosistemas. *Orinoquia*, 19(2), 237–252. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-37092015000200011
- Caudillo, C., & Coronel, C. (2017). *Densidad de kernel*. Centro de Investigación en Geografía y Geomática (CentroGeo). <http://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1012/168>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. (2021). *Valoración de servicios ecosistémicos en áreas naturales protegidas federales de México*. CONANP.
- Costanza, R., d'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., & van den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253–260.
- Criollo, C., Assar, R., Cáceres, D., & Préndez, M. (2016). Arbolado urbano, calidad del aire y afecciones respiratorias en seis comunas de la provincia de Santiago, Chile. *Revista Chilena de Enfermedades Respiratorias*, 32(2), 77–86. <https://doi.org/10.4067/S0717-73482016000200003>
- Daily, G. C. (1997). Introduction: What are ecosystem services? En G. C. Daily (Ed.), *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* (pp. 1–10). Island Press.
- David J. Nowak. (1994). Understanding the structure of urban forests. *Journal of Forestry*, 92(10), 42–46.

- De Groot, R. S., Wilson, M. A., & Boumans, R. M. (2002). A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services. *Ecological Economics*, 41(3), 393–408.
- Ehrlich, P. R., & Mooney, H. A. (1983). Extinction, substitution, and ecosystem services. *BioScience*, 33(4), 248–254.
- Ferraro, D., Piñeiro, G., Laterra, P., Nogués, A., & Prada, J. D. D. (2011). *Aproximaciones y herramientas para la evaluación de servicios ecosistémicos* (Tesis doctoral). Universidad Nacional de Río Cuarto.
- Flores-Ulloa, M. A., Rocha-Estrada, A., Salcedo-Martínez, S. M., Zubieta-Méndez, F., & Alvarado-Vázquez, M. A. (2024). Estimación de los servicios ecosistémicos que ofrece un bosque urbano en la zona metropolitana de Monterrey. *Revista Planta*, 17(29).
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2016). *Building greener cities: Nine benefits of urban trees*. <http://www.fao.org/zhc/detail-events/en/c/454543/>
- Freeman, S. (2009). *Biología*. Pearson Educación.
- González-Hernández, A., Magaña Alejandro, M. A., & Sol Sánchez, Á. (2018). Servicios ecosistémicos brindados por *Tabebuia rosea* (Bertol.) DC. en Centro, Tabasco, México. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 4(7), 834–848.
- González-Hernández, L., Romo-Lozano, J. L., Cristóbal-Acevedo, D., Martínez-Damián, 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).
- Haines-Young, R., & Potschin, M. (2018). *Common international classification of ecosystem services (CICES) V5.1: Guidance on the application of the revised structure*. Fabis Consulting. <https://cices.eu>
- Hernández-Castán, J., Cuesta-Mejía, E., Ortiz-Espejel, B., & Rosano-Reyes, E. (2023). Servicios ecosistémicos del arbolado urbano en la Laguna de San Baltazar, Puebla, mediante el uso del software i-Tree. *Ciencia Ergo Sum*, 30(2), e198. <https://doi.org/10.30878/ces.v30n2a5>
- Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. (2019). *Global assessment report on biodiversity and ecosystem services: Summary for policymakers*. <https://ipbes.net>
- Maarten J. M. Christenhusz, Reveal, J. L., Farjon, A., Gardner, M. F., Mill, R. R., & Chase, M. W. (2011). A new classification and linear sequence of extant gymnosperms. *Phytotaxa*, 19(1), 55–70. <https://doi.org/10.11646/phytotaxa.19.1.3>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2003). *Ecosystems and human well-being: A framework for assessment*. Island Press.
- Nowak, D. J. (1996). Estimating leaf area and leaf biomass of open-grown deciduous urban trees. *Forest Science*, 42(4), 504–507.
- Nowak, D. J. (2020). *Understanding i-Tree: Summary of programs and methods*. USDA Forest Service.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., Stevens, J. C., Hoehn, R. E., Walton, J. T., & Bond, J. (2008). A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Urban Forestry & Urban Greening*, 34(6), 347–358.

Plants of the World Online. (2024). Royal Botanic Gardens, Kew. <https://powo.science.kew.org/>

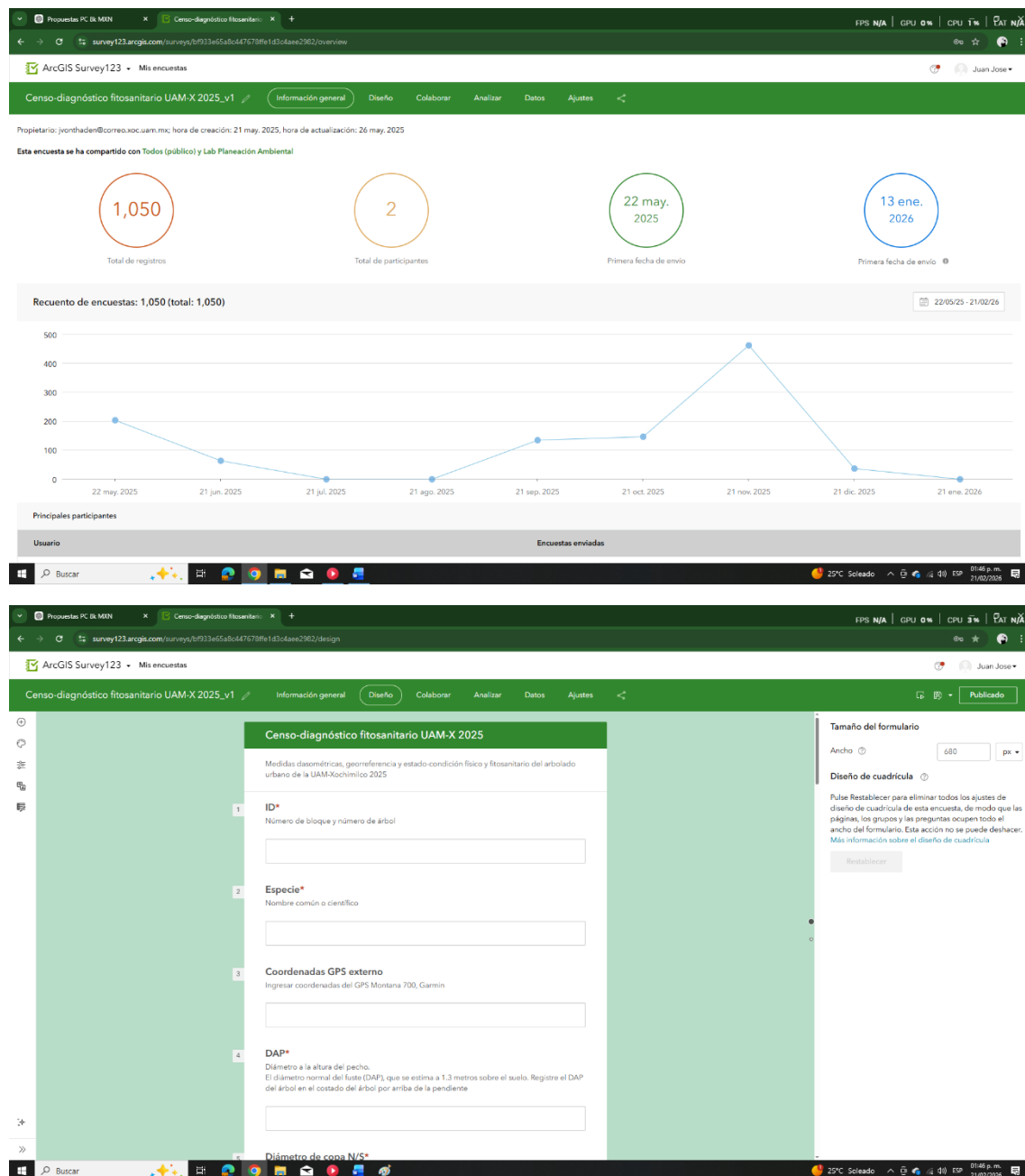
Rachel Carson. (2009). *Silent spring*. Houghton Mifflin Harcourt.

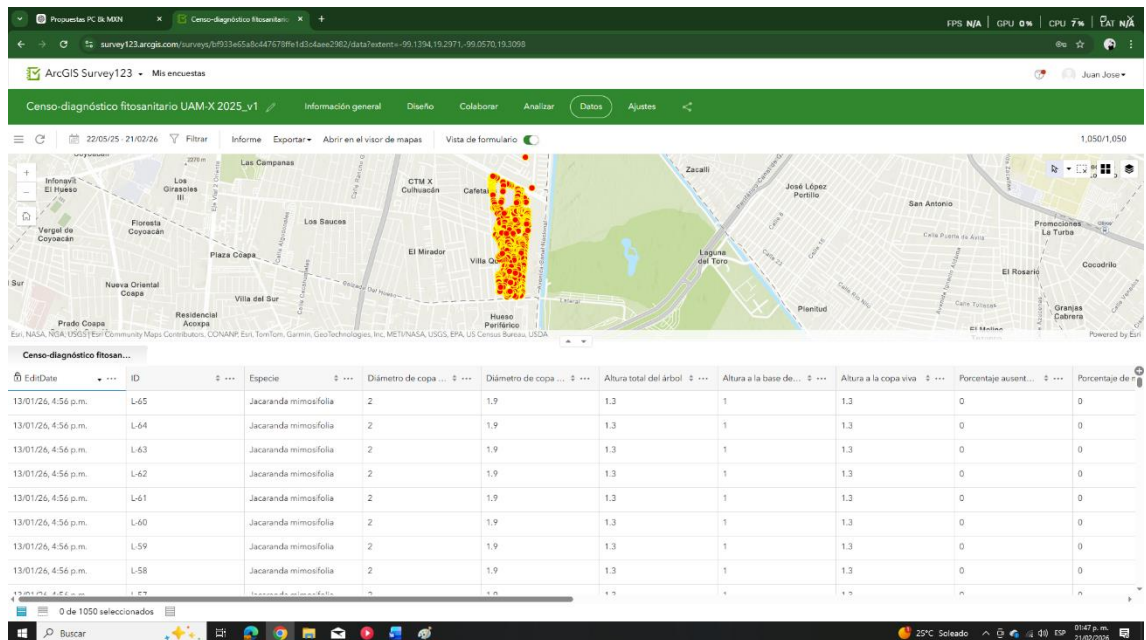
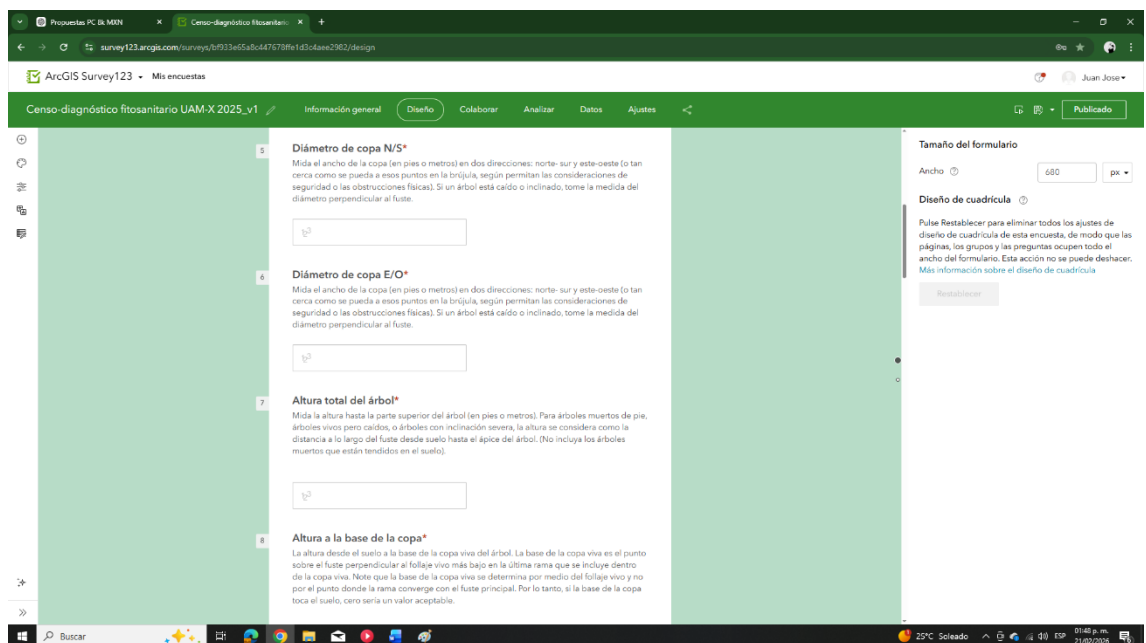
United States Department of Agriculture Forest Service. (2018). *i-Tree Eco field manual*. <https://www.itreetools.org/documents/274/EcoV6.FieldManual.2021.10.06.pdf>

World Flora Online Consortium. (2024). *World Flora Online*. <https://www.worldfloraonline.org/>

ANEXO

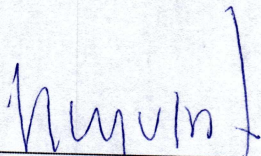
Evidencias de colecta de datos en aplicación Survery 123. La encuesta se encuentra actualmente pública y es posible acceder a ella desde una cuenta en la aplicación.





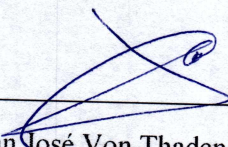
Visto Bueno de los asesores del Informe Final de servicio social titulado "Contribución ecosistémica del arbolado urbano en la mitigación del carbono y la calidad del aire".

Visto bueno:



Mtro. Gilberto Sven Binnquist Cervantes

No. Económico. 20032



Dr. Juan José Von Thaden Ugalde

No. Económico. 45613
