

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERIA DE MONTES, FORESTAL Y DEL MEDIO
NATURAL
TRABAJO FIN DE MASTER



**Estudio y valoración de los servicios
ecosistémicos del arbolado urbano de San
Agustín del Guadalix (Comunidad de Madrid)**

2023

Autor:

Alejandro Manzano Rodríguez

Director/es – Tutor:

Susana Domínguez Lerena

Esperanza Ayuga Téllez

Estudio y valoración de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de San Agustín del Guadalix (Comunidad de Madrid)

Autor:

Alejandro Manzano Rodríguez

Fdo. _____

V° B° de los Directores:

D. Susana Domínguez Lerena

Fdo. _____

D. Esperanza Ayuga Téllez

Fdo. _____

DEPARTAMENTO: Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental y Forestal (IGFA)

2023

©UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID, AÑO 2023, TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE MÁSTER

MIEMBROS DEL TRIBUNAL

PRESIDENTE: _____

VOCAL: _____

SECRETARIO: _____

Reunido el Tribunal de calificación con fecha _____ acuerda otorgar al alumno la CALIFICACIÓN GLOBAL de _____

Presidente

Vocal

Secretario

Fdo: _____

Fdo: _____

Fdo: _____

RESUMEN

Estudio y valoración de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de San Agustín del Guadalix (Comunidad de Madrid)

Autor: Alejandro Manzano Rodríguez

Directores: Susana Domínguez Lerena y Esperanza Ayuga Téllez

Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental y Forestal (IGFA)

El presente proyecto describe y desarrolla el proceso con el que se ha llevado a cabo el estudio y cuantificación de los servicios ecosistémicos generados por el arbolado urbano de San Agustín del Guadalix.

El principal objetivo es realizar una puesta en valor de la importancia del arbolado en la ciudad, pues durante el siglo XX se produjo un crecimiento masivo de San Agustín del Guadalix donde el arbolado perdió relevancia en favor de elementos artificiales como pavimentos, aceras o edificios. La deforestación urbana ha generado numerosos problemas relacionados con la pérdida de bienestar humano (aumento de contaminación, de temperaturas o de gases de efecto invernadero) Este estudio pretende sentar las bases de una potente herramienta de gestión del arbolado, con la que afrontar los nuevos retos globales relacionados con la sostenibilidad y resiliencia de las ciudades, un futuro en el que los árboles deben ser protagonistas.

En primer lugar, se ha realizado un inventario pie a pie sobre el arbolado municipal de San Agustín de Guadalix (3501 ejemplares), lo que ha permitido su caracterización completa y la medición de diferentes atributos necesarios para el cálculo de servicios ecosistémicos.

A partir de los datos de inventario, se ha utilizado el software i-Tree Eco para la valoración cuantitativa de los servicios ecosistémicos generados por el arbolado. Algunos de los resultados obtenidos: el arbolado elimina 492,33 kg/año de partículas contaminantes y secuestra 24,73 toneladas de carbono al año.

Además del valor numérico propio de los resultados obtenidos, el cruce de información entre el trabajo de inventario y la cuantificación realizada, ha permitido comprobar como los árboles sanos y con copas voluminosas generan unos beneficios ambientales muy superiores. Se pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo una buena planificación y mantenimiento del arbolado, limitando prácticas como el terciado, para maximizar los servicios generados.

ABSTRACT

Study and evaluation of the ecosystem services of the urban forest of San Agustín del Guadalix (Community of Madrid)

Author: Alejandro Manzano Rodríguez

Directors: Susana Domínguez Lerena y Esperanza Ayuga Téllez

Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental y Forestal (IGFA)

This project describes and develops the process through which the study and quantification of ecosystem services generated by the urban tree canopy of San Agustín del Guadalix have been carried out.

The main objective is to highlight the importance of urban trees in the city because during the 20th century, San Agustín del Guadalix experienced massive growth in which urban trees lost significance in favor of artificial elements such as pavements, sidewalks, or buildings. Urban deforestation has resulted in numerous problems related to the loss of human well-being, including increased pollution, higher temperatures, and higher greenhouse gas emissions. This study aims to lay the foundation for a powerful tree management tool to address the new global challenges related to the sustainability and resilience of cities, where trees must play a central role.

Firstly, a comprehensive inventory of the trees in San Agustín de Guadalix was conducted, covering 3,501 specimens. This allowed for a complete characterization of the trees and the measurement of various attributes necessary for calculating ecosystem services.

Based on the inventory data, the i-Tree Eco software was used for the quantitative assessment of ecosystem services generated by the urban tree canopy. Some of the results obtained include: the trees remove 492.33 kg/year of pollutant particles and sequester 24.73 tons of carbon annually.

In addition to the numerical value of the results, the cross-referencing of information between the inventory work and the quantification carried out has shown that healthy trees with voluminous canopies generate significantly greater environmental benefits. This underscores the need for proper planning and maintenance of the urban tree canopy, while discouraging practices such as heavy pruning in order to maximize the services generated.

Agradecimientos

Durante el periodo de tiempo que me ha llevado realizar este estudio, he recibido diferentes apoyos, sin los cuales no hubiera sido posible completar este Trabajo de Fin de Máster.

Me gustaría destacar la labor de Susana Domínguez Lerena, directora del trabajo y propietaria de la empresa SDL. Desde SDL, empresa para la que trabajo, y bajo la dirección de Susana surgió la idea y posibilidad de llevar a cabo el presente estudio para el municipio de San Agustín del Guadalix.

La colaboración de Susana, así como del resto de integrantes de SDL ha sido indispensable para la consecución del estudio, ya fuera aportándome las herramientas necesarias o intercambiando impresiones acerca de los resultados que se iban obteniendo. Mi más sincero agradecimiento por su implicación y preocupación en estos meses.

También quería mostrar mi gratitud a Esperanza Ayuga Téllez, tutora del trabajo, siendo su ayuda y disposición fundamental para poder completar el estudio en tiempo y forma.

Finalmente me gustaría darle las gracias a mi familia y amigos por su apoyo durante el tiempo que me ha llevado elaborar el Trabajo de Fin de Máster.

INDICE

MEMORIA

Índice de figuras	10
Índice de tablas	12
1. INTRODUCCIÓN.....	13
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA – PÉRDIDA DE LA IMPORTANCIA DEL ARBOLADO EN CIUDADES.....	13
1.2. OBJETIVOS.....	17
1.3. ZONA DE ESTUDIO – SAN AGUSTÍN DEL GUADALIX.....	18
2. CONCEPTO DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	21
2.1. DEFINICIÓN.....	21
2.2. TIPOLOGÍAS.....	21
3. MATERIAL Y MÉTODOS	24
3.1. INVENTARIO PREVIO	24
3.1.1. Variables medidas y recogidas	24
3.2. HERRAMIENTA I-TREE ECO.....	28
3.2.1. Parámetros calculados	30
3.2.2. Recopilación de datos específicos para la valoración de SE	32
4. RESULTADOS OBTENIDOS	34
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL BOSQUE URBANO DE SAN AGUSTÍN DEL GUADALIX.....	34
4.1.1. Especies y distribución del arbolado	35
4.1.2. Características dendrométricas.....	37
4.1.2.1. Categoría Diamétrica.....	37
4.1.2.2. Altura.....	38
4.1.2.3. Diámetro de copa.....	39
4.1.3. Anomalías estructurales e incidencia de los terciados	39
4.1.4. Resumen y aspectos destacados del bosque urbano de San Agustín del Guadalix	42
4.2. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SOFTWARE I-TREE ECO)	43
4.2.1. Eliminación de contaminantes	43
4.2.2. Almacenamiento y secuestro de carbono.....	45
4.2.3. Producción de oxígeno	47
4.2.4. Valores estructurales y funcionales	49
4.2.5. Valor de importancia (I.V – “Importance Value”)	50
4.2.6. Aplicación divulgativa y consultiva de los servicios ecosistémicos	51

5.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	52
5.1.	IMPORTANCIA DEL ÁREA FOLIAR	52
5.2.	IMPORTANCIA DE LOS ÁRBOLES GRANDES EN LA GENERACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS	55
5.3.	EQUIVALENCIAS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN RELACIÓN A LAS EMISIONES DE VEHÍCULOS Y VIVIENDAS.	58
6.	CONCLUSIONES	59
6.1.	LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA GESTIÓN DEL BOSQUE URBANOS.....	60
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	64
8.	ANEXOS	65
8.1.	ANEXO I - Resumen beneficios por especie	65

INFORME

1.	Condiciones técnicas y específicas del estudio.	71
2.	Fases para la realización del estudio.....	72
3.	Descripción de tareas e identificación de las que ha hecho el alumno.	74
4.	Cronograma.....	76
5.	Coste del estudio.....	77

PÓSTER

MEMORIA

Índice de figuras

Figura 1. Representación gráfica del desequilibrio existente en las ciudades durante el desarrollo industrial del siglo XX.	14
Figura 2. Situación de San Agustín del Guadalix, respecto a la ciudad de Madrid.	19
Figura 3. Ubicación y extensión del núcleo urbano de San Agustín del Guadalix.....	19
Figura 4. Comparativa entre fotografía aérea “Vuelo Americano Serie B Año 56-57” y fotografía aérea de 2017. Se observa el crecimiento de la ciudad, aumentado las superficies impermeables propias del entorno urbano.	20
Figura 5. Información que se recopila (izquierda) y valoraciones que saca el programa i-Tree Eco (derecha).....	29
Figura 6. Valores ecosistémicos que puede cuantificar la herramienta i-Tree Eco.	30
Figura 7. Ejemplos de estimación de la variable “copa desaparecida”.....	33
Figura 8. Ejemplos de estimación de la variable “muerte regresiva”.	33
Figura 9. Captura de la aplicación SIG donde aparece reflejado el bosque urbano de San Agustín del Guadalix.....	34
Figura 10. Ejemplo de fichas individualizadas de cada uno de los ejemplares que forman parte del inventario de arbolado.	35
Figura 11. Distribución homogénea del arbolado en líneas generales. En naranja zona centro con escasez de arbolado; en verde determinadas áreas con densidad excesiva.	36
Figura 12. Porcentaje de árboles por especie del inventario de San Agustín del Guadalix.	36
Figura 13. Nº de ejemplares clasificados según rangos de diámetro (cm)	38
Figura 14. Nº de ejemplares clasificados según rangos de altura (m)	38
Figura 15. Nº de ejemplares clasificados según rangos de diámetro de copa (m)	39
Figura 16. Porcentaje de árboles terciados en el inventario de San Agustín del Guadalix.....	40
Figura 17. Porcentaje de especies terciadas.	40
Figura 18. Fotografía de ejemplar de plátano terciado ubicado en el parque Príncipe Felipe. Se observa una estructura totalmente alterada, donde se generan ramas mal insertadas que a medida que aumenten de tamaño pueden representar riesgos ante fallos estructurales (anclajes débiles derivados del terciado señalizados en rojo)	41
Figura 19. Eliminación de partículas contaminantes (g/año – eje derecho) y valor asociado de la eliminación (€/año – eje izquierdo)	43
Figura 20. Eliminación de partículas contaminantes (kg) a lo largo de un año.	44
Figura 21. Almacenamiento de carbono de las especies más representativas.	45
Figura 22. Secuestro de carbono de las especies más representativas.	46
Figura 23. Aplicación SIG que permite visionar los servicios ecosistémicos de cada uno de los árboles.....	51
Figura 24. Ejemplos de moreras bajo terciados continuos que condicionan su estructura. Resultado: árboles con troncos gruesos que almacenan gran cantidad de carbono, pero copas pequeñas que limitan el aporte de servicios ecosistémicos asociados al área foliar.	54
Figura 25. Comparativa entre ejemplares de <i>Platanus x hispanica</i> . Izquierda: ejemplar terciado sobre el que se observa una estructura comprometida y una gran limitación en el desarrollo de su copa, y por ende de los servicios ecosistémicos generados; derecha: ejemplar sin terciar que goza de una estructura natural totalmente cohesionado, donde se podrá maximizar el desarrollo de la copa y de los servicios ecosistémicos proporcionados.	57

Figura 26. Comparativa entre ejemplares de Morus alba. Izquierda: ejemplar terciado sobre el que se observa una estructura comprometida y una gran limitación en el desarrollo de su copa, y por ende de los servicios ecosistémicos generados; derecha: ejemplar sin terciar que goza de una estructura natural totalmente cohesionado, a pesar de ser un ejemplar más joven el tamaño de la copa es muy superior (se podrá maximizar el desarrollo de la copa y de los servicios ecosistémicos proporcionados).....	57
Figura 27. Equivalencias de los servicios ecosistémicos producidos por el arbolado de San Agustín del Guadalix.....	58
Figura 28. Estimación de la posible evolución del valor económico del arbolado de San Agustín del Guadalix.....	62

Índice de tablas

Tabla 1. Principales problemáticas asociadas a las ciudades, relacionadas con los factores contribuyentes y las herramientas que permitirían mitigar dichos efectos.	16
Tabla 2. Descripción de los datos que se deben medir en campo.	32
Tabla 3. Cuadro de las 10 especies más abundantes del bosque urbano de San Agustín del Guadalix. Queda de manifiesto como la mayoría de especies se encuentran representadas en un porcentaje inferior al 2%.	37
Tabla 4. Cuadro resumen de las características más significativas del bosque urbano de San Agustín del Guadalix.	42
Tabla 5. 15 especies más productoras de oxígeno en San Agustín del Guadalix (en verde las dos especies de mayor producción de oxígeno por pie)	47
Tabla 6. Cuadro del conjunto de valores estructurales asociados al bosque urbano de San Agustín del Guadalix.	49
Tabla 7. Cuadro del conjunto de valores funcionales asociados al bosque urbano de San Agustín del Guadalix.	49
Tabla 8. Especies más destacadas en cuanto a su valor de importancia dentro del arbolado de San Agustín del Guadalix.	50
Tabla 9. Análisis de los valores medios de las 15 especies con mayor valor de importancia (IV). Resaltado en verde se encuentran los parámetros más altos y en naranja los más bajos.	52
Tabla 10. Comparativa entre ejemplares de distinto tamaño.	55
Tabla 11. Resultados servicios ecosistémicos del arbolado de San Agustín del Guadalix.	59
Tabla 12. Estrategias recomendadas sobre la gestión del bosque urbano.	61

1. INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA – PÉRDIDA DE LA IMPORTANCIA DEL ARBOLADO EN CIUDADES

Históricamente el desarrollo de ciudades ha estado ligado a la presencia de arbolado. Antiguamente las ciudades se creaban entorno a ríos o arroyos, donde las tierras existentes gozaban de gran fertilidad, lo que a su vez implicaba la existencia de árboles de forma natural.

Los árboles se encontraban totalmente integrados en la estructura urbana de los pueblos y las ciudades, siempre asociado a zonas de ocio o culto (plazas, parques, iglesias, jardines...), donde no solo cumplían una función ecológica, si no, que se erigían como auténticos símbolos y representantes de la ciudad o pueblo en cuestión. De esta manera, las sociedades se encontraban íntimamente relacionadas con la naturaleza y el arbolado.

Sin embargo, a mediados del siglo XX se produjo un gran desarrollo industrial y urbanístico que provocó un crecimiento descontrolado de los pueblos y ciudades, donde el componente ambiental y vegetal perdió importancia dentro del ámbito urbano.

Las ciudades redujeron enormemente su cubierta vegetal, produciéndose una deforestación urbana en la que el arbolado y las zonas verdes fueron sustituidas por superficies pavimentadas: carreteras, aceras, edificios, pavimentos... (elementos impermeables y artificiales) Además, de manera simultánea se produjo un incremento exponencial de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera (desarrollo industrial y de la automoción) Un cúmulo de factores que condujo a la creación de ciudades con las siguientes características:

- Sociedades alejadas de la naturaleza.
- Aumento de la contaminación (aumento exponencial de las emisiones de contaminantes y gases de efecto invernadero)
- Aumento de la temperatura (efecto de isla de calor urbana)
- Superficies impermeables que limitan la infiltración y favorecen la escorrentía superficial.
- Pérdida de bienestar y de la calidad de vida en ciudades.

El arbolado y los recursos naturales pasaron a tener un papel testimonial en la planificación y gestión de ciudades, siendo una problemática generalizada tanto a nivel nacional como mundial, especialmente en países desarrollados. Se generó así, un gran desequilibrio en las ciudades.

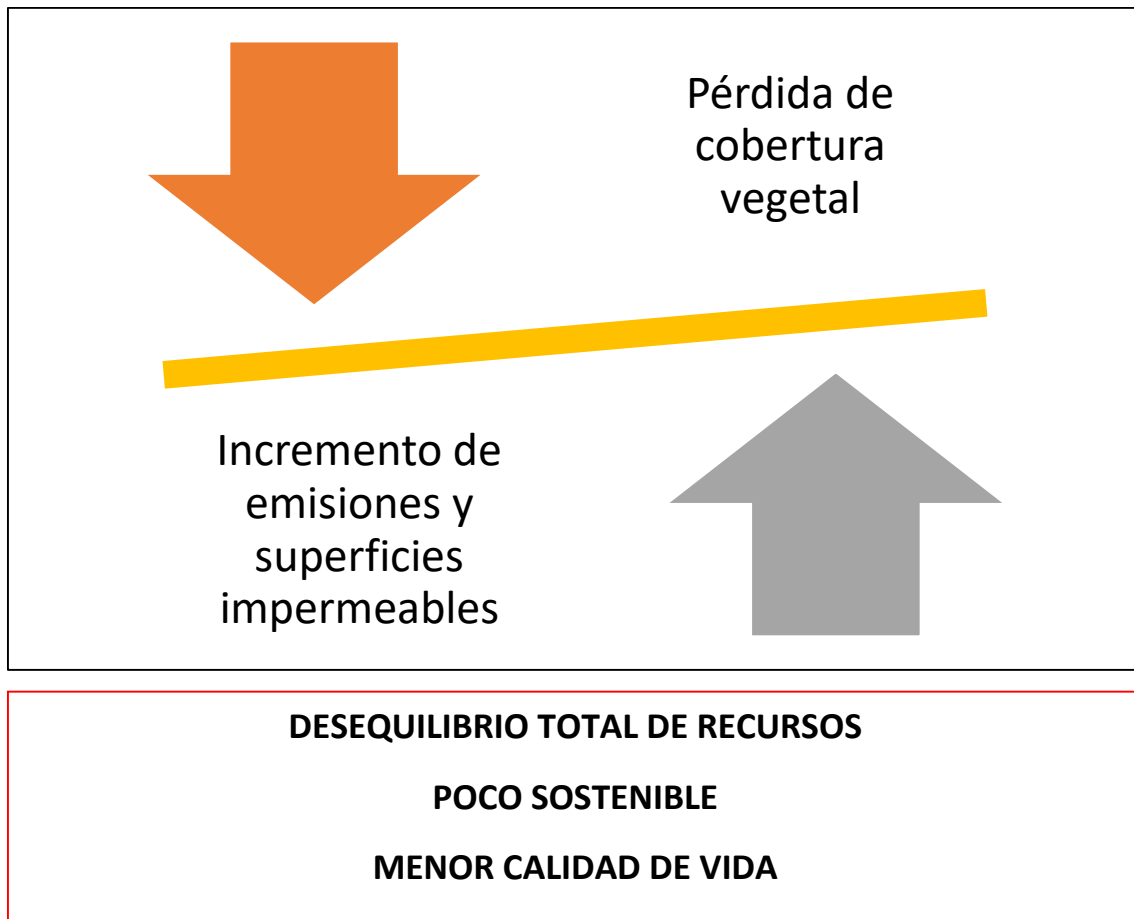


Figura 1. Representación gráfica del desequilibrio existente en las ciudades durante el desarrollo industrial del siglo XX.

Posteriormente, a finales del siglo XX los avances científicos, el activismo ambientalista y los eventos climáticos extremos ocurridos, puso de manifiesto la problemática asociada al cambio climático y al calentamiento global.

El aumento de la preocupación por el cambio climático, sumado a los avances tecnológicos y las evidencias científicas, provocó un cambio en el paradigma de la gestión y planificación del ámbito urbano, donde los árboles se erigen como herramientas indispensables para alcanzar una ciudad sostenible y resiliente*.

El desarrollo sostenible está íntimamente ligado a la calidad de vida, pues un ecosistema sostenible es aquel que ofrece servicios ambientales, sociales y económicos a todos los integrantes de una comunidad, sin poner en peligro la viabilidad de los entornos naturales de los que dependen los servicios ofrecidos. Es decir, la sostenibilidad implica un aumento en la calidad de vida y bienestar humano. A continuación, se muestran algunos beneficios derivados de los árboles y que tienen una incidencia directa sobre las ciudades y sus habitantes:

- Incrementan el valor paisajístico de pueblos y ciudades.

- Desarrollan un componente simbólico en pueblos y ciudades. Representan la conexión de la comunidad con la naturaleza, creando un sentimiento de pertenencia al ciudadano (símbolos de identidad local) Además suelen asociarse a eventos y festividades, formando parte de la propia cultura del lugar.
- Proporcionan sombra y crean zonas más frescas en verano. Generan espacios agradables y atractivos para el ocio, la inspiración, el desarrollo de relaciones inter e intrapersonales...
- Aportan refugio y alimento a la vida silvestre existente (mayor biodiversidad)
- Fijan polvo y partículas contaminantes (mejoran la calidad del aire)
- Son fijadores de dióxido de carbono (gas de efecto invernadero)
- Producen un impacto positivo en la salud física y mental de las personas.
- Reducen los efectos de inundaciones repentinas, pues interceptan la precipitación y favorecen la infiltración del agua (suelos permeables)
- Amortiguan las condiciones meteorológicas: mejorando las condiciones del “efecto isla de calor urbano”, el viento...
- Reducen los costos energéticos: La sombra de los árboles puede reducir la necesidad de enfriamiento en verano y contribuir al ahorro de energía.

El papel de las ciudades en la lucha contra el cambio climático y la búsqueda de la sostenibilidad es cada vez más importante, pues actualmente el 54% de los habitantes a nivel mundial viven en áreas urbanas, y según la ONU se espera que esta cifra continúe aumentando progresivamente y se estima que alcanzará un 66% para 2050 (Centro de Noticias ONU, 2018)

En las ciudades reside la problemática, pero también la solución.

A continuación, se muestra una tabla donde se recogen los principales problemas de las ciudades, junto a las herramientas que permitirían minimizar los impactos negativos y favorecer la resiliencia del entorno urbano.

Problemáticas asociadas a las ciudades	Factores contribuyentes	Herramientas para minimizar efectos
Efecto isla de calor urbana (aumento de temperatura)	Gran densidad de población. Cambio en el uso del suelo. (abundancia de materiales que	Limitar el uso de pavimentos. Fomentar las superficies naturales y arboladas.

	<p>absorben y retienen calor; ej. pavimentos, hormigón...)</p> <p>Concentración de edificios.</p>	
Contaminación (peor calidad del aire)	<p>Emisiones abundantes por parte de viviendas, vehículos, industrias, producción energética...</p>	<p>Cambios en el uso de energías.</p> <p>Mayor integración de arbolado en la ciudad (fijación de carbono y partículas contaminantes)</p>
Inundaciones urbanas	<p>Abundantes superficies impermeables (hormigón, pavimentos...)</p> <p>Suelo muy compactado.</p>	<p>Potenciar las zonas verdes y arboladas. El suelo es permeable y favorece la infiltración.</p>

Tabla 1. Principales problemáticas asociadas a las ciudades, relacionadas con los factores contribuyentes y las herramientas que permitirían mitigar dichos efectos.

Alcanzar la resiliencia y sostenibilidad en las ciudades, haciendo frente a los desafíos ambientales del presente siglo, representa un reto prioritario tanto para los gobiernos locales como para los ciudadanos (Meerow, Newell y Stults, 2016), pues debe trabajarse en una misma línea que permita garantizar el éxito en los resultados.

Tal como se desarrolla en la Agenda de Desarrollo Sostenible, los cambios globales se producen a partir de pequeños cambios a nivel local, siendo la única manera de garantizar el éxito en los resultados. Ante este paradigma, los pueblos, municipios y gobiernos locales tienen un papel esencial, construir soluciones sostenibles y exitosas en comunidades locales permite sentar las bases para conseguir un cambio más amplio (Dale, Robinson y Strashok, 2018). La combinación de esfuerzos locales, nacionales e internacionales es fundamental para lograr un mundo más sostenible y resiliente.

1.2. OBJETIVOS

Dado el contexto climático existente y los desafíos globales, se hace necesario la implementación de medidas concretas y efectivas a nivel local. Ante esta situación, el Ayuntamiento de San Agustín del Guadalix ha decidido emprender un camino ambicioso hacia un futuro más sostenible y resiliente. Se pretende establecer una línea de trabajo estratégica e innovadora, a través de una visión integradora de la ciudad, donde se recupere la importancia del componente ambiental en la gestión y planificación del ámbito urbano.

Esta visión no solo busca mitigar los efectos del cambio climático, sino también promover un entorno más saludable y sostenible para sus residentes.

Siguiendo esta línea de trabajo, el Ayuntamiento de San Agustín del Guadalix se pone en contacto con la empresa **SDL, INVESTIGACIÓN Y DIVULGACIÓN DEL MEDIO AMBIENTE** (amplia experiencia en la gestión del arbolado urbano) para valorar diferentes posibilidades de actuación. Finalmente, y en base a las características del municipio surge la propuesta de llevar a cabo el presente estudio, cuyos objetivos son los siguientes:

- Caracterizar el bosque urbano de San Agustín del Guadalix, identificar las principales carencias y problemáticas detectadas, para finalmente establecer unas líneas estratégicas de gestión.
- Sentar las bases de una potente herramienta que permita mejorar la gestión y planificación del arbolado dentro del ámbito urbano de San Agustín del Guadalix (visión integradora de la ciudad) Entender la estructura, función y valor del arbolado urbano es fundamental para promover un desarrollo con el que mejorar la calidad del entorno.
- Realizar una puesta en valor del arbolado urbano del municipio, a través de una medida innovadora como es la cuantificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado. De esta manera, se otorga una relevancia que hasta ahora no se había alcanzado, pues los servicios ambientales quedaban relegados a una posición secundaria durante los procesos de toma de decisiones y planificación, debido a la complejidad en su valoración.
- Analizar y determinar aquellas variables más influyentes en el incremento de servicios ecosistémicos de los ejemplares arbóreos (tamaño, estado fitosanitario, especie, área foliar...)

- Promover cambios en la planificación de las ciudades y la gestión del arbolado que permitan maximizar los beneficios ambientales generados. Identificar y cuantificar la influencia de las malas prácticas en la gestión y el mantenimiento del arbolado, respecto a los beneficios ambientales generados.
- Mejorar el conocimiento del bosque urbano y crear un potente recurso de cara a la divulgación, concienciación y participación ciudadana. La resiliencia de la ciudad es responsabilidad de toda la sociedad, por lo que es importante informar al ciudadano y hacerlo participe de los cambios que se produzcan en su ciudad.

1.3. ZONA DE ESTUDIO – SAN AGUSTÍN DEL GUADALIX

San Agustín del Guadalix es un municipio de la Comunidad de Madrid, ubicado en el sector norte de la región a escasos 30 km de la capital. El término municipal de San Agustín del Guadalix abarca una extensión de 38,3 km², albergando un total de 13.538 habitantes (según la última actualización del padrón municipal)

La evolución que ha experimentado el núcleo urbano de San Agustín del Guadalix, ha sido muy similar a muchos otros núcleos de la periferia madrileña. Hasta bien entrada la década de los cincuenta, San Agustín del Guadalix es un núcleo exclusivamente rural, sin más relación con la ciudad de Madrid que el impacto que produce el paso de la carretera nacional 1, instalándose servicios de hostelería en las edificaciones del pueblo del borde de la carretera.

En la década de los sesenta comienza la emigración a Madrid, sobre todo de la población joven, debido a las expectativas de mejorar sus condiciones de vida. Circunstancia que provoca una disminución en la población de San Agustín del Guadalix.

Sin embargo, en los años 70 se produjo una gran expansión procedente desde la capital que condicionó el desarrollo de las ciudades y pueblos periféricos, manifestándose primero en la instalación de fábricas en los márgenes de la carretera y posteriormente en el crecimiento exponencial de los núcleos urbanos (construcción masiva de bloques, viviendas y diversas infraestructuras)

Un conjunto de acontecimientos que han conducido a una transformación física del territorio de San Agustín del Guadalix. Dicha transformación ha generado la aparición del conjunto de problemas y efectos asociados al crecimiento masivo de ciudades, y que actualmente son el principal desafío de los gobiernos locales.

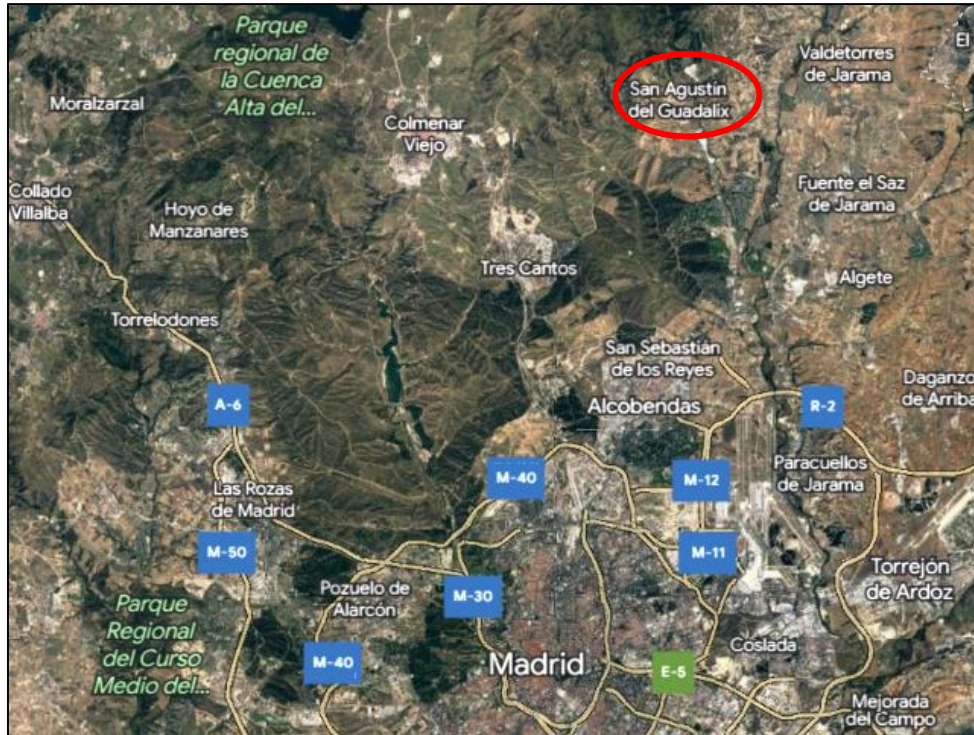


Figura 2. Situación de San Agustín del Guadalix, respecto a la ciudad de Madrid.



Figura 3. Ubicación y extensión del núcleo urbano de San Agustín del Guadalix.



Figura 4. Comparativa entre fotografía aérea “Vuelo Americano Serie B Año 56-57” y fotografía aérea de 2017. Se observa el crecimiento de la ciudad, aumentado las superficies impermeables propias del entorno urbano.

2. CONCEPTO DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

2.1. DEFINICIÓN

Existen diversas definiciones que hacen referencia a los servicios ecosistémicos o servicios ambientales. Una de las más extendidas y aplicadas es la propuesta en el informe “La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio” (MEA. 2005) documento en el que se describen los servicios ecosistémicos como *el conjunto de condiciones y aportaciones directas e indirectas de los ecosistemas naturales y las especies que éstos albergan sobre el bienestar humano.*

2.2. TIPOLOGÍAS

Existe una amplia gama de servicios ambientales, algunos de los cuales son fácilmente identificables y cuantificables en términos de mercado, como el turismo asociado a espacios naturales protegidos o las materias primas obtenidas directamente de los bosques. Debido a esta característica, este tipo de servicios ecosistémicos tienen mayor peso en los planes de gestión y en los procesos de toma de decisiones, quedando otros elementos ambientales de vital importancia relegados a un segundo plano por presentar mayor complejidad en su valoración.

La gran variedad de servicios proporcionados por los bosques dificulta su clasificación. Pudiéndose realizar una primera división general en dos grandes grupos de servicios: directos e indirectos.

- Directos: Son más fácilmente cuantificables y evidentes, la obtención de provisiones. Alimentos, materias primas, medicinas son algunos ejemplos.
- Indirectos: Se encuentran relacionados con los procesos propios del ecosistema, como es la fijación de carbono o producción de oxígeno a través de la fotosíntesis de las especies vegetales.

Por otra parte, basándose en el beneficio producido por los servicios generados se propone la siguiente diferenciación en la tipología de los servicios ambientales.

- Aprovisionamiento: Referidos a aquellos bienes o materias primas que produce el ecosistema, tales como alimentos, combustibles renovables, agua...
- Regulación: Aquellos derivados de los procesos naturales de los ecosistemas y amortiguan impactos locales y globales, como por ejemplo el control de la erosión, la regulación del clima o la mejora en la calidad del aire.
- Culturales: Relacionados con los beneficios no materiales, como es el enriquecimiento personal o espiritual, los placeres estéticos que brindan los propios ecosistemas.

También están relacionados con el ocio y uso del tiempo libre del ser humano. Los valores naturales tienen una incidencia directa sobre el estado de ánimo, relaciones interpersonales, patrimonio cultural o sobre el arraigo que se experimenta hacia un determinado entorno.

- Soporte: Engloban el conjunto de procesos naturales que garantizan el desarrollo de los anteriores servicios. Estos procesos generan beneficios al ser humano de forma indirecta a través de largos lapsos de tiempo. Por ejemplo: el ciclo de nutrientes, el ciclo del agua o la fotosíntesis.

Los servicios ambientales cobran especial importancia en las ciudades, siendo los bosques urbanos fundamentales para maximizar el bienestar humano de una manera sostenible. Entre los beneficios producidos se pueden destacar los siguientes:

- Eliminación de partículas contaminantes. Las áreas urbanas presentan significativos problemas de contaminación. Según la OMS la contaminación supone un importante riesgo medioambiental para la salud, se publicaron varios informes donde se exponía que más del 90% de la población vive en lugares donde no se cumplen las condiciones mínimas de calidad de aire. Esta situación genera un aumento de enfermedades cardíacas, respiratorias y de cáncer de pulmón (Kampa y Castanas, 2008; Calderón-Garcidueñas y Villarreal-Ríos, 2017)

Dada la magnitud del problema se hace evidente la necesidad de tomar medidas al respecto, siendo el arbolado urbano una herramienta indispensable para subsanar dicha problemática.

Los árboles eliminan elementos contaminantes a través de los estomas o reteniendo las partículas en la superficie de hojas y tallos para que de forma posterior se disuelven con la lluvia.

- Sumideros de carbono. El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero, cuya concentración se ha visto incrementada exponencialmente en las últimas décadas debido a actividades antrópicas. La emisión de estos gases contribuye al calentamiento global y a acelerar el proceso de cambio climático, constituyendo una de las mayores problemáticas de la época. Los bosques contribuyen enormemente a controlar los niveles de CO₂ pues actúan como sumideros de carbono.

El secuestro de carbono realizado por los árboles se produce a través de la fotosíntesis, proceso en el que se fija CO₂ atmosférico y se desprende oxígeno (O₂) como gas residual.

Además, los árboles actúan como almacenes de carbono, pues este compuesto queda integrado en sus tejidos. El conjunto de carbono almacenado por un árbol es liberado de nuevo cuando el árbol muere y se descompone, de ahí la importancia de mantener en buen estado de salud el arbolado existente. Por otra parte, la utilización de madera en la fabricación de productos, permite mantener el carbono retenido fuera de la atmósfera durante la vida útil del producto.

- Producción de oxígeno (O₂). El oxígeno es un gas presente en la atmósfera y es indispensable para el desarrollo de la vida. Las especies vegetales producen oxígeno mediante una reacción química conocida como fotosíntesis, proceso metabólico en el cual se libera oxígeno a la atmósfera como gas residual.

- Reducción de la temperatura. En los núcleos urbanos las temperaturas son más elevadas que en las zonas periféricas, es un fenómeno que se conoce bajo la denominación de isla de calor urbana (ICU). La aparición de este fenómeno se debe a la expansión de las ciudades y a la progresiva sustitución de especies vegetales y zonas verdes por espacios asfaltados u hormigonados, es decir un cambio en el uso del suelo. Estos materiales propios de las ciudades absorben y retienen mucho más calor que los terrenos forestales, por tanto, se produce un incremento en la temperatura de estos núcleos. Además, la concentración de edificios dificulta el flujo de viento, impidiendo la disipación de calor.

Los bosques urbanos son unos grandes aliados para mitigar este fenómeno, pues reducen las temperaturas mediante la evapotranspiración, proporcionan sombra y limpian el aire.

- Valores no cuantificables. La presencia de vegetación o zonas verdes en las ciudades tienen un impacto directo sobre la calidad de vida de sus habitantes.

Existencia de un componente estético que hace el territorio más atractivo para vivir, pues armoniza el paisaje, mejora la salud física y mental de las personas, siendo el eje sobre el que se vertebran la mayoría de relaciones interpersonales. Se favorece el desarrollo de actividades de ocio y uso recreativo de las zonas verdes, siendo puntos de encuentro y reunión. Además, los espacios verdes impulsan el desarrollo personal, pudiendo ser lugares de reflexión e inspiración.

3. MATERIAL Y MÉTODOS

3.1. INVENTARIO PREVIO

San Agustín del Guadalix no contaba con un inventario completo y detallado del arbolado municipal, por lo que en primer lugar era necesario llevar a cabo un inventario de arbolado pie a pie con el que obtener una caracterización completa del arbolado urbano de San Agustín del Guadalix.

Elaborar y crear un inventario desde cero ha permitido fijar los atributos más interesantes y recopilar información de gran utilidad tanto para la gestión del arbolado como para el desarrollo del presente estudio de valoración de los servicios ecosistémicos del bosque urbano. Fases de trabajo:

1. **Selección de atributos a inventariar**, de tal manera que se recoja la mejor y mayor información posible en base a las características del arbolado, las necesidades del municipio y los requerimientos específicos para la cuantificación de servicios ecosistémicos.
2. **Trabajo de campo**. Llevar a cabo las mediciones pertinentes y recopilar la información para cada atributo definido previamente.
3. **Trabajo de gabinete**. Depurado y procesado de los datos recogidos en campo, para su posterior estudio y análisis. De manera complementaria, se ha realizado una aplicación SIG con el programa ESRI que servirá para visualizar el propio inventario de forma digital y ayudar a la gestión del arbolado. La aplicación cuenta con pestañas de especies y fichas, nivel de riesgo, estado fitosanitario y prioridades de actuación.

3.1.1. Variables medidas y recogidas

A continuación, se expondrán el conjunto de variables medidas, con la metodología y criterios utilizados para cada uno de los atributos que componen el inventario de arbolado.

1. Dimensiones

La caracterización dendrométrica del arbolado es una parte fundamental de cualquier inventario. En este aspecto se han tenido en cuenta las siguientes variables:

- **Diámetro normal del tronco**. Es el diámetro del tronco a la altura de 1,30 m desde el suelo. Su medición se ha realizado manualmente, empleando como herramienta una forcípula.

- **Altura total del árbol.** Es la altura desde el suelo, donde se encuentra la base del árbol, hasta la parte superior del individuo en cuestión. Para su medición se ha empleado un hipsómetro laser graduado que permite medir la altura en base a un sistema de medición de tres puntos (punto del observador, apuntar sobre la base del tronco y apuntar sobre la parte más alta del árbol)
- **Diámetro de copa.** Es la anchura de la proyección de la copa del árbol sobre el suelo. Para su medición se requieren dos personas que se deben situar en los extremos de la copa, siendo una de ellas la portadora del hipsómetro que permite medir distancias horizontales.

2. Características generales del árbol y de su interacción con el medio

- **Identificación de especies.** Imprescindible para una correcta caracterización del inventario. La identificación de especies se lleva a cabo mediante observación e inspección visual por parte de los técnicos.
- **Estado fitosanitario.** Se establece un rango de 5 variables (excelente, bueno, regular, malo y muerto), la determinación de una u otra variable viene influenciada por la apariencia, vigorosidad del ejemplar, anomalías observadas y la capacidad de respuesta ante daños sufridos (vitalidad)
- **Diana.** Es un concepto que hace referencia a la probabilidad de impacto sobre personas o bienes (ante la caída del árbol o de una de sus partes) y al valor de lo que podría verse afectado ante un fallo estructural. Se han establecido 4 rangos, el 1 se corresponde con la diana más baja y el 4 con la más elevada.
- **Estructura de los ejemplares y riesgo asociado.** A través de este atributo se pretende hacer una valoración del estado de la estructura de los árboles y determinar el posible riesgo existente, en función del estado y anomalías detectadas (el objetivo es identificar claramente aquellos ejemplares que requieren especial atención ante un posible fallo estructural). Se han asignado 4 valores numéricos en función del porcentaje de daño detectado en el ejemplar:
 - Riesgo 0. Árboles que no presentan ningún tipo de daño en su estructura.
 - Riesgo 1. Árboles cuyos daños detectados no suponen un problema significativo o relevante, el riesgo existente es bajo (las anomalías representan un 10-20% de su estructura)

- Riesgo 2. Árboles con problemas en su estructura, ya sea por la existencia de fuertes terciados que rompen la estructura natural de la copa o por la presencia de diferentes anomalías como heridas, oquedades o pudriciones en un porcentaje considerable del ejemplar (21 - 50%), en la mayoría de casos son ejemplares que requieren de revisiones periódicas para comprobar su evolución.
 - Riesgo 3. Árboles que por sus características o anomalías detectadas representan un riesgo importante, pues el daño detectado supera el 50% de la estructura. Son árboles que requieren de actuaciones con las que limitar, controlar o eliminar el riesgo asociado.
- **Terciado (si/no):** Tipo de poda que consiste en reducir las ramas principales a un tercio de su longitud. Se trata de una práctica muy extendida pero que compromete enormemente la estructura de los árboles, siendo una de las principales causas de aparición de anomalías y defectos estructurales en el arbolado urbano.

3. Actuaciones

Según el conjunto de variables analizadas para cada árbol se incorpora este atributo con el que definir las diferentes actuaciones o recomendaciones que se deberían llevar a cabo para cada árbol inventariado, en caso de ser necesario. Las diferentes actuaciones consideradas son:

- Poda de ramas secas.
- Equilibrado de copa.
- Descarga de copa.
- Pinzado de ramas horizontales.
- Tala.
- Revisar evolución.
- Estudio de riesgo.
- Otras.

Las actuaciones y trabajos que se deben ejecutar deben de ir acompañado por un régimen de prioridad, que indique el lapso de tiempo o urgencia con la que se deben llevar a cabo las actuaciones. Se han definido 4 niveles de prioridad:

- URGENTE: actuación inmediata.
- CORTO PLAZO: no se debe demorar más de un mes.
- MEDIO PLAZO: es posible realizar la actuación en unos meses hasta un año.
- LARGO PLAZO: se puede realizar en dos años vista.

4. Anexo fotográfico

Finalmente, durante el proceso de realización del inventario y toma de datos en campo, se recoge un conjunto de fotografías representativas de cada ejemplar inventariado, que irán asociadas a la ficha técnica de cada árbol. La finalidad de la captura de imágenes es acompañar los atributos recogidos con una representación gráfica de los mismos, para ello se tomarán dos tipologías de fotografías:

- Imagen general que permita identificar el árbol y observar su estructura.
- Imágenes específicas de las anomalías y defectos detectados más significativos.

5. Atributos específicos para la cuantificación de servicios ecosistémicos (SE)

Durante la realización del inventario se incorporaron aquellos parámetros específicos que deben recopilarse y medirse en campo, para llevar a cabo el estudio correspondiente de servicios ecosistémicos generados por el arbolado.

Dichos atributos se desarrollarán de manera detallada en el apartado 3.2.

3.2. HERRAMIENTA I-TREE ECO

En el presente estudio de cuantificación de servicios ecosistémicos se ha utilizado como herramienta el software i-Tree Eco, desarrollado por el Servicio Forestal del USDA (Departamento de agricultura de los Estados Unidos). Se trata de una potente herramienta diseñada para realizar una mejor gestión de los bosques urbanos, pues cuantifica la estructura del bosque, función y valor económico que proporcionan a la sociedad.

Este software permite realizar una valoración cuantitativa de los servicios ambientales generados por un árbol o conjunto de árboles a partir de ciertos datos de inventario de arbolado tomados en campo, junto a datos de clima y contaminación del aire aportados al programa.

La forma de realizar el cálculo es la siguiente:

- Para datos en Estados Unidos, el valor predeterminado de la eliminación de la contaminación del aire se calcula con base en la incidencia local de los efectos adversos a la salud y en los costos nacionales de externalidades promedio.
- El número de efectos adversos a la salud y el valor económico asociado se calcula para ozono, dióxido de sulfuro, dióxido de nitrógeno y material particulado menor a 2.5 micras usando datos del Programa de Asignaciones y Análisis de Beneficios Ambientales (BenMAP) de la Agencia de Protección Ambiental de EEUU (Nowak et al 2014)
- Para los trabajos fuera de EEUU, se utilizan valores de contaminación local definidos por el usuario. En caso de no obtener los valores locales, las estimaciones se basan en valores de externalidad media europea (van Essen et al 2011) o BenMAP ecuaciones de regresión (Nowak et al 2014) que incorporan estimaciones de población definidas por el usuario. Los valores son entonces convertidos a moneda local con tasas de cambio definidas por el usuario.
- Los valores oficiales de contaminación se basan en el costo social estimado del contaminante en términos de impacto en la salud humana, daños a edificios y cultivos (sin tener en cuenta los daños a los ecosistemas, ni acidificación, ni eutrofización)
- Se asume que el beneficio para la sociedad de una tonelada de gas eliminado es el mismo que el costo de una tonelada del mismo gas emitido.
- Para el cálculo del almacenamiento de carbono se calcula la biomasa de cada árbol usando ecuaciones obtenidas de estudios científicos publicados y los datos de los árboles medidos. Los árboles maduros tienden a tener menos biomasa que la predicha por las ecuaciones de biomasa derivadas del bosque (Nowak, 1994). Para ajustar la

diferencia, los resultados de la biomasa para árboles urbanos maduros se multiplicaron por 0.8. La biomasa del peso seco de los árboles se convierte a carbono almacenado multiplicándola por 0.5.

- El valor estructural es el valor de un árbol en base al propio recurso físico. Los valores estructurales se basan en los procedimientos de valoración del Consejo de Tasadores de Árboles y el Paisaje, que usa la información de especie, diámetro, condición y lugar del árbol (Nowak et al 2002a; 2002b)

***NOTA IMPORTANTE:** *i-tree Eco utiliza predicciones y fórmulas estudiadas en la literatura científica, pero los datos se deben tomar como una estimación aproximada nunca como un estudio preciso de los valores ambientales del bosque urbano**

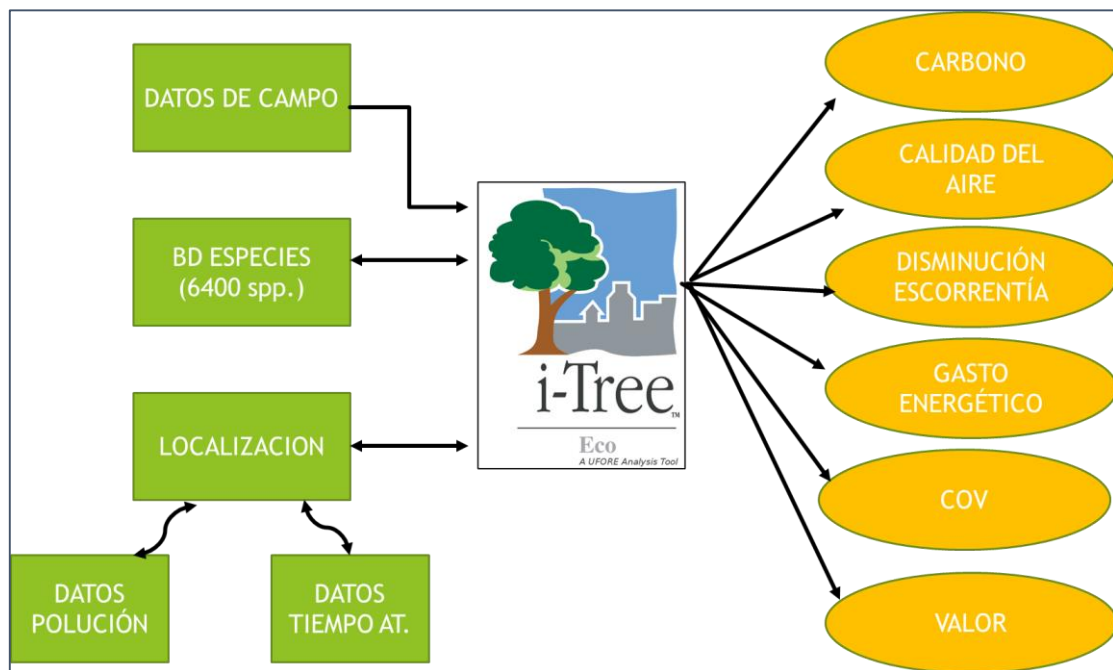


Figura 5. Información que se recopila (izquierda) y valoraciones que saca el programa i-Tree Eco (derecha)

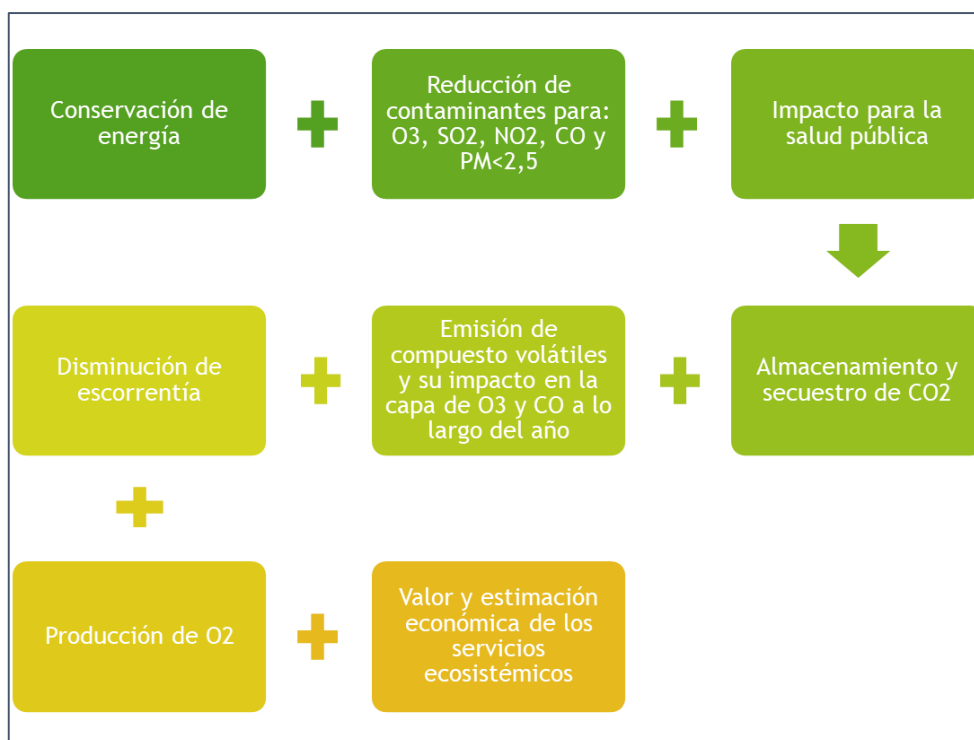


Figura 6. Valores ecosistémicos que puede cuantificar la herramienta i-Tree Eco.

3.2.1. Parámetros calculados

Esta herramienta permite calcular una gran variedad de servicios ecosistémicos, cada uno tiene diferentes especificaciones durante la toma de datos. En este caso se ha priorizado el análisis de 5 parámetros fundamentales que se han considerado los más interesantes para el desarrollo del estudio:

- **Partículas contaminantes.**

El modelo utilizado realiza los cálculos para las partículas contaminantes más habituales y nocivas: ozono (O₃), monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y material particulado menor a 2,5 micrones (PM_{2.5}).

- **Secuestro y almacenamiento de carbono.**

El almacenamiento de carbono se calcula a partir de la biomasa de cada árbol usando ecuaciones de la literatura y los datos de los árboles medidos.

El secuestro de carbono es la eliminación del dióxido de carbono del aire por los ejemplares. Para su cálculo anualmente, se añade el crecimiento promedio del diámetro del género correspondiente y la clase diamétrica.

- **Producción de oxígeno.**

El software empleado calcula la cantidad de oxígeno producido a partir del secuestro de carbono en base a los pesos atómicos según la fórmula:

$$\text{liberación neta de O}_2 \text{ (kg/año)} = \text{secuestro neto de C (kg/año)} \times 32/12$$

- **Valores estructurales y funcionales.**

El valor estructural es aquel considerado exclusivamente por lo que supone el recurso físico, es decir sería semejante al coste que supondría reemplazar un árbol por otro de características similares. En este ámbito estructural, además del valor propio del ejemplar, se puede incluir el valor correspondiente al almacenamiento de carbono.

En cuanto a los valores funcionales, se incluyen todos aquellos que están relacionados con el conjunto de procesos que lleva a cabo el árbol, algunos ya mencionados como el secuestro de carbono o la eliminación de partículas.

- **Valor de importancia (I.V – “Importance Value”)**

Este parámetro relaciona la variable de área foliar con el número de pies. Se calcula por especies mediante la suma del porcentaje de población y el porcentaje de área foliar.

3.2.2. Recopilación de datos específicos para la valoración de SE

Los datos solicitados por el software para la correcta valoración de los parámetros definidos anteriormente se focalizan principalmente en las dimensiones de copa y el estado de la misma, tal como se observa en la siguiente tabla:

MEDICIONES A TOMAR	DESCRIPCIÓN
Altura total del árbol (m)	Altura desde el suelo hasta la parte superior del árbol (vivo o muerto)
Altura a parte superior de copa (m)	Altura desde el suelo hasta la parte superior viva del árbol
Altura a base de la copa (m)	Altura desde el suelo a la primera rama viva
Ancho de la copa (m)	Se debe medir en dos direcciones: Norte-Sur y Este-Oeste
Porcentaje de copa desaparecida	Porcentaje del volumen de copa que no se encuentra ocupado por ramas y hojas
Porcentaje de muerte regresiva	Porcentaje de copa que presenta ramas muertas (no incluye la muerte de ramas por poda natural)
Diámetro normal (cm)	Diámetro del tronco a una altura de 1,30m desde el suelo

Tabla 2. Descripción de los datos que se deben medir en campo.

La mayoría de mediciones descritas en la tabla anterior se interpretan fácilmente y son de obtención directa. Sin embargo, tanto la variable de copa faltante como la de muerte regresiva requieren de mayor detenimiento en su observación.

- El porcentaje de **copa desaparecida o pérdida de copa** es identificado en i-Tree Eco como “*Canopy Missing*”. Para su correcta medición hay que visualizar el borde de la copa ideal dadas las características morfológicas del árbol en cuestión y estimar el porcentaje de copa que falta para alcanzar ese ideal.

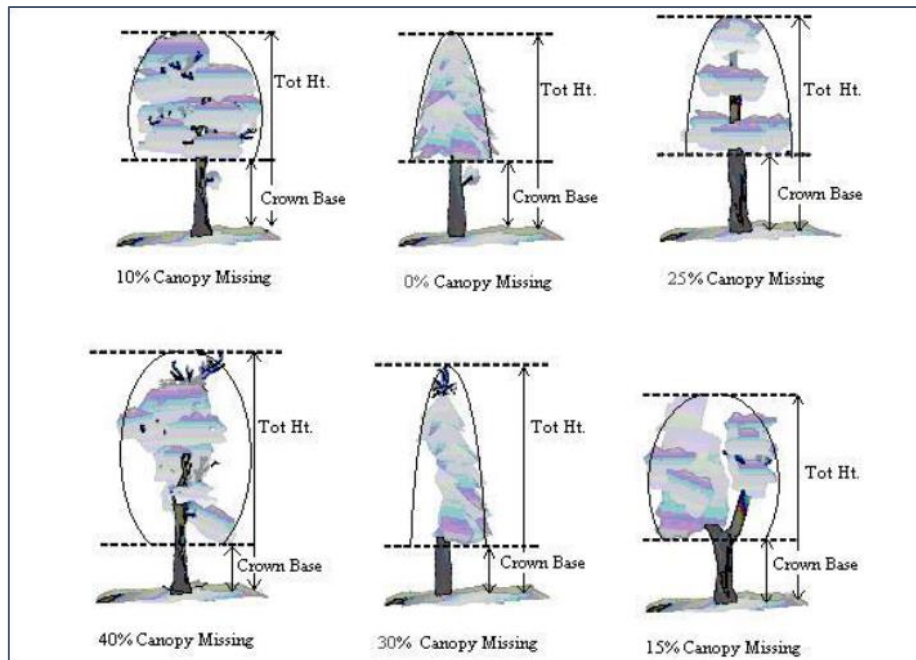


Figura 7. Ejemplos de estimación de la variable “copa desaparecida”.

- El porcentaje de **muerte regresiva**, denominado en el software como “*Dieback*”. Durante su estimación se debe observar el estado de la copa actual y determinar qué porcentaje de la copa está constituido por elementos secos. Esta variable no incluye la muerte de copa por circunstancias naturales como es la poda natural.

También se podría definir como la inversa del estado de la copa, una copa perfecta en condiciones excelentes se identificaría con el valor 100% en estado de copa, que equivale a un 0% de muerte regresiva.

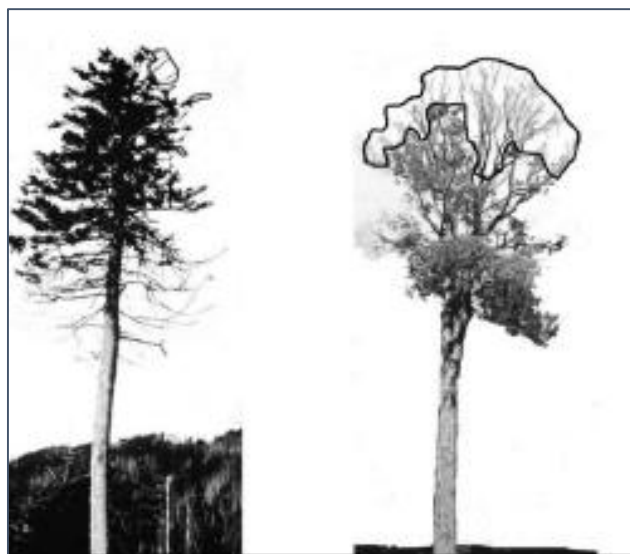


Figura 8. Ejemplos de estimación de la variable “muerte regresiva”.

4. RESULTADOS OBTENIDOS

4.1. CARACTERIZACIÓN DEL BOSQUE URBANO DE SAN AGUSTÍN DEL GUADALIX

Teniendo en cuenta la elaboración previa de un inventario pie a pie del arbolado de San Agustín del Guadalix y con el objetivo de realizar una mejor interpretación de los resultados obtenidos respecto a los servicios ecosistémicos, se considera necesario conocer las características principales del bosque urbano de San Agustín del Guadalix, especialmente de aquellos atributos que puedan tener incidencia sobre los beneficios ecosistémicos generados.

Un inventario completo y detallado de arbolado, representa la base con la que elaborar estrategias de gestión y planificación integrada del bosque urbano. La base de datos del inventario aparece reflejada en una aplicación SIG que favorece la visualización de datos de manera digital, siendo una excelente herramienta tanto para la planificación y gestión, como para labores de divulgación ciudadana.

Dicha aplicación es de uso privado por parte del Ayuntamiento, pudiendo dejar parte de información abierta para su consulta por parte de la población, siempre que el Ayuntamiento lo considere pertinente.

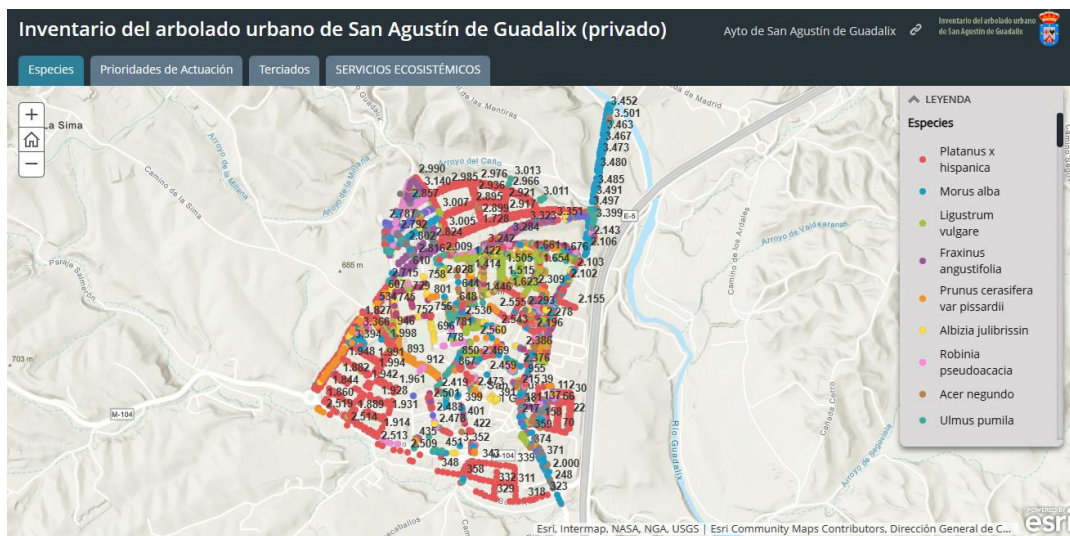


Figura 9. Captura de la aplicación SIG donde aparece reflejado el bosque urbano de San Agustín del Guadalix.

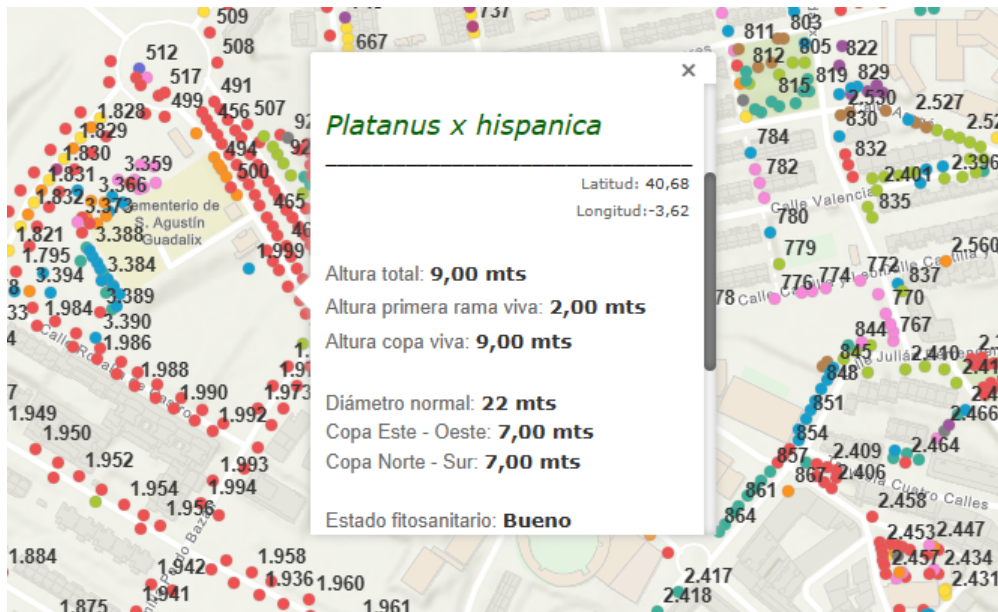


Figura 10. Ejemplo de fichas individualizadas de cada uno de los ejemplares que forman parte del inventario de arbolado.

4.1.1. Especies y distribución del arbolado

El inventario municipal de arbolado de **San Agustín del Guadalix** consta de **3501 ejemplares arbóreos distribuidos de manera homogénea a lo largo del ámbito urbano**, lo que implica una conectividad adecuada en el interior del núcleo urbano.

A pesar de ello existen diversas particularidades:

- Se detectan sectores con carencia de arbolado, especialmente en la zona centro donde la configuración estrecha de los viales dificulta la implantación de arbolado.
- Se observan áreas concretas con una densidad de arbolado muy elevada, lo que dificulta el correcto desarrollo de los ejemplares, pues entran en competencia por la falta de espacio.

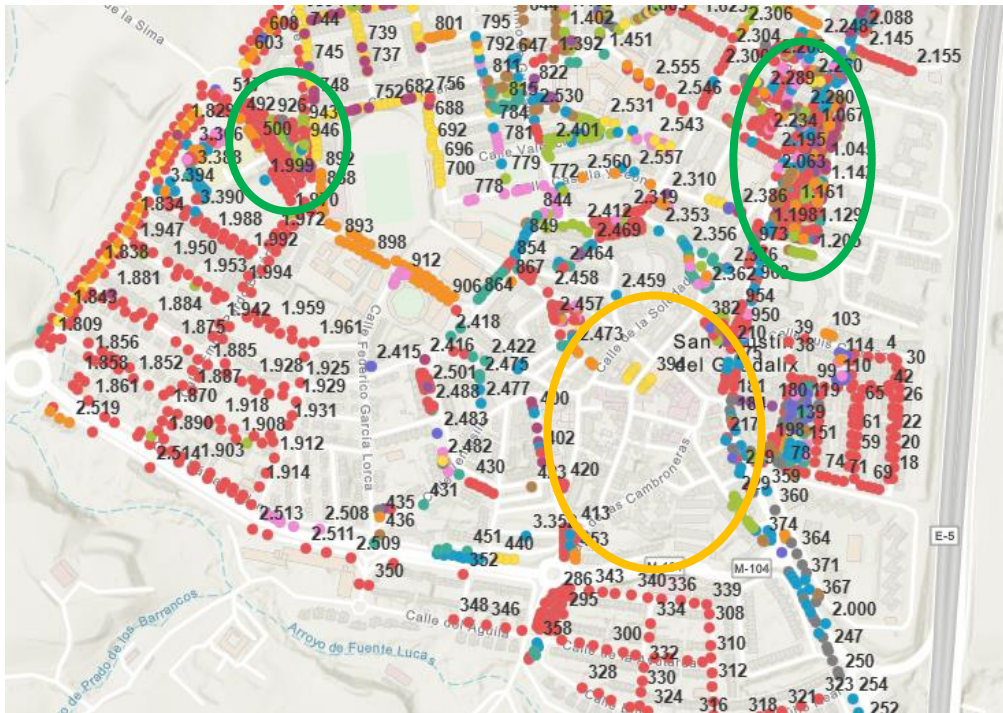


Figura 11. Distribución homogénea del arbolado en líneas generales. En naranja zona centro con escasez de arbolado; en verde determinadas áreas con densidad excesiva.

En cuanto a la biodiversidad existente, el bosque urbano se encuentra compuesto por un total de 98 especies diferentes, siendo un valor muy elevado. Sin embargo, la representación de las mismas no es homogénea, siendo un arbolado dominado principalmente por una única especie (*Platanus x hispanica* – 33%), mientras el resto de especies se encuentran representadas en un porcentaje muy inferior. En esta línea, destacar que el 95% de las especies muestreadas se encuentran en un porcentaje inferior al 3%, llegando a ser una representación testimonial en muchos casos.

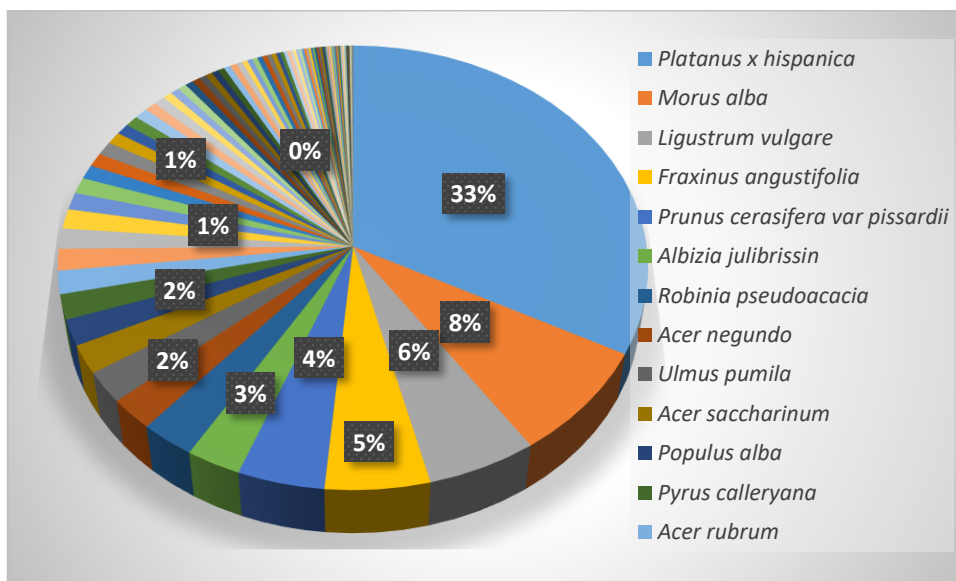


Figura 12. Porcentaje de árboles por especie del inventario de San Agustín del Guadalix.

Especie	Nº de ejemplares	Porcentaje (%)
<i>Platanus x hispanica</i>	1146	32,73
<i>Morus alba</i>	276	7,88
<i>Ligustrum vulgare</i>	194	5,54
<i>Fraxinus angustifolia</i>	184	5,26
<i>Prunus cerasifera var pissardii</i>	153	4,37
<i>Albizia julibrissin</i>	97	2,77
<i>Robinia pseudoacacia</i>	96	2,74
<i>Acer negundo</i>	80	2,29
<i>Ulmus pumila</i>	79	2,26
<i>Acer saccharinum</i>	72	2,06
RESTO DE ESPECIES	1124	32,1

Tabla 3. Cuadro de las 10 especies más abundantes del bosque urbano de San Agustín del Guadalix. Queda de manifiesto como la mayoría de especies se encuentran representadas en un porcentaje inferior al 2%.

4.1.2. Características dendrométricas

4.1.2.1. Categoría Diamétrica

La mayoría del arbolado de San Agustín del Guadalix se encuentra constituido por ejemplares con diámetros de pequeño tamaño, pues el 79% de los árboles inventariados presentan un diámetro del tronco inferior a 30 cm. La categoría diamétrica situada entre los 10 y 19 cm, es la que integra el 35% del conjunto arbolado de San Agustín del Guadalix, lo que constituye una muestra relevante de las reducidas dimensiones existentes dentro del territorio estudiado.

Por el contrario, apenas el 3,6% del arbolado cuenta con un diámetro superior a 50cm, siendo los ejemplares mayores a 60 cm aún más escasos (1,1%) Los árboles de mayor diámetro se corresponden principalmente con las siguientes especies: *Morus nigra*, *Morus alba* o *Quercus ilex*.

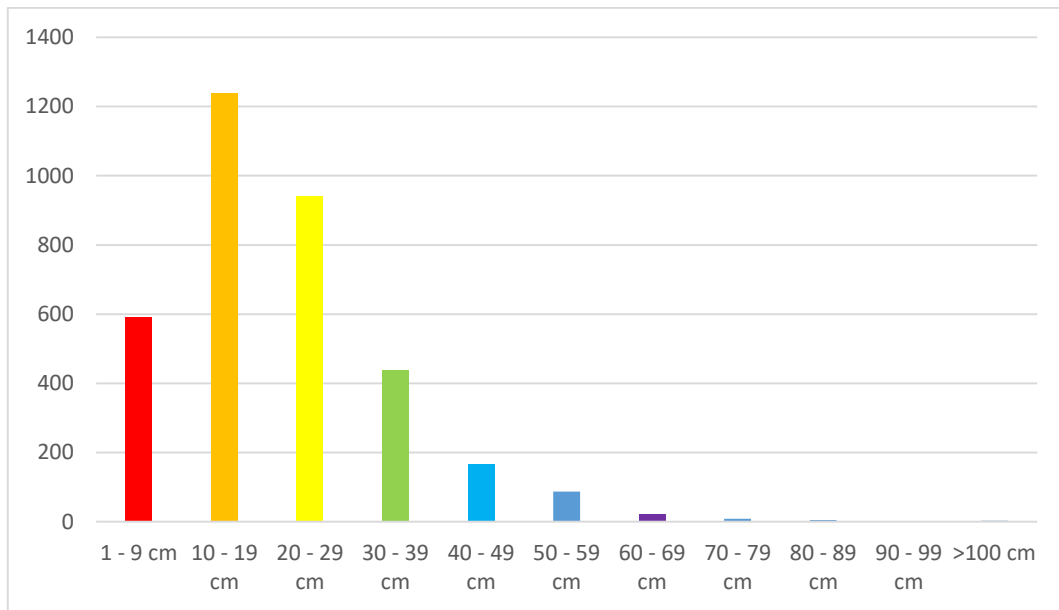


Figura 13. Nº de ejemplares clasificados según rangos de diámetro (cm)

4.1.2.2. Altura

El 80% de los árboles del inventario cuentan con una altura inferior a 10 m, siendo escasos los ejemplares que presentan dimensiones superiores a los 15 m (1,88 %)

Los árboles que alcanzan mayores alturas se corresponden con ejemplares de la especie *Populus alba*.

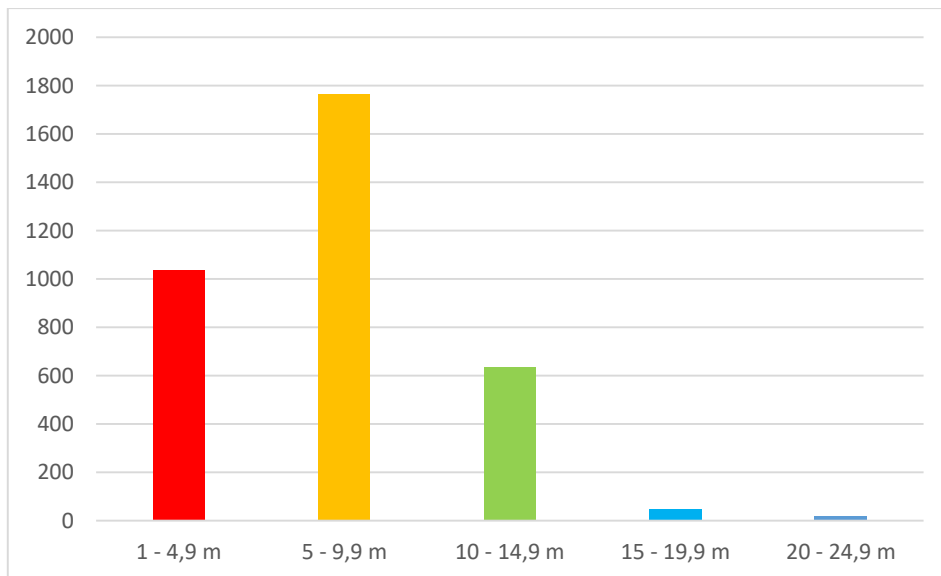


Figura 14. Nº de ejemplares clasificados según rangos de altura (m)

4.1.2.3. Diámetro de copa

Tal como se muestra en la Figura 15, el 96% de los árboles cuentan con un diámetro de copa comprendido entre 1 y 10 metros (tamaño pequeño a medio), siendo la gran mayoría menores a 6 metros (56,33%) Mientras que los ejemplares con diámetros de copa superiores a 10 metros (copas grandes y voluminosas) son prácticamente testimoniales (4,4%)

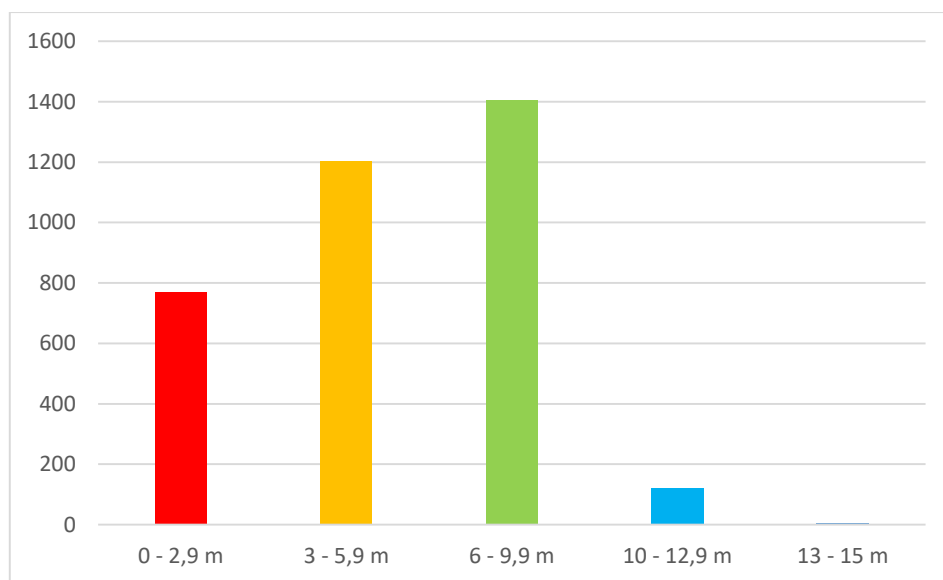


Figura 15. Nº de ejemplares clasificados según rangos de diámetro de copa (m)

4.1.3. Anomalías estructurales e incidencia de los terciados

En este apartado es importante destacar y desarrollar la relación existente entre los daños en la estructura de los árboles y la realización de podas abusivas. Ejecutar prácticas como el terciado o la realización de podas demasiado intensas o mal ejecutadas, tiene una incidencia directa sobre la estructura del árbol, implicando la rotura y descompensación de la misma, además de la generación de pudriciones y la disminución de la vitalidad de los ejemplares a largo plazo.

Un árbol de forma natural genera una estructura cohesionada y segura, siendo los terciados y las podas mal ejecutadas, uno de los principales factores responsables de la aparición de anomalías y daños en la estructura de los árboles, que, a su vez, provocan un aumento de la vulnerabilidad del individuo frente a plagas, hongos o fenómenos climatológicos como el viento.

La finalidad de las podas, es mejorar las condiciones del árbol, minimizando los riesgos tanto para el ejemplar como para las personas. Se deben realizar bajo criterios adecuados con los que mantener una estructura equilibrada en la copa y buscando generar heridas lo más pequeñas posibles, para que el árbol pueda compartimentarlas rápidamente y evitar que sea un foco en el que penetre la pudrición.

Ejemplares terciados

Se consideran árboles terciados aquellos que han sufrido un tipo de poda en la que se reduce a un tercio la longitud de sus ramas principales. Según se muestra en el siguiente gráfico, en San Agustín del Guadalix, el número de árboles terciados es muy elevado, llegando a alcanzar el 53% de los ejemplares inventariados. Tal como se ha comentado líneas arriba, los terciados implican un riesgo asociado debido a la rotura de la estructura natural de los árboles, pudiendo generarse ramas mal insertadas o pudriciones, por lo que este tipo de prácticas deben evitarse y limitarse en el futuro.

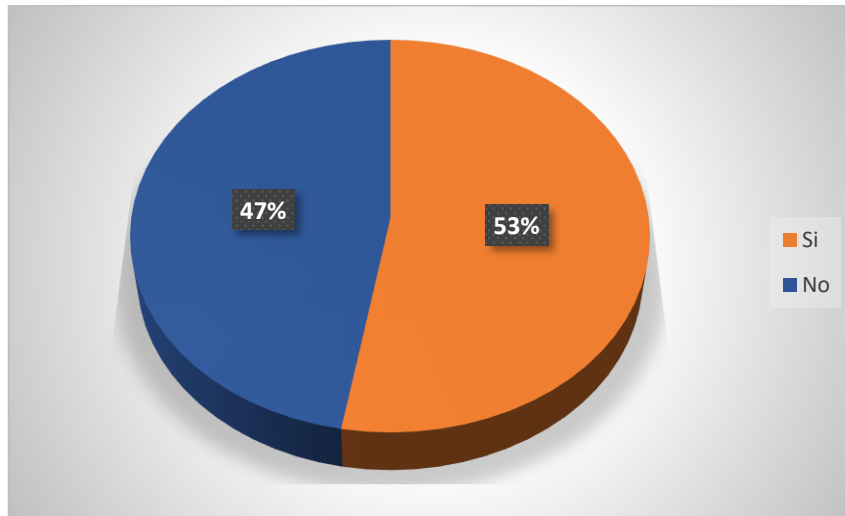


Figura 16. Porcentaje de árboles terciados en el inventario de San Agustín del Guadalix.

En el siguiente gráfico, se muestran las especies con mayor porcentaje de árboles terciados, siendo *Platanus x hispanica*, *Morus alba* y *Ligustrum vulgare* las especies más afectadas con un 57%, 11% y 7% respectivamente.

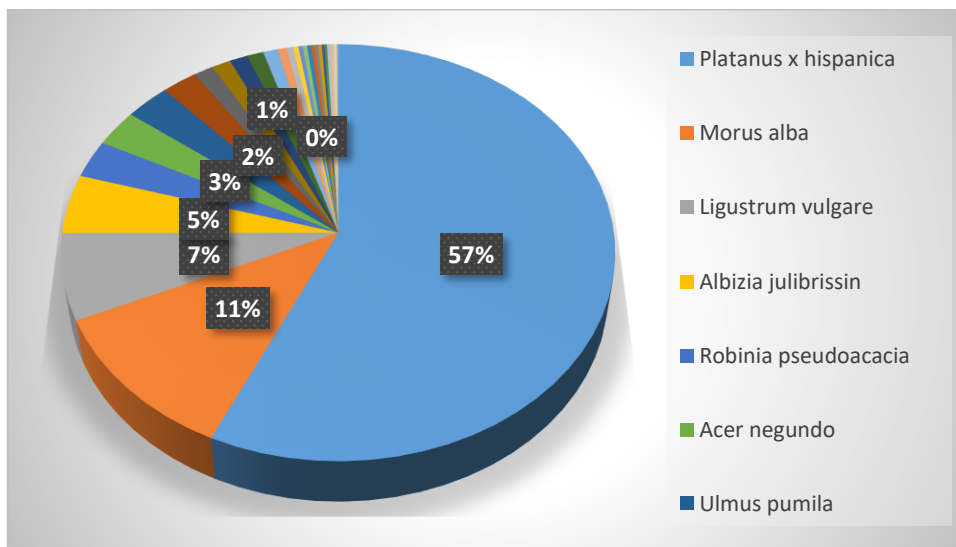


Figura 17. Porcentaje de especies terciadas.

Este conjunto de individuos terciados debe tener un seguimiento continuado para comprobar la evolución de los mismos y tomar las decisiones adecuadas.

El terciado compromete el desarrollo del arbolado, pues en caso de no llevar a cabo un proceso de renaturalización de la copa, bajo las directrices de técnicos competentes (solución óptima), obliga a la realización de terciados periódicos para evitar el peso sobre las antiguas heridas de poda. De esta manera, se debilita al ejemplar progresivamente y además lleva asociados unos elevados costes de mantenimiento que podrían haberse evitado con una buena gestión.



Figura 18. Fotografía de ejemplar de plátano terciado ubicado en el parque Príncipe Felipe. Se observa una estructura totalmente alterada, donde se generan ramas mal insertadas que a medida que aumenten de tamaño pueden representar riesgos ante fallos estructurales (anclajes débiles derivados del terciado señalizados en rojo)

4.1.4. Resumen y aspectos destacados del bosque urbano de San Agustín del Guadalix

Característica	Resultado del inventario
Distribución del arbolado	Bosque urbano homogéneo y con buena conectividad entre espacios
Biodiversidad	Abundante en cuanto al número de especies diferentes (98). Sin embargo, la representación de especies es muy heterogénea. <u>Bosque urbano monoespecífico</u> , dominado por una sola especie (<i>Platanus x hispanica</i> – 32%) Según la regla de Santamour (1990), se recomienda que el tanto por ciento de presencia de especies no sea superior al 10%. Por lo que debería limitarse el uso de la especie <i>Platanus x hispanica</i> .
Tamaño medio de la población arbórea	En líneas generales, el <u>tamaño medio del arbolado es de pequeño a medio</u> . La presencia abundante de arbolado joven, junto con la falta de desarrollo en los ejemplares adultos (motivado por la práctica continuada de podas intensas) implica la existencia de árboles de dimensiones reducidas.
Anomalías estructurales (terciados)	<u>Abundantes ejemplares terciados (63%)</u> , práctica que afecta a la estructura y al correcto desarrollo de los ejemplares. Dichas prácticas deben ser controladas y evitadas en el futuro, especialmente en nuevas plantaciones o individuos jóvenes. De esta manera, se pretende alcanzar un desarrollo óptimo de los árboles que permita obtener ejemplares grandes, sanos y vigorosos.

Tabla 4. Cuadro resumen de las características más significativas del bosque urbano de San Agustín del Guadalix.

Las mencionadas características hacen evidente la falta de una planificación estratégica que favorezca un correcto desarrollo de los árboles, cuyo objetivo debe ser el de crear un bosque urbano biodiverso, con ejemplares sanos y con el máximo desarrollo posible.

En los siguientes apartados del presente documento se llevará a cabo un estudio específico de los servicios ecosistémicos que permitirá analizar y comprobar la influencia existente entre las características del arbolado y los servicios ecosistémicos generados.

4.2. SERVICIOS ECOSISTÉMICOS (SOFTWARE I-TREE ECO)

4.2.1. Eliminación de contaminantes

Los resultados representan la cantidad de partículas eliminadas (g/año) y el valor cuantitativo de la eliminación producida (€/año)

La eliminación de partículas contaminantes realizada por los árboles de San Agustín del Guadalix es positiva para los diferentes elementos analizados, sin embargo, algunos se eliminan en un porcentaje muy superior al resto, tal como se muestran en la Figura 19.

- El ozono (O3) es el elemento de mayor eliminación, con una cantidad anual de 360,2 kg. La fijación de esa cantidad de ozono tiene un valor económico equivalente de 9631,67 €/año.
- Respecto al dióxido de nitrógeno (NO2) se elimina un total de 84,4 kg al año (337,2 €/año)
- El dióxido de sulfuro (SO2) se fija en una cantidad anual de 41,3 kg (60,12 €/año)
- El monóxido de carbono (CO) y las partículas interiores a 2,5 micrones (PM2.5) se eliminan en cantidades inferiores, pero no por ello son menos importantes, pues aparte del valor asociado a su eliminación también favorece el aumento de la calidad del aire.

De forma general, **el arbolado de San Agustín del Guadalix elimina un total de 492,33 kg de partículas contaminantes al año, con un valor asociado de 10.070,2 €.**

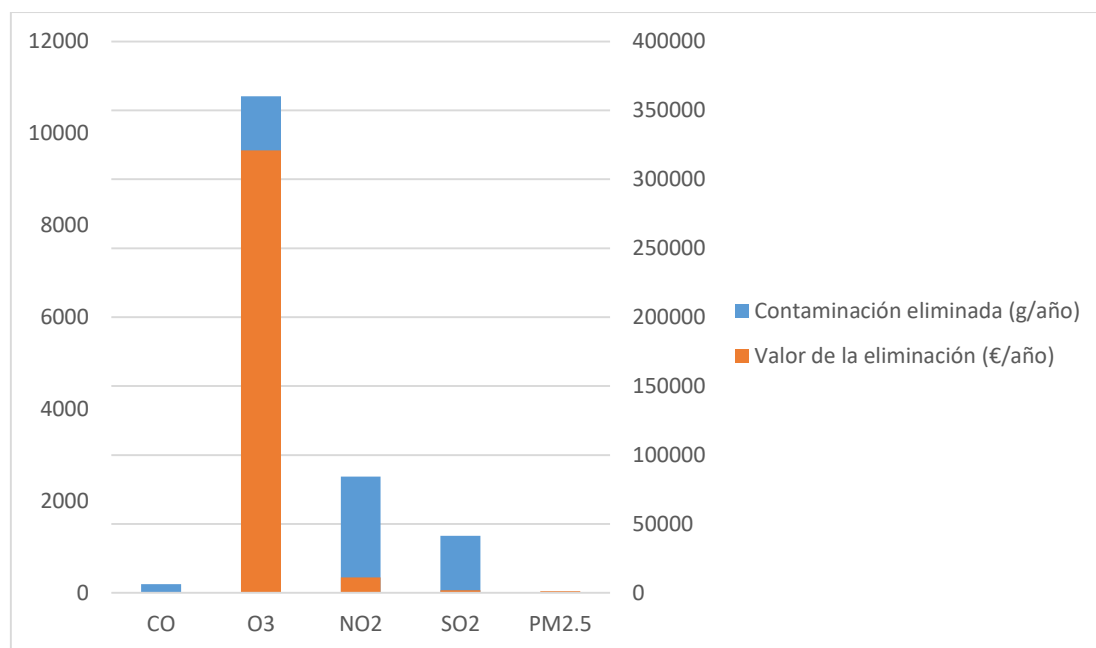


Figura 19. Eliminación de partículas contaminantes (g/año – eje derecho) y valor asociado de la eliminación (€/año – eje izquierdo)

El modelo utilizado para el análisis permite observar la evolución de la fijación de contaminantes durante un año, siendo interesante para una mejor comprensión de los procesos que se llevan a cabo (Figura 20)

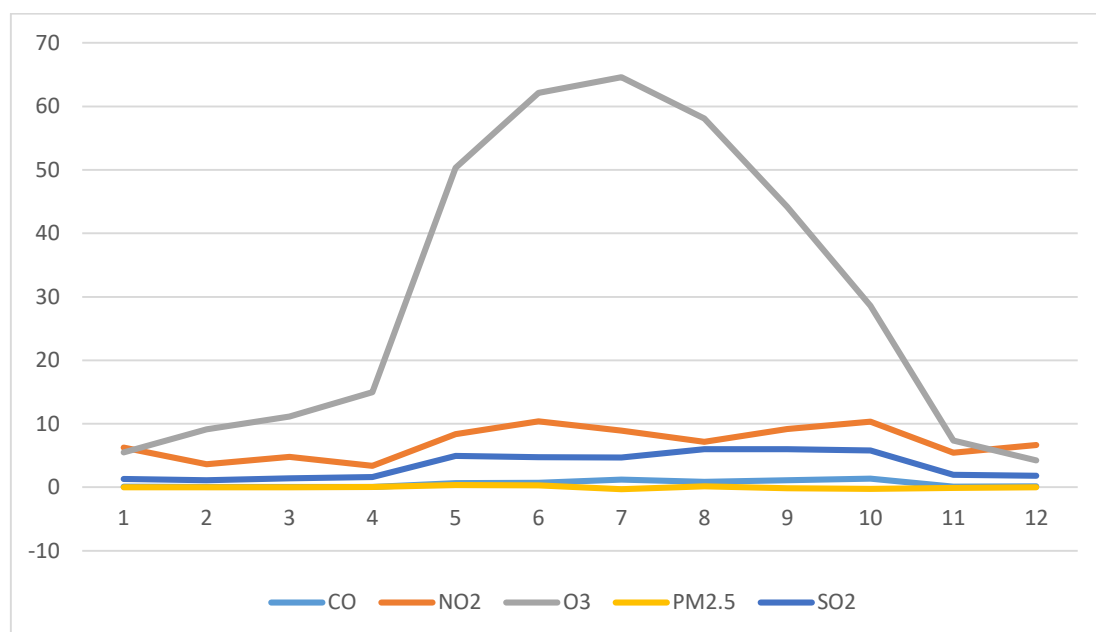


Figura 20. Eliminación de partículas contaminantes (kg) a lo largo de un año.

El ozono (O3) es el elemento que presenta una mayor variación, mientras las demás partículas muestran una tendencia uniforme. El ozono alcanza los niveles más altos de eliminación durante los meses comprendidos entre abril y septiembre (primavera-verano); a medida que se aproxima el otoño, coincidiendo con la caída de las hojas, la tendencia disminuye y no repunta hasta la llegada de la primavera (un bosque urbano con una representación equilibrada de especies caducifolias y perennifolias, garantizará una eliminación de contaminantes más estable). Dicha oscilación puede producirse debido a la influencia foliar en la fijación de ozono o a una combinación de fenómenos externos (climáticos y contaminantes)

Respecto a las partículas menores a 2,5 micrones (PM2.5) presenta valores negativos durante algunos meses. Los árboles eliminan PM2.5 cuando dichas partículas se depositan en sus hojas, una vez en las hojas pueden volver a suspenderse en la atmosfera o pueden disolverse a través de la lluvia. La eventualidad de factores meteorológicos como la lluvia, supone que en algunos casos la eliminación de este tipo de partículas pueda ser negativa. Sin embargo, tal como queda reflejado en la Figura 20, el balance anual de eliminación es positivo.

4.2.2. Almacenamiento y secuestro de carbono

- **Almacenamiento de carbono**

En la Figura 21 se observan las especies presentes en San Agustín del Guadalix que mayor cantidad de carbono contienen en sus tejidos. Dichos valores están determinados por el tamaño de los ejemplares (a mayor desarrollo, mayor retención) y por el número en que se encuentra representada cada especie, siendo las especies más abundantes y de mayor tamaño las que alcanzan valores más elevados (plátanos, moreras, olmos chopos o falsas acacias)

El almacenamiento de carbono muestra la cantidad de carbono que sería liberado a la atmósfera en caso de muerte y descomposición del árbol. Por ello es fundamental realizar una correcta gestión del arbolado con la que alcanzar un estado saludable del conjunto, favoreciendo la fijación de carbono y evitando su liberación a la atmósfera.

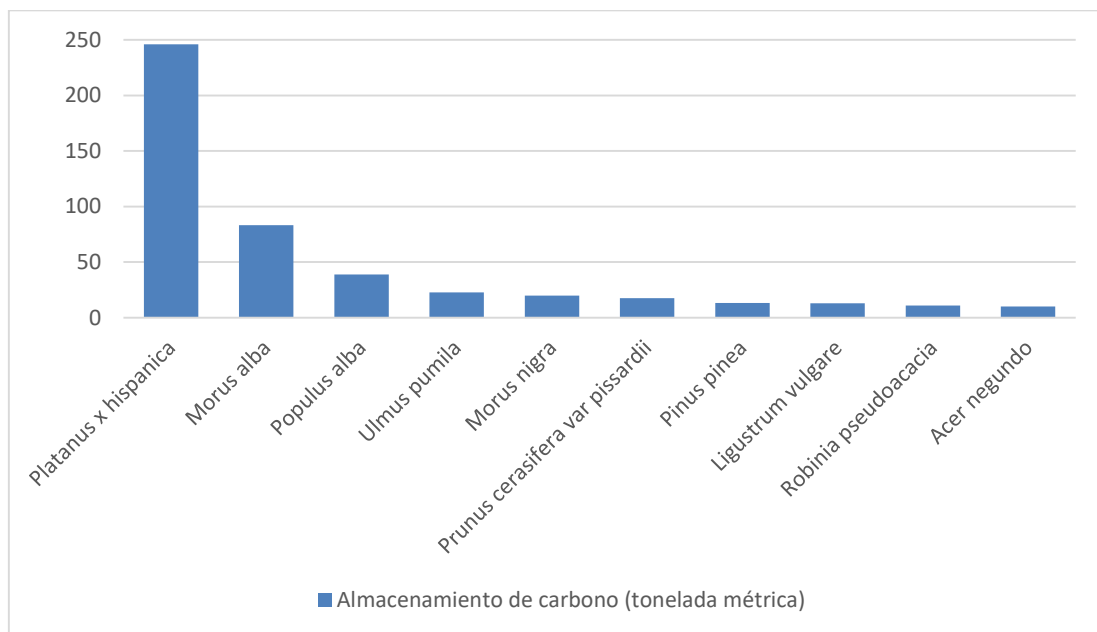


Figura 21. Almacenamiento de carbono de las especies más representativas.

El **almacenamiento de carbono** total del conjunto de árboles inventariados en San Agustín del Guadalix es de **563,1 toneladas que equivale a un valor de 90.500 €.**

- **Secuestro de carbono**

De forma análoga al caso anterior, el secuestro de carbono aumenta con el tamaño y la salud de los ejemplares. Siendo otro factor a favor de que una buena gestión del arbolado permite mejorar los servicios ambientales generados.

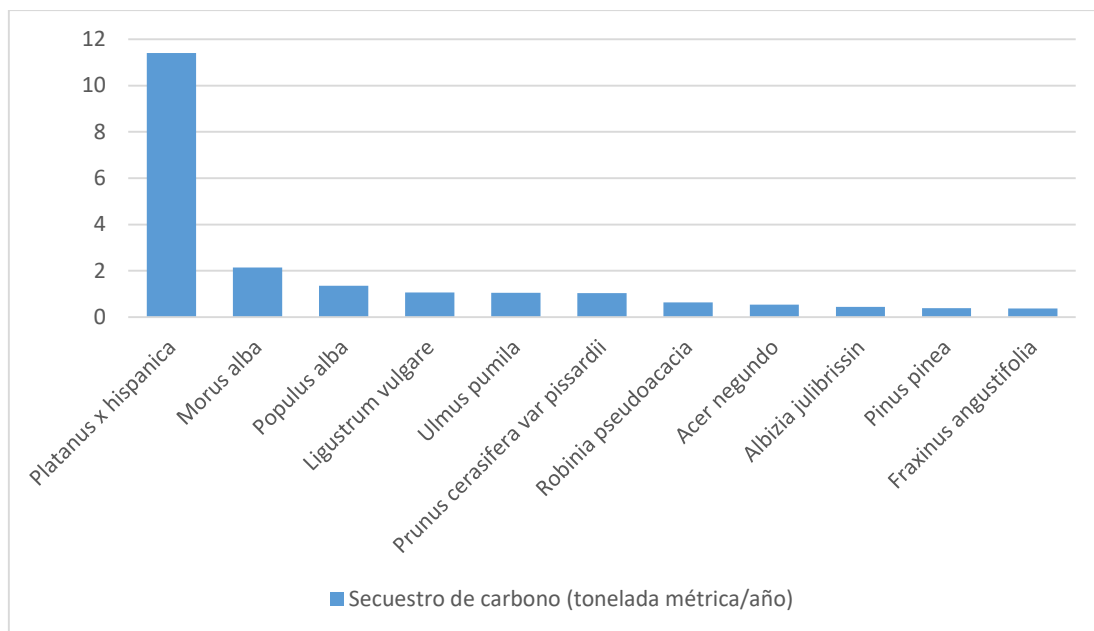
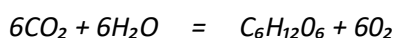


Figura 22. Secuestro de carbono de las especies más representativas.

El **secuestro de carbono** total generado por el conjunto de árboles presentes en San Agustín del Guadalix alcanza una cifra de **24,73 toneladas al año, con un valor asociado de 3.970 €/año**. La cifra equivalente en términos de dióxido de carbono (CO₂) es de 90,68 toneladas al año.

4.2.3. Producción de oxígeno

La producción de oxígeno es uno de los beneficios proporcionados por el arbolado más comúnmente extendido, se genera durante la reacción química de la fotosíntesis:



Por tanto, tiene una relación directa con la cantidad de carbono secuestrado, el cual está vinculado a la biomasa del árbol. En la Tabla 5 se representa la producción de oxígeno de las especies más abundantes del arbolado de San Agustín del Guadalix, así como la relación directa con el secuestro bruto de carbono.

Especie	Nº de pies	Oxígeno (tonelada métrica)	Secuestro bruto de carbono (tonelada métrica)	Área foliar (hectáreas)	Media Oxígeno/pie (tonelada métrica/pie)
<i>Platanus x hispanica</i>	1146	30,42	11,41	23,15	0,026
<i>Morus alba</i>	276	5,73	2,15	3,81	0,020
<i>Populus alba</i>	66	3,60	1,35	3,01	0,054
<i>Ligustrum vulgare</i>	194	2,82	1,06	0,35	0,014
<i>Ulmus pumila</i>	79	2,79	1,05	1,81	0,035
<i>Prunus cerasifera var pissardii</i>	152	2,74	1,03	0,54	0,018
<i>Robinia pseudoacacia</i>	96	1,71	0,64	1,00	0,017
<i>Acer negundo</i>	80	1,43	0,54	0,84	0,018
<i>Albizia julibrissin</i>	96	1,16	0,44	1,01	0,012
<i>Pinus pinea</i>	55	1,03	0,39	0,67	0,019
<i>Fraxinus angustifolia</i>	184	0,98	0,37	1,03	0,005
<i>Acer saccharinum</i>	72	0,71	0,27	0,64	0,01
<i>Acer rubrum</i>	59	0,63	0,23	0,25	0,01
<i>Catalpa bignonioides</i>	44	0,59	0,22	0,51	0,013
<i>Cupressus sempervirens</i>	41	0,53	0,20	0,23	0,013

Tabla 5. 15 especies más productoras de oxígeno en San Agustín del Guadalix (en verde las dos especies de mayor producción de oxígeno por pie)

En términos generales, considerando la totalidad del arbolado presente en San Agustín del Guadalix la **producción total de oxígeno (O₂) es de 65,95 toneladas al año.**

Considerando la media de oxígeno producido por pie, se pueden definir a los plátanos, olmos, álamos, moreras y pinos como las especies que más volumen de oxígeno generan.

- Un álamo de San Agustín aporta 54 kg de oxígeno al año y el conjunto de álamos presentes en el pueblo producen un total de 3.600 kg de O₂ al año.
- Un ejemplar de plátano - 26 kg de oxígeno al año
- Un olmo – 35 kg de oxígeno al año.

4.2.4. Valores estructurales y funcionales

- Valores estructurales del arbolado de San Agustín del Guadalix: Los árboles cuentan con un valor basado en el propio árbol, y es el costo de tener que remplazar el árbol por otro de características similares (valor estructural)

Dentro del valor estructural se puede incluir el valor correspondiente al carbono almacenado en los tejidos del ejemplar. Por lo que el valor total del bosque urbano a nivel estructural es el siguiente:

Valor estructural	3,93 millones de euros
Almacenamiento de carbono	90.500 €
Total valores estructurales	4.020.500 €

Tabla 6. Cuadro del conjunto de valores estructurales asociados al bosque urbano de San Agustín del Guadalix.

- Valores funcionales. Analizados en apartados anteriores, se agrupan como conjunto representativo de los beneficios y servicios derivados de las funciones de los árboles (secuestro de carbono, producción de oxígeno, eliminación de contaminantes...)

Secuestro de carbono	3.970 €/año
Eliminación de la contaminación	10.100 €/año
Total valores funcionales	14.070 €/año

Tabla 7. Cuadro del conjunto de valores funcionales asociados al bosque urbano de San Agustín del Guadalix.

Estos son valores funcionales estimados para un año, teniendo en cuenta la edad media del arbolado (20 años), se puede hacer una extrapolación aproximada del valor funcional total que ha generado el arbolado durante su desarrollo. Para una edad media de 20 años el valor funcional total del bosque urbano de San Agustín del Guadalix rondaría la cifra de 280.000€.

***NOTA:** Se trata de una consideración aproximada pues los beneficios generados no son iguales todos los años, si no que se ven incrementados con el desarrollo de los árboles*

4.2.5. Valor de importancia (I.V – “Importance Value”)

Las principales especies del arbolado de San Agustín del Guadalix en cuanto a su valor de importancia (IV) se muestran en la siguiente tabla.

Especie	Porcentaje de población (%)	Porcentaje del área foliar (%)	Valor de importancia (I.V)
<i>Platanus x hispanica</i>	32,7	53,7	86,4
<i>Morus alba</i>	7,9	8,8	16,7
<i>Populus alba</i>	1,9	7	8,9
<i>Fraxinus angustifolia</i>	5,3	2,4	7,7
<i>Ulmus pumila</i>	2,3	4,2	6,5
<i>Ligustrum vulgare</i>	5,5	0,8	6,3
<i>Prunus cerasifera var pissardii</i>	4,3	1,2	5,6
<i>Albizia julibrissin</i>	2,7	2,3	5,1
<i>Robinia pseudoacacia</i>	2,7	2,3	5,1
<i>Acer negundo</i>	2,3	1,9	4,2
<i>Acer saccharinum</i>	2,1	1,5	3,5
<i>Pinus pinea</i>	1,6	1,5	3,1
<i>Catalpa bignonioides</i>	1,3	1,2	2,4
<i>Acer rubrum</i>	1,7	0,6	2,3
<i>Pyrus calleryana</i>	1,8	0,4	2,2

Tabla 8. Especies más destacadas en cuanto a su valor de importancia dentro del arbolado de San Agustín del Guadalix.

El valor de importancia tiene en cuenta tanto la cantidad de árboles, por los que se encuentra representada la especie, como el área foliar. Siendo plátanos, moreras, chopos, fresnos y olmos aquellos con una consideración mayor. Constituye un valor de gran interés durante los procesos de selección de especies para implantar en el territorio, sin embargo, también se deben tener en cuenta otros factores como la biodiversidad, adaptación al clima o tipología del espacio de plantación (la selección de especies no se puede limitar sobre un único aspecto, ya que no sería la opción más adecuada)

4.2.6. Aplicación divulgativa y consultiva de los servicios ecosistémicos

Tal como se ha descrito en otros apartados del presente estudio, la aplicación SIG creada con la información del bosque urbano, representa una herramienta muy potente tanto en materia de gestión como en el ámbito de la divulgación y concienciación social.

En dicha aplicación se ha incorporado una pestaña de servicios ecosistémicos, donde se muestran los resultados obtenidos con el software i-Tree Eco para cada uno de los árboles inventariados. De esta manera, la información de los servicios ecosistémicos está disponible para cualquier ciudadano que desee conocer los beneficios ambientales que le proporcionan los árboles de su entorno.



Figura 23. Aplicación SIG que permite visionar los servicios ecosistémicos de cada uno de los árboles.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. IMPORTANCIA DEL ÁREA FOLIAR

Con el objetivo de obtener una visión general y alcanzar una mayor comprensión de los resultados obtenidos, se ha diseñado una tabla con las 15 especies más representativas del arbolado de San Agustín del Guadalix, en base al valor de importancia obtenido previamente (IV). Las especies se encuentran ordenadas de mayor a menor “valor de importancia (IV)”, mostrando para cada una de ellas la media de los servicios ecosistémicos producidos por pie. Además, se incorpora una columna que representa la media del área foliar de cada especie por individuo.

La finalidad del siguiente análisis es evaluar la influencia del área foliar en la producción de servicios ecosistémicos, teniendo en cuenta para ello las especies de mayor importancia dentro del territorio estudiado.

En color verde se encuentran marcados aquellos valores más altos para cada parámetro considerado y en naranja los valores mínimos.

Especie	IV	Media eliminación contaminantes/ pie	Media almacenamiento de carbono/pie	Media secuestro de carbono/pie	Producción de oxígeno/pie	Media área foliar/pie
<i>Platanus x hispanica</i>	86,4	0,0002	0,2147	0,0100	0,0265	0,0202
<i>Morus alba</i>	16,7	0,0001	0,3016	0,0078	0,0208	0,0138
<i>Populus alba</i>	8,9	0,0005	0,5883	0,0205	0,0545	0,0456
<i>Fraxinus angustifolia</i>	7,7	0,0001	0,0213	0,0020	0,0053	0,0056
<i>Ulmus pumila</i>	6,5	0,0003	0,2861	0,0133	0,0353	0,0229
<i>Ligustrum vulgare</i>	6,3	0,0000	0,0673	0,0055	0,0145	0,0018
<i>Prunus cerasifera var pissardii</i>	5,6	0,0001	0,1147	0,0068	0,0180	0,0036
<i>Robinia pseudoacacia</i>	5,1	0,0001	0,1130	0,0067	0,0178	0,0104
<i>Albizia julibrissin</i>	5,1	0,0001	0,0559	0,0046	0,0121	0,0105
<i>Acer negundo</i>	4,2	0,0001	0,1259	0,0068	0,0179	0,0105
<i>Acer saccharinum</i>	3,5	0,0001	0,0442	0,0038	0,0099	0,0089
<i>Pinus pinea</i>	3,1	0,0002	0,2422	0,0071	0,0187	0,0122
<i>Catalpa bignonioides</i>	2,4	0,0002	0,0955	0,0050	0,0134	0,0116
<i>Acer rubrum</i>	2,3	0,0000	0,0281	0,0039	0,0107	0,0042
<i>Pyrus calleryana</i>	2,2	0,0000	0,0362	0,0030	0,0081	0,0029

Tabla 9. Análisis de los valores medios de las 15 especies con mayor valor de importancia (IV). Resaltado en verde se encuentran los parámetros más altos y en naranja los más bajos.

En líneas generales se observa la clara influencia del área foliar en la cantidad de servicios ecosistémicos generados. Aquellas especies que cuentan con un área foliar superior generan los valores más elevados para la mayoría de parámetros analizados. Mientras que las especies con menor área foliar, generalmente obtienen unos resultados inferiores.

Sin embargo, existen especies que muestran una eficiencia muy superior en la cantidad de beneficios aportados (olmos y álamos), respecto a otras en las que, a pesar de los buenos resultados, no constituyen la especie más eficiente (plátanos), quedando claramente de manifiesto a través del siguiente ejemplo:

- A igualdad de área foliar, para el caso de San Agustín del Guadalix, los olmos (*Ulmus pumila*) obtienen unos resultados muy superiores a los plátanos (*Platanus x hispanica*). Por tanto, a pesar de la gran influencia de la superficie foliar, existen especies más eficientes en cuanto a maximizar los beneficios proporcionados dentro del territorio estudiado. En este aspecto se debe destacar la influencia de otros factores, como la adaptación de las especies tanto al clima como a las características de la ciudad en cuestión.

A través de una valoración de servicios ecosistémicos se pueden observar las especies que proporcionan unos mejores resultados bajo el contexto específico de cada ciudad, siendo un aspecto muy interesante a incorporar durante la planificación y la selección de futuras especies.

Especies como *Pyrus calleryana*, *Acer rubrum*, *Acer saccharinum* o *Fraxinus angustifolia* cuentan con valores bajos en cuanto a su área foliar media, lo que se traduce en la obtención de resultados inferiores en el conjunto de parámetros analizados respecto al resto de especies. Por otra parte, especies como *Platanus x hispanica*, *Ulmus pumila*, *Pinus pinea*, *Morus alba* o *Populus alba* son los que presentan mayor área foliar, obteniendo datos muy superiores para cada uno de los servicios propuestos, siendo las especies más eficientes los olmos y álamos.

En cuanto a *Morus alba*, a pesar de no presentar un área foliar elevada, alcanza el segundo valor más alto en almacenamiento de carbono. Dichos resultados se deben a estos factores:

- Se trata de una especie muy afectada por los terciados continuos, lo que provoca la existencia de árboles longevos con troncos gruesos pero que a su vez presentan una copa muy reducida (limitada por los terciados)
- Es una de las especies que cuenta con mayores diámetros del tronco dentro del inventario, lo que permite almacenar una gran cantidad de carbono en sus tejidos. Sin

embargo, su copa escasa minimiza la generación de los servicios ecosistémicos que se encuentran asociados al área foliar.



Figura 24. Ejemplos de moreras bajo terciados continuos que condicionan su estructura. Resultado: árboles con troncos gruesos que almacenan gran cantidad de carbono, pero copas pequeñas que limitan el aporte de servicios ecosistémicos asociados al área foliar.


Destacar los resultados obtenidos para la especie *Ligustrum vulgare*. Cuenta con un área foliar reducida, sin embargo, alcanza valores intermedios en tres de los cuatro parámetros analizados (almacenamiento de carbono, secuestro de carbono y producción de oxígeno) Al tratarse de un árbol perenne, a pesar de su baja área foliar, es capaz de mantener unas cifras adecuadas a lo largo del año. Este hecho pone de manifiesto la importancia de buscar una presencia equilibrada de árboles siempre verdes (pinos, aligustres, cedros) y otros caducifolios (olmos, plátanos, arces), ya que se asegura una producción más estable durante todo el año.

De igual manera, resaltar la importancia de emplear ejemplares o especies adaptadas a la contaminación, pues favorece la presencia de árboles sanos y mejoran los servicios ofrecidos al ciudadano.

5.2. IMPORTANCIA DE LOS ÁRBOLES GRANDES EN LA GENERACIÓN DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS

Se han seleccionado 4 árboles del inventario, 2 plátanos y 2 cipreses, con tamaños diferentes para realizar una comparativa entre los servicios proporcionados por un ejemplar de dimensiones reducidas con otro de mayor tamaño.

Se han seleccionado ejemplares con condiciones altas de salud, para conseguir una comparación lo más real y precisa posible.



	<i>Platanus x hispanica</i> (ID 2249)	<i>Platanus x hispanica</i> (ID 2410)	<i>Cupressus sempervirens</i> (ID 1609)	<i>Cupressus sempervirens</i> (ID 1822)
D (cm)	39	16	31	14
H (cm)	10,8	4,0	11,6	3,4
Área foliar (m ²)	369,9	24,2	169,2	4,9
Eliminación de contaminantes (g/año)	422,5	27,7	193,3	5,6
Secuestro de carbono (kg/año)	19,0	4,8	10,2	4,7
Almacenamiento de carbono (kg)	557,1	62,6	322,5	63,5
Producción de oxígeno (kg/año)	50,6	12,7	27,1	12,5

Tabla 10. Comparativa entre ejemplares de distinto tamaño.

A través de esta comparativa entre ejemplares de distinto tamaño, queda de manifiesto el incremento de los beneficios proporcionados por los árboles a medida que aumentan sus dimensiones. Destacando especialmente la influencia de la copa, representada por el área foliar.

Un aumento en el área foliar del ejemplar genera un incremento de similares proporciones en la fijación de partículas contaminantes, existiendo una relación directa entre este parámetro y el área foliar (las partículas contaminantes se eliminan a través de las hojas, a mayor copa existente - mayor superficie para fijar y eliminar partículas). Resultado obtenido para ambas

especies seleccionadas, a pesar de tratarse de especies de características muy diferentes como son los plátanos y los cipreses (multiplicándose hasta 15 veces en el caso de los plátanos y 34 veces en los cipreses)

El almacenamiento de carbono es el segundo parámetro que aumenta en mayor proporción. El carbono se integra en los tejidos de los distintos elementos que conforman un árbol, por lo que existe una gran influencia con el tamaño del tronco y la altura de los ejemplares. El tronco constituye el principal almacén de carbono en los árboles, a medida que aumenta el tronco en grosor y altura la cantidad de carbono presente en sus tejidos será superior (multiplicándose hasta 9 veces como se muestra en la comparativa de los plátanos)

La producción de oxígeno y el secuestro de carbono sufren un incremento homólogo, pues se encuentran íntimamente relacionados, ya que se generan a partir del mismo proceso químico, la fotosíntesis. En la comparativa de los plátanos, la producción de oxígeno y secuestro de carbono es hasta 4 veces superior, mientras que en el caso de los cipreses es dos veces superior. Representan valores menos elevados respecto al resto de parámetros analizados, sin embargo, sigue constituyendo un aumento significativo en ambos casos.

Comprobada la relación existente entre el área foliar, el tamaño de los árboles y los servicios proporcionados, mencionar la importancia de llevar a cabo buenas prácticas de mantenimiento del arbolado.

El terciado es una práctica ampliamente extendida en la poda de árboles, abusando de ella en la mayoría de casos. Con el terciado se reduce la longitud de las ramas de la copa hasta dos tercios, y tal como se ha visto, una reducción en el área foliar supone una disminución similar en los servicios proporcionados por el árbol en cuestión (se limita enormemente el aporte de servicios ecosistémicos y por ende los beneficios para los ciudadanos) Los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de llevar a cabo una planificación en la que guiar a los árboles en su desarrollo, evitando abusar de algunas prácticas como el terciado, y potenciar la presencia de árboles grandes, sanos y vigorosos que puedan maximizar los servicios ecosistémicos generados.



Figura 25. Comparativa entre ejemplares de Platanus x hispanica. Izquierda: ejemplar terciado sobre el que se observa una estructura comprometida y una gran limitación en el desarrollo de su copa, y por ende de los servicios ecosistémicos generados; derecha: ejemplar sin terciar que goza de una estructura natural totalmente cohesionado, donde se podrá maximizar el desarrollo de la copa y de los servicios ecosistémicos proporcionados.



Figura 26. Comparativa entre ejemplares de Morus alba. Izquierda: ejemplar terciado sobre el que se observa una estructura comprometida y una gran limitación en el desarrollo de su copa, y por ende de los servicios ecosistémicos generados; derecha: ejemplar sin terciar que goza de una estructura natural totalmente cohesionado, a pesar de ser un ejemplar más joven el tamaño de la copa es muy superior (se podrá maximizar el desarrollo de la copa y de los servicios ecosistémicos proporcionados)

5.3. EQUIVALENCIAS DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS EN RELACIÓN A LAS EMISIONES DE VEHÍCULOS Y VIVIENDAS.

Para el cálculo de las emisiones por vehículo i-Tree Eco tiene en cuenta los índices de emisión de vehículos ligeros (g/mi) para CO, NO₂, COV, PM₁₀, SO₂ de 2010 (Buró de Estadística del Transporte 2010; Heirigs et al 2004) y las millas promedio recorridas por vehículo en 2011 (Administración Federal de Caminos 2013).

Las emisiones de las viviendas se basan en la energía promedio utilizada (electricidad, gas natural, gasolina, madera) por vivienda en 2009 (Administración de Información de Energía 2013; Administración de Información de Energía 2014).

Una vez realizadas estas equivalencias se concluye que **el almacenamiento de carbono del arbolado de San Agustín del Guadalix equivale a las emisiones anuales aproximadas de 439 vehículos o a las emisiones generadas por 180 viviendas unifamiliares.**

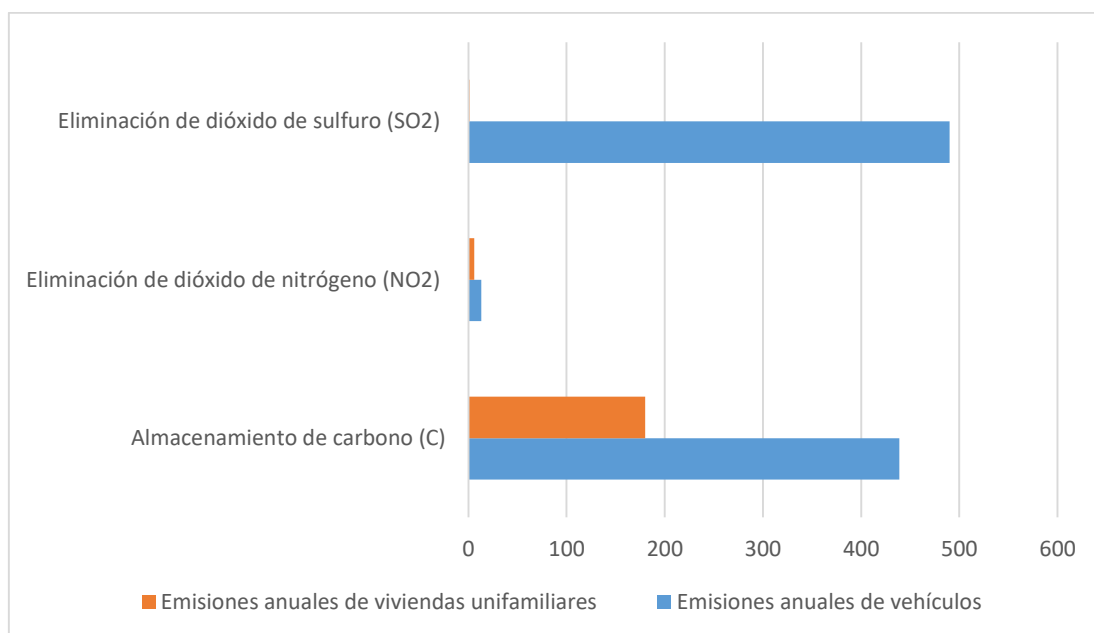


Figura 27. Equivalencias de los servicios ecosistémicos producidos por el arbolado de San Agustín del Guadalix.

6. CONCLUSIONES

El análisis de los servicios ecosistémicos del arbolado de San Agustín del Guadalix, permite tener una mayor concienciación sobre el valor de los bosques urbanos. Cuantificar los beneficios proporcionados por el arbolado otorga una relevancia que hasta ahora no se había alcanzado, pues los servicios ambientales quedaban relegados a una posición secundaria durante los procesos de toma de decisiones y planificación, debido a la complejidad en su valoración.

Los resultados totales obtenidos se muestran a modo resumen en la siguiente tabla. El anexo I contiene los resultados de los parámetros analizados en función de la especie.

Servicio ecosistémico	Cantidad	Valor
Fijación de contaminantes	492,3 kg/año	10.070 €/año
Almacenamiento de carbono	563.100 kg	90.500 €
Secuestro de carbono	24.730 kg/año	3.970 €/año
Producción de oxígeno	65.950 kg/año	-
Valor estructural	-	3.930.000 €

Tabla 11. Resultados servicios ecosistémicos del arbolado de San Agustín del Guadalix.

El arbolado de San Agustín del Guadalix tiene un valor estructural total (considerando estructura y carbono almacenado en sus tejidos) de más de 4 millones de euros. Mientras que el valor funcional (incluye fijación de contaminantes y secuestro de carbono) considerando una edad media del arbolado inventariado de 20 años aproximadamente, alcanzaría la cifra de 280.000€*. Hay que tener en cuenta los años que lleva el arbolado produciendo servicios y aportando beneficio.

***NOTA:** *Se trata de una consideración aproximada pues los beneficios generados no son iguales todos los años, si no que se ven incrementados con el desarrollo de los árboles**

Es importante destacar no solo las cifras en términos monetarios que permiten dar una mayor visibilidad a los recursos, si no, a la gran repercusión que tienen los servicios ambientales del arbolado sobre nuestra salud y bienestar:

- Se fijan más de 400 kilogramos de partículas contaminantes al año, mejorando la calidad del aire y disminuyendo la aparición de patologías respiratorias.

- Actúan como sumideros de carbono, secuestrando y almacenando en sus tejidos grandes cantidades de este elemento. Constituyendo una de las principales herramientas con las que mitigar el cambio climático.
- Se producen más de 65.000 kilogramos de oxígeno al año, indispensable para el desarrollo de la vida.

Además, se debe sumar la gran cantidad de servicios que no se pueden cuantificar y no por ello son menos importantes:

- El valor estético y paisajístico, haciendo el territorio más atractivo. La presencia de árboles genera un sentimiento de arraigo y pertenencia a los habitantes de la zona.
- El desarrollo como persona, las zonas verdes mejoran la salud mental y el equilibrio psíquico, además son fundamentales en el desarrollo de relaciones interpersonales.
- Valores culturales, el desarrollo cultural del ser humano siempre ha ido ligado a elementos naturales.
- La regulación hídrica, mejorando la calidad del agua y favoreciendo la recarga de acuíferos. Control de la erosión, pues la vegetación amortigua la acción de agentes erosivos.
- Reducción de temperaturas y aporte de sombra.

6.1. LÍNEAS ESTRATÉGICAS PARA LA GESTIÓN DEL BOSQUE URBANOS

El mantenimiento y el buen funcionamiento de los ecosistemas urbanos constituyen la base para un desarrollo sostenible y resiliente del municipio, puesto que ejercen una influencia positiva en el bienestar del ser humano y en la actividad económica. De ahí, la importancia de incorporar valoraciones de este tipo en el desarrollo de planes de gestión.

El arbolado de San Agustín del Guadalix está caracterizado por la falta de diversidad específica, junto al tamaño medio reducido de los ejemplares. Una adecuada planificación que permita maximizar el crecimiento de los ejemplares, en condiciones de salud adecuadas, tendría consecuencias directas sobre los servicios ecosistémicos. Tal como se ha demostrado líneas arriba, potenciar un arbolado de mayor dimensión con una mayor proporción de copa, generaría

un incremento en los servicios ecosistémicos aportados (mejor calidad del aire, sombra, incremento del valor estructural, componente estético, mayor fijación de carbono...)

Es indispensable elaborar planes y estrategias con las que maximizar el desarrollo del arbolado sano, guiándolo desde su plantación, y así, evitar conflictos futuros derivados de una mala elección de especie o falta de espacio. Asimismo, se deben llevar a cabo unas correctas labores de mantenimiento, evitando abusar de prácticas como el terciado. A continuación, se muestran una serie de directrices o estrategias recomendadas sobre la gestión del bosque urbano con las que mejorar la resiliencia y sostenibilidad en la ciudad de San Agustín de Guadalix:

ESTRATEGIA	RESULTADO
Potenciar la biodiversidad y limitar el arbolado monoespecífico (evitar que una especie supere el 10% del bosque urbano)	Mejor capacidad de respuesta ante cambios (Mayor resiliencia)
Aumentar el número de árboles saludables	Aumenta la eliminación de contaminantes
Potenciar árboles grandes, con mayor copa	Tienen mayores beneficios por árbol
Equilibrio entre árboles de hoja caduca y perenne	Mantener la fijación de partículas todo el año
Realizar una selección de especies adecuada (adaptadas al clima y a las condiciones de la ciudad)	Mejora la salud del árbol
Implantar árboles en zonas de estacionamiento	Reduce las emisiones de los vehículos y proporciona mayor confort térmico
Integrar el arbolado en el diseño y planificación de la ciudad (visión integradora) Adecuar las especies y la tipología de la plantación al espacio disponible o tipo de vía existente.	Se maximizan los beneficios ecosistémicos y se reducen los conflictos con las actividades de la ciudad (tráfico, problemas de raíces, proximidad a fachadas)
Realizar un mantenimiento adecuado y respetuoso con el árbol	Maximizar su desarrollo para maximizar los servicios generados. Además de favorecer estructuras seguras en el arbolado, donde se limiten los riesgos
Proporcionar mayor información a la población (concienciar y divulgar)	Sociedad más cercana a la naturaleza

Tabla 12. Estrategias recomendadas sobre la gestión del bosque urbano.

A través de una buena planificación se pueden maximizar los beneficios generados por los servicios ecosistémicos.

Con el fin de demostrar la importancia del seguimiento y manejo de los bosques urbanos se ha realizado una estimación teniendo en cuenta los beneficios generados por el arbolado de San Agustín del Guadalix hasta la fecha y la posible evolución en los próximos 15 años. Incrementándose enormemente el valor económico del arbolado a medida que se desarrollan los ejemplares.

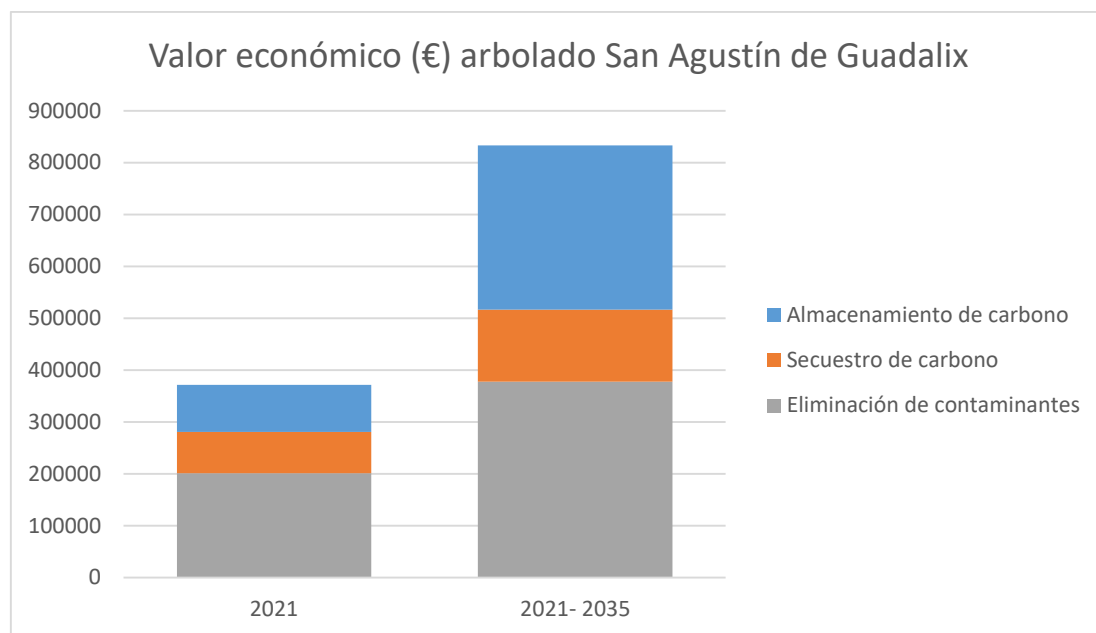


Figura 28. Estimación de la posible evolución del valor económico del arbolado de San Agustín del Guadalix.

Como última conclusión se debe resaltar lo siguiente: según se ha podido comprobar, la cuantificación de servicios ecosistémicos tiene una gran importancia y debe formar parte de los procesos de planificación y gestión, pero debe incorporarse como parte de un conjunto en el que se tengan en cuenta todos los factores implicados. Es decir, el éxito de la gestión se alcanza considerando todas las variables posibles (evitar limitar las decisiones sobre un único aspecto) y seleccionando la opción más eficaz acorde a las variables analizadas.

En la gestión y planificación del arbolado urbano se deben considerar un elevado número de variables, entre las que se encuentran:

- Servicios ecosistémicos proporcionados, especies más eficientes.
- Especies presentes (biodiversidad existente)
- Distribución del arbolado (conectividad)
- Condiciones climáticas.

- Orientaciones y exposición al sol.
- Porte y tamaño de las especies.
- Tipología del espacio: calles, avenidas, parques, rotondas
- Usuarios habituales del espacio: vehículos, peatones, ciclistas, zona de trabajo, área de recreo...
- Espacio disponible, distancias de aceras, pavimentos, fachadas, alcantarillado...
- Espacio y marco de plantación: alcorque, parterre, zona ajardinada...
- Buenas prácticas de mantenimiento. En caso del arbolado, si se ha llevado a cabo una buena selección de especie en función de las variables anteriores, las actuaciones de mantenimiento serían puntuales.

Este conjunto de variables si se analizan durante la planificación urbanística facilitan una implantación de arbolado eficaz y adecuada a las características del entorno. Una visión integradora de la planificación urbanística permitiría el desarrollo de zonas urbanas integradas con la naturaleza, sostenibles y resilientes (maximizando la calidad de vida)

7. BIBLIOGRAFÍA

- **Calderón-Garcidueñas, L., Villarreal-Ríos, R. (2017).** Living close to heavy traffic roads, air pollution, and dementia. *The Lancet*, 2017, vol. 389, no 10070, p. 675-677.
- **Dale, A., Burch, S., Robinson, J. y Strashok, C. (2018).** Multilevel Governance of Sustainability Transitions in Canada: Policy Alignment, Innovation, and Evaluation. En E. K. Chu, S. Hughes y S. G. Mason, *Climate Change in Cities* (pp. 343-358). https://www.researchgate.net/publication/320183734_Climate_Change_in_Cities_Innovations_in_Multi-Level_Governance
- **Kampa, M., Castanas, E. (2008).** Human health effects of air pollution. *Environmental pollution*, 2008, vol. 151, no 2, p. 362-367.
- **Meerow, S., Newell, J. P., & Stults, M. (2016).** Defining urban resilience: A review. *Landscape and Urban Planning*, 147, 38–49.
- **MEA. (2005).** Evaluación de Ecosistemas del Milenio. *Ecosystems and human wellbeing: synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- **Nowak, D.J.; Crane, D.E.; Stevens, J.C.; Ibarra, M. (2002b).** Brooklyn’s urban forest. Gen. Tech. Rep. NE-290. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station. 107 p.
- **Nowak, D.J. (1994).** Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago’s urban forest. In: McPherson, E.G.; Nowak, D.J.; Rowntree, R.A., eds. *Chicago’s urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project*. Gen. Tech. Rep. NE-186. Radnor, PA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Forest Experiment Station: 83-94.
- **Nowak, D.J., Hirabayashi, S., Bodine, A., Greenfield, E. (2014).** Tree and forest effects on air quality and human health in the United States. *Environmental Pollution*. 193:119-129.
- **ONU. (2018).** Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo. *Centro de Noticias ONU*. Recuperado de [[Más de la mitad de la población vive en áreas urbanas y seguirá creciendo | Naciones Unidas](#)]
- **Santamour, F.S. (1990).** Trees for urban planting: Diversity, uniformity, and common sense. *Proceedings 7th Conference Metropolitan Tree improvement alliance*, 7: 57-65.
- **UN-Habitat. (2011).** *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements 2011*.
- **Van Essen, H.; Schroten, A.; Otten, M.; Sutter, D.; Schreyer, C.; Zandonella, R.; Maibach, M.; Doll, C. (2011).** *External Costs of Transport in Europe*. Netherlands: CE Delft. 161 p.

8. ANEXOS

8.1. ANEXO I - Resumen beneficios por especie

Especie	Árboles Número	Almacenamiento de carbono		Secuestro bruto de carbono		Eliminación de la contaminación		Valor estructural (€)
		(tonelada métrica)	(€)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	
<i>Abies alba</i>	5	1,41	227,22	0,04	5,72	0	33,25	12742,27
<i>Abies sp</i>	4	0,49	79,51	0,03	5,06	0	2,11	2438,18
<i>Acacia dealbata</i>	6	0,06	10,23	0	0,42	0	0,39	2032,82
<i>Acer campestre</i>	2	0,04	6,67	0	0,55	0	0,84	781,51
<i>Acer monspessulanum</i>	1	0,01	1,36	0	0,34	0	0,14	87,86
<i>Acer negundo</i>	80	10,07	1617,38	0,54	86,32	0,01	195,3	59889,03
<i>Acer opalus</i>	1	0,14	22,32	0,01	1,59	0	3,13	830,44
<i>Acer palmatum</i>	4	0,02	3,89	0	0,5	0	0,75	593,72
<i>Acer platanoides</i>	4	0,51	82,27	0,04	5,93	0	14,59	4533,17
<i>Acer pseudoplatanus</i>	35	2,65	425,79	0,17	26,54	0	38,12	26946,52
<i>Acer rubrum</i>	59	1,66	266,58	0,23	37,71	0	57,6	28944,38
<i>Acer saccharinum</i>	72	3,18	510,39	0,27	42,62	0,01	148,57	35641,48
<i>Aesculus hippocastanum</i>	19	1,98	317,91	0,11	18,26	0	47,54	17670,42
<i>Ailanthus altissima</i>	5	0,74	118,47	0,04	6,65	0	11,68	2884,39
<i>Albizia julibrissin</i>	97	5,38	862,83	0,44	70,19	0,01	235,31	83055,37

Especie	Árboles Número	Almacenamiento de carbono		Secuestro bruto de carbono		Eliminación de la contaminación		Valor estructural (€)
		(tonelada métrica)	(€)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	
<i>Arbutus unedo</i>	18	0,9	144,04	0,05	8,34	0	5,44	7741,94
<i>Betula pendula</i>	1	0,31	50,46	0,02	2,75	0	9,23	1815,16
<i>Broussonetia papyrifera</i>	7	0,53	85,8	0,02	3,41	0	12,64	10302,26
<i>Carpinus betulus</i> "Fastigiata"	6	0,37	60,04	0,03	4,3	0	5,16	4541,44
<i>Catalpa bignonioides</i>	44	4,2	674,09	0,22	35,75	0,01	119,05	53289,36
<i>Cedrus atlantica</i>	1	0,06	9,55	0	0,59	0	0,95	667,77
<i>Cedrus deodara</i>	11	5,94	953,9	0,18	28,79	0,01	103,02	34292,22
<i>Cedrus libani</i>	1	0,12	18,74	0,01	1,35	0	1,71	651,62
<i>Celtis australis</i>	52	1,15	185,4	0,07	11,95	0	53,4	40597,06
<i>Cercis siliquastrum</i>	11	0,17	27,75	0,02	3,49	0	4,44	4060,02
<i>Chamaecyparis lawsoniana</i>	5	0,61	98,7	0,03	4,32	0	13,34	5634,43
<i>Citrus x limon</i>	2	0,03	5,06	0,01	0,86	0	0,2	339,53
<i>Cordyline australis</i>	8	0,46	73,15	0,01	1,7	0	0,01	921,1
<i>Corylus colurna</i>	31	2,08	334,47	0,17	27,9	0	17,45	16967,66
<i>Cotinus coggygria</i>	1	0,05	8,57	0	0,67	0	0,19	754,68
<i>Crataegus laevigata</i>	17	0,15	24,4	0,02	3,92	0	2,39	2522,61
<i>Cupressus arizonica</i>	10	5,22	838,7	0,17	27,21	0	38,56	12345,84
<i>Cupressus sempervirens</i>	41	4,03	648,15	0,2	31,63	0	54,14	28193,94
<i>Cupressus sp</i>	1	0,16	26,47	0,01	1,84	0	0,26	677,45
<i>Cydonia oblonga</i>	3	0,04	6,75	0,01	1,24	0	1,05	487,68

Especie	Árboles Número	Almacenamiento de carbono		Secuestro bruto de carbono		Eliminación de la contaminación		Valor estructural (€)
		(tonelada métrica)	(€)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	
<i>Eriobotrya japonica</i>	8	0,42	67,86	0,04	5,7	0	2,83	4308,66
<i>Ficus carica</i>	4	0,25	39,89	0,02	3,75	0	3,14	2561,62
<i>Fraxinus americana</i>	25	0,65	104,91	0,07	11,27	0	15,92	10876,31
<i>Fraxinus angustifolia</i>	184	3,91	628,24	0,37	59,24	0,01	241,15	74930,26
<i>Ginkgo biloba</i>	3	0,02	2,87	0	0,27	0	1,15	1207,04
<i>Gleditsia triacanthos</i>	4	2,54	407,32	0,08	12,81	0	13,65	17668,97
<i>Hibiscus syriacus</i>	28	0,29	47,12	0,06	9,73	0	2,41	3096,87
<i>Juglans regia</i>	1	0	0,52	0	0,16	0	0,16	99,44
<i>Koelreuteria paniculata</i>	50	2,43	389,79	0,14	22,43	0	50,05	27764,28
<i>Lagerstroemia indica</i>	13	0,03	4,97	0,01	1,55	0	0,36	752,56
<i>Laurus nobilis</i>	16	0,8	128,92	0,06	9,3	0	4,71	4767,36
<i>Ligustrum lucidum</i>	1	0,03	4,52	0	0,42	0	0,34	541,43
<i>Ligustrum vulgare</i>	194	13,05	2096,52	1,06	169,72	0	81,02	118688,9
<i>Liquidambar styraciflua</i>	3	0,02	3,09	0	0,62	0	0,57	799,19
<i>Magnolia grandiflora</i>	6	0,1	16,42	0,01	1,89	0	2,52	2056,59
<i>Malus floribunda</i>	36	0,74	118,26	0,09	14,14	0	7,05	11867,78
<i>Malus sp</i>	4	0,11	17,35	0,01	1,61	0	0,93	1430,41
<i>Malus sylvestris</i>	15	0,2	32,23	0,03	4,35	0	1,93	3575,97
<i>Melia azedarach</i>	2	0,6	97,14	0,03	4,88	0	11,45	4206,67
<i>Morus alba</i>	276	83,23	13372,27	2,15	345,28	0,04	889,89	650603,1

Especie	Árboles Número	Almacenamiento de carbono		Secuestro bruto de carbono		Eliminación de la contaminación		Valor estructural (€)
		(tonelada métrica)	(€)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	
<i>Morus nigra</i>	28	19,68	3161,58	0,1	15,43	0,01	131,06	119225,4
<i>Nerium oleander</i>	4	0,1	16,46	0,01	1,97	0	2,36	1820,46
<i>Olea europaea</i>	24	5,12	822,04	0,14	22,54	0	14,08	33923,58
<i>Phoenix canariensis</i>	1	0,27	43,9	0	0,36	0	1,1	816,88
<i>Phoenix sp</i>	2	0,95	151,9	0	0,06	0	1,83	1379,33
<i>Photinia serrulata</i>	11	0,16	25,68	0,03	4,57	0	0,92	1791,7
<i>Picea abies</i>	10	0,57	90,81	0,02	3,97	0	14,18	6648,91
<i>Pinus pinea</i>	55	13,32	2140,77	0,39	61,89	0,01	155,85	114965,62
<i>Pinus sylvestris</i>	14	0,24	38,22	0,03	5,29	0	5,68	5834,19
<i>Platanus x hispanica</i>	1146	246	39523,72	11,41	1833,07	0,26	5408,87	1584994,05
<i>Platyclus orientalis</i>	19	0,43	68,71	0,04	6,82	0	4,9	4414,48
<i>Populus alba</i>	66	38,83	6238,7	1,35	217,03	0,03	704,21	152698,13
<i>Populus nigra</i>	35	2,98	478,47	0,19	31,31	0	82,07	23434,37
<i>Populus x canadensis</i>	2	0,81	130,06	0,03	5,27	0	6,74	3807,95
<i>Prunus americana</i>	2	0,91	146,51	0,03	4,73	0	3,79	3251,58
<i>Prunus avium</i>	2	0,42	67,89	0,02	3,46	0	3,34	2314,47
<i>Prunus cerasifera</i>	1	0,01	1,98	0	0,34	0	0,18	157,14
<i>Prunus cerasifera var pissardii</i>	152	17,43	2800,65	1,03	165,34	0,01	125,37	100915,66
<i>Prunus domestica</i>	4	1,42	228,56	0	0,78	0	9,15	3454,06
<i>Prunus dulcis</i>	14	2,07	333,35	0,13	20,55	0	10,29	12319,53
<i>Prunus sp</i>	3	0,31	49,98	0,02	2,74	0	1,58	1727,64

Especie	Árboles Número	Almacenamiento de carbono		Secuestro bruto de carbono		Eliminación de la contaminación		Valor estructural (€)
		(tonelada métrica)	(€)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	(tonelada métrica/año)	(€/año)	
<i>Punica granatum</i>	1	0,05	8,54	0	0,75	0	0,85	665,66
<i>Pyrus calleryana</i>	63	2,28	365,99	0,19	30,69	0	43,18	27856,7
<i>Pyrus communis</i>	1	0,2	32,79	0,01	2,18	0	1,01	1377,82
<i>Pyrus sp</i>	1	0,02	3,02	0	0,4	0	0,08	310,7
<i>Quercus faginea</i>	6	0,2	32,01	0,01	2,31	0	0,94	2019,18
<i>Quercus ilex</i>	10	3,79	609,17	0,07	12,02	0	12,97	16414,95
<i>Quercus robur</i>	3	0,34	55	0,02	2,98	0	8,52	2523,55
<i>Quercus rubra</i>	1	0	0,06	0	0,04	0	0,01	70,31
<i>Quercus suber</i>	2	0,14	21,99	0,01	1,2	0	0,84	1314,72
<i>Robinia pseudoacacia</i>	96	10,85	1743,17	0,64	102,91	0,01	233,95	86467,41
<i>Salix alba</i>	14	0,77	123,32	0,05	8,3	0	27,25	7811,85
<i>Salix babylonica</i>	2	1,92	308,75	0,06	9,85	0	6,68	3401,72
<i>Sophora japonica</i>	28	1,72	275,63	0,08	13,47	0	34,2	20099,75
<i>Syringa vulgaris</i>	1	0,01	1,44	0	0,3	0	0,06	115,31
<i>Tamarix gallica</i>	14	0,59	95,53	0,06	9,13	0	7,4	4953,93
<i>Taxodium huegelii</i>	3	0,08	13,24	0,01	0,94	0	0,77	907
<i>Thuja occidentalis</i>	2	0,11	17,95	0,01	0,9	0	0,41	1240,72
<i>Tilia cordata</i>	2	0,05	7,31	0	0,73	0	1,29	964,74
<i>Tilia platyphyllos</i>	11	0,3	48,92	0,03	4,43	0	8,19	5730,02
<i>Ulmus minor</i>	1	0,07	10,89	0	0,32	0	0,12	209,7
<i>Ulmus pumila</i>	79	22,6	3630,81	1,05	168,21	0,02	423,81	91893,89
<i>Washingtonia filifera</i>	15	0,17	26,62	0,01	1,45	0	1,61	12558,52
<i>Washingtonia robusta</i>	7	0,09	14,12	0	0,71	0	1	7448,28

INFORME

1. Condiciones técnicas y específicas del estudio.

Dada la tipología y la naturaleza del estudio, se requieren herramientas técnicas y capacidades específicas para el correcto desarrollo del trabajo.

De forma general se requiere un amplio conocimiento en las siguientes materias: Estadística, Botánica, Biología, Arboricultura o Matemáticas, principalmente.

La metodología llevada a cabo implica los siguientes procesos:

- Fase de trabajo de campo: Indispensable contar con una herramienta para la recolección de datos GIS, así como instrumentos para llevar a cabo las mediciones pertinentes (principalmente forcípula e hipsómetro láser).
Además de tener un amplio conocimiento de especies arbóreas (identificación) se debe tener experiencia en el trabajo de inventario de arbolado urbano, pues se requiere información específica en algunos de los atributos fijados (terciado, riesgo, muerte regresiva, copa faltante...)
- Depuración y procesado de base de datos: Se requiere soltura en el manejo de “Microsoft Office”, principalmente del programa Excel, necesario para procesar los datos de inventario. Además, se considera adecuado que la persona encargada de la depuración de datos sea la misma que llevó a cabo el inventario de campo (tal como se ha hecho en el presente estudio), de esta manera el procesado será más eficiente.
- Análisis con el software i –Tree Eco: Conocimiento y amplio manejo del software I –Tree Eco. Se trata de un programa específico para la valoración y cuantificación de los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado, estando especialmente diseñado para su aplicación en el ámbito urbano.
Se recomienda el haber asistido a alguno de los cursos online o talleres formativos impartidos por la Academia Internacional i – Tree
- Discusión de los resultados y elaboración del documento pertinente: En este aspecto se requieren dos aspectos principales:
 - Capacidad para la búsqueda de información potencialmente útil a través de la web, entre diferentes artículos científicos.
 - Buena capacidad de síntesis para la extracción y posterior redacción de aquella información relevante para la consecución de los objetivos del estudio.

2. Fases para la realización del estudio

1. Contextualización y requerimientos del Ayuntamiento.

El presente estudio se realiza a petición del Ayuntamiento de San Agustín del Guadalix. Por lo que en primer lugar se llevó a cabo una reunión con los representantes del Ayuntamiento donde se realizó una contextualización de la situación del municipio en relación al arbolado urbano y la gestión que se estaba aplicando:

- Escasa importancia del arbolado en la planificación urbana.
- Gestión y mantenimiento alejado de aspectos medioambientales o ecológicos.
- Carencia de un inventario de arbolado urbano.
- Población alejada de la naturaleza.

El Ayuntamiento expuso sus requerimientos y objetivos. La empresa SDL elaboró una propuesta enfocada en cumplir dichos aspectos:

- Elaboración de un inventario completo.
- Creación de una aplicación GIS
- Estudio, análisis y valoración de los servicios ecosistémicos (software i – Tree Eco)

2. Selección de los atributos del inventario.

Desde la empresa SDL se concretaron aquellos atributos más interesantes para realizar una caracterización completa del arbolado urbano de San Agustín del Guadalix (altura, estado fitosanitario, terciado, riesgo...). Además, se fijaron atributos específicos para el análisis con el software I –Tree Eco (muerte regresiva, copa faltante...)

3. Toma de datos en campo.

A través de un colector de datos y la instrumentación pertinente, se lleva a cabo el proceso de medición y recopilación de información para cada atributo definido previamente.

Instrumentación empleada para las mediciones:

- Forcípula de mano.
- Hipsómetro laser graduado (permite medir distancias y alturas).

4. Depurado y procesado de datos.

Trabajo de gabinete que consiste en depurar y procesar el conjunto de datos recopilados en campo, de tal manera que puedan ser utilizados en diferentes softwares y programas. Es una fase indispensable para trasladar toda la información del arbolado a una plataforma o base de datos que pueda ser una herramienta eficiente en la gestión y planificación del bosque urbano.

Además, en esta fase se extraerán de la base de datos estadísticas y gráficas que permiten llevar a cabo una caracterización del bosque urbano (especies presentes, distribución por tamaños, anomalías existentes...)

5. Análisis con el software i –Tree Eco.

La base de datos del inventario, una vez depurada, puede emplearse en el software i –Tree Eco para la realización del análisis y cuantificación de Servicios Ecosistémicos.

El software requiere una programación previa a la introducción de los datos del arbolado, además, el formato de la base de datos debe cumplir una serie de pautas para que pueda ser procesado por el programa.

i – Tree Eco, proporciona como resultado un conjunto de gráficos y tablas con la cuantificación y valoración de Servicios Ecosistémicos para el conjunto arbóreo en cuestión (resultados por árbol y por especie)

6. Estudio - discusión de los resultados y elaboración del documento pertinente.

Los resultados proporcionados por el software i – Tree Eco requieren de un procesado para que puedan ser interpretados y evaluados.

En esta fase se procesan y estudian tanto los resultados del i – Tree Eco como las estadísticas extraídas de la base de datos, para la posterior elaboración del documento que recoja todo el contenido del trabajo (resultados, discusión, conclusiones...)

3. Descripción de tareas e identificación de las que ha hecho el alumno.

Susana Domínguez Lerena, directora del TFM y propietaria de la empresa SDL, propuso la idea del estudio al Ayuntamiento de San Agustín del Guadalix, ya que se ajustaba a los requerimientos del Ayuntamiento.

Un estudio que se ha ido ajustando a medida que avanzaba en su desarrollo, y donde el alumno ha sido participe y parte importante tanto del proceso de toma de decisiones como de la ejecución de los trabajos.

Con la dirección, coordinación y apoyo de Susana Domínguez Lerena, el alumno ha sido el responsable y ejecutor de las siguientes tareas:

- Selección de los atributos del inventario. Reunión junto a Susana Domínguez Lerena donde se valoraron diversas alternativas y se seleccionaron aquellos parámetros que se consideraban más ajustados a los condicionantes específicos de San Agustín del Guadalix.
- Toma de datos en campo. El alumno fue el encargado de recopilar la información y realizar las mediciones pertinentes en campo. Labores requeridas en el proceso de trabajo de campo:
 - Geolocalización de ejemplares y fotografía adjunta.
 - Reconocimiento de especies.
 - Medición de dimensiones.
 - Evaluación de estado fitosanitario y estructural.
 - Determinación de actuaciones requeridas.
- Depurado y procesado de datos. Una vez finalizado el trabajo de campo, el alumno fue el encargado de llevar a cabo el procesado y depurado de la información (trabajo de gabinete)

Esta tarea consiste en corregir posibles errores derivados del trabajo de campo y crear una base de datos en Excel con el formato adecuado para su implementación en diferentes softwares y programas SIG.

Además, se elaborarán estadísticas y gráficos con los que mostrar las características del bosque urbano de San Agustín del Guadalix de una manera visual y fácilmente interpretable (número de especies, especies más abundantes, tamaño medio...)
- Análisis con el software i –Tree Eco. El alumno fue el encargado de llevar a cabo el análisis con el software i – Tree Eco, consiste en las siguientes tareas:

- Configuración de un nuevo proyecto en i – Tree Eco, ajustando los parámetros a las características climáticas de San Agustín del Guadalix y a los atributos recogidos en el inventario.
 - Importación de la base de datos del inventario arbolado al software, realizando los ajustes correspondientes para que el programa pueda leer todos los datos.
 - Enviar el proyecto creado a procesar para que el programa cuantifique los servicios ecosistémicos.
 - Recuperación y procesado de los resultados generados por el i – Tree Eco, para que sean fácilmente interpretables.
- Estudio - discusión de los resultados y elaboración del documento pertinente. Puesta en común junto a Susana Domínguez de los resultados obtenidos, llevando a cabo una discusión de resultados en el que el alumno se encargó de describir y desarrollar:
- El conjunto del trabajo realizado.
 - La metodología empleada.
 - Los resultados obtenidos.
 - La discusión de los resultados, donde se detecta la importancia del arbolado para alcanzar la resiliencia de las ciudades. Así como desarrollar la influencia existente entre los servicios ecosistémicos y el tamaño, salud y área foliar del arbolado.

-

4. Cronograma

El estudio ha sido realizado en **15 semanas**, las tareas realizadas cronológicamente se muestran en el siguiente a continuación.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Contextualización															
Selección de atributos del inventario															
Toma de datos en campo															
Depurado y procesado de datos															
Análisis con el software I – Tree Eco															
Discusión y elaboración de documento															
Reuniones periódicas															

5. Coste del estudio

Presupuesto personal				
	Nº días	Nº horas	Coste horario (€)	Coste total (€)
Alumno	65	520	18,09	9.406,8

Impresión y encuadernación	
Concepto	Coste (€)
Impresión	42
Encuadernación	12
Total	54

Gastos en material	
Concepto	Coste (€)
Móvil para inventario	250
Forcípula	130
Hipsómetro láser	500
Total	880

Presupuesto total	
Concepto	Coste (€)
Personal	9.406,8
Impresión y encuadernación	54
Materiales	880
	10.340,8
Gastos generales (13%)	1.344,3
Costes indirectos (3%)	310,2
Beneficio empresa	1.344,3
	13.339,6
IVA (21%)	2.801,3
Total	16.014,9

El coste total del estudio asciende a **Dieciséis mil catorce euros con nueve céntimos**.

PÓSTER



Estudio y valoración de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano de San Agustín del Guadalix (Comunidad de Madrid)



Study and evaluation of the ecosystem services of the urban forest of San Agustín del Guadalix (Community of Madrid)

Autor: Alejandro Manzano Rodríguez
(alejandro.manzanor@alumnos.upm.es)

Directora: Susana Domínguez Lerena

Tutora: Esperanza Ayuga Téllez
(esperanza.ayuga@upm.es)

Titulación: *Máster en Ingeniería de Montes*

Departamento de Ingeniería y Gestión Ambiental

Cuantificación de servicios ecosistémicos mediante el software i - Tree Eco, los resultados muestran:

- Una capacidad para eliminar contaminantes 492,3 kg/año.
- Un secuestro de 24.730 kg de carbono al año.
- La importancia de la gestión del arbolado como herramienta para afrontar los nuevos desafíos globales (cambio climático, búsqueda de la resiliencia y sostenibilidad)
- La influencia de malas prácticas como el terciado en la disminución de los beneficios aportados.



