



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH**

**Escola Politècnica Superior d'Enginyeria  
de Manresa**



# **MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

### **LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS DEL ARBOLADO URBANO: CASO DE ESTUDIO BARCELONA**

**Autor: Giancarlo Jeremy Orellana Asenjo**

**Directora: María Dolors Grau Vilalta**

**Octubre 2022**

**Manresa (Barcelona)**

# ÍNDICE GENERAL

Resumen

Abstract

1.	Introducción .....	1
2.	Antecedentes .....	3
2.1	Búsqueda bibliográfica científica.....	3
2.2	Documentos institucionales de Barcelona.....	4
2.3	Aplicación i-Tree Eco .....	5
2.4	Estudio previo en Barcelona.....	6
3.	Marco teórico .....	9
3.1	Ecosistemas urbanos .....	9
3.2	Infraestructura verde y bosque urbano .....	9
3.3	Bosques urbanos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) .....	10
3.4	Arbolado en espacios públicos .....	12
3.5	Efectos de los bosques urbanos .....	12
3.6	Cuantificación y valor económico de los efectos del arbolado con i-Tree ECO .....	14
3.6.1	Remoción de contaminantes del aire.....	15
3.6.2	Almacenamiento y Secuestro de carbono .....	16
3.6.3	Escorrentía evitada.....	17
3.6.4	Emisiones biogénicas.....	18
4.	Metodología .....	19
4.1	Área de estudio .....	19
4.2	Datos climáticos y de contaminación del aire .....	19
4.3	Parcelas de evaluación .....	20
4.3.1	Estratificación de la cobertura del suelo .....	20
4.3.2	Determinación del número de parcelas .....	22
4.3.3	Distribución de parcelas .....	23
4.4	Recopilación de datos en campo.....	25
4.4.1	Información de la parcela.....	28
4.4.2	Información de la vegetación arbórea .....	29
4.5	Procesamiento de datos.....	31
4.5.1	Estructura del arbolado .....	32
4.5.2	Cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos .....	35
4.5.3	Cuantificación del deservicio.....	38
5.	Resultados y discusiones .....	39

5.1	Estructura del arbolado.....	39
5.1.1	Número de árboles, densidad y cobertura arbórea.....	39
5.1.2	Composición y diversidad de especies.....	41
5.1.3	Distribución del DAP.....	43
5.1.4	Área - biomasa foliar y valor de importancia.....	44
5.1.5	Cobertura de suelo y árbol de la calle.....	45
5.1.6	Área plantable.....	48
5.2	Cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos.....	48
5.2.1	Remoción de contaminantes del aire.....	48
5.2.2	Almacenamiento y secuestro de carbono.....	51
5.2.3	Escorrentía evitada.....	52
5.3	Cuantificación de deservicios.....	54
5.3.1	Emisiones biogénicas.....	54
5.4	El rol del arbolado público en Barcelona.....	55
6.	Conclusiones.....	57
7.	Referencias.....	59
8.	Anexo.....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de las categorías de uso de suelo de la ciudad de Barcelona. ....	7
Figura 2. Mapa de Cobertura del Suelo de Catalunya del año 2018. ....	20
Figura 3. Mapa de estratos establecidos para el Municipio de Barcelona. ....	21
Figura 4. Mapa de los 2 estratos seleccionadas para el área de estudio. ....	22
Figura 5. Gráfica de relación error estándar – número de parcelas. ....	23
Figura 6. Generación de puntos centros de las parcelas aleatorias en la aplicación i-Tree ECO. ....	24
Figura 7. Ubicación de los puntos centros de las parcelas. ....	25
Figura 8. Recolector móvil de datos de i-Tree ECO. ....	27
Figura 9. Imagen guía para establecimiento de la parcela en el campo con componentes fijos (puntos azules) y árboles (puntos amarillos). ....	27
Figura 10. Telémetro NIKON Forestry Pro II. ....	28
Figura 11. Equipos utilizados para las mediciones (telémetro y cinta diamétrica). ....	29
Figura 12. Esquema para el análisis de los resultados. ....	31
Figura 13. Cobertura del suelo con materiales permeables (roca, hojarasca, hierbas o herbáceas, gras, gras sin mantenimiento y agua). ....	34
Figura 14. Cobertura del suelo con materiales impermeables (edificio, cemento y asfalto). ....	34
Figura 15. Espacios dentro del área de estudio (Izquierda, Zona Franca. Derecha, Zona de Montjuic) con árboles no censados. ....	39
Figura 16. Densidad y número de árboles por estrato. ....	40
Figura 17. Especies más abundantes en área de estudio y por estratos. ....	41
Figura 18. Especies más abundantes según la evaluación del muestreo y del censo 2022. ....	42
Figura 19. Origen de las especies por estratos. ....	43
Figura 20. Población de árboles según DAP (cm). ....	44
Figura 21. Porcentaje de cobertura de suelo. ....	45
Figura 22. Cobertura de suelo. a) Cobertura permeable (alcorque) en Urbano Denso. b) Cobertura impermeable (cemento) en Verde Urbano. ....	46
Figura 23. a) Espacios en Verde Urbano con mayor distanciamiento de árboles. b) Copa de árbol adaptado al edificio en Urbano Denso. ....	48
Figura 24. Contaminantes atmosférico eliminados y su valor económico. ....	49
Figura 25. Contaminantes atmosférico eliminados por mes. ....	49
Figura 26. Almacenamiento de carbono y valor calculado para las 10 especies con mayor almacenamiento. ....	51
Figura 27. Secuestro de carbono anual y valor calculado para las 10 especies con mayor secuestro. ....	52
Figura 28. Escorrentía evitada y valoración para las especies con mayor impacto. ....	53
Figura 29. Emisiones de COV por especie. ....	54
Figura 30. Servicios ecosistémicos por DAP. ....	56

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Distribución de parcelas de muestreo por categoría. ....	7
Tabla 2. Resultados del estudio por categorías.....	8
Tabla 3. Contribución de los bosques urbanos a los ODS. ....	11
Tabla 4. Datos de contaminantes en puntos de control de vigilancia en Barcelona para el año 2019. ....	19
Tabla 5. Recategorización del mapa de cobertura de suelo de Barcelona ....	21
Tabla 6. Superficie y número de parcelas establecidas por categoría. ....	23
Tabla 7. Matriz de variables vs resultados. ....	26
Tabla 8. Información de la parcela. ....	28
Tabla 9. Información de la vegetación arbórea.....	30
Tabla 10. Categorización del índice de Shannon-Wiener.....	32
Tabla 11. Categorización de DAP.....	33
Tabla 12. Composición del arbolado. ....	39
Tabla 13. Proporción de la cobertura vegetal. ....	40
Tabla 14. Diversidad de especies. ....	41
Tabla 15. Área y biomasa foliar. ....	44
Tabla 16. Valor de importancia de las especies más comunes. ....	45
Tabla 17. Árboles de la calle.....	46
Tabla 18. Espacio plantable.....	48
Tabla 19. Almacenamiento y secuestro de carbono. ....	51
Tabla 20. Escorrentía evitada. ....	53
Tabla 21. Emisiones de COV. ....	54
Tabla 22. Distribución de los servicios ecosistémicos por especie. ....	55
Tabla 23. Valor económico de los servicios ecosistémicos calculados. ....	56

## RESUMEN

La Nueva Agenda Urbana destaca a la infraestructura verde como un componente fundamental de las ciudades para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y por tanto la adaptación a los efectos del cambio climático. Este trabajo tiene como objetivo determinar la estructura, los servicios ecosistémicos y el valor económico del arbolado urbano público en el Municipio de Barcelona, utilizando la herramienta i-Tree ECO. Se estratificó el área del Municipio de Barcelona y se trabajó con dos estratos (48% del territorio total) en los cuales se establecieron 200 parcelas de muestreo. La estructura del arbolado consta de 305.350 árboles con una cobertura del 19,7% y presenta valores altos de diversidad, aunque está dominado por el *Platanus x hybrida*. Se estima un potencial de área plantable de 311 hectárea (alrededor de 22.000 árboles). Los servicios ecosistémicos calculados fueron: remoción de contaminantes, almacenamiento y secuestro de carbono y escorrentía evitada. El arbolado eliminó 51,12 toneladas métricas de contaminantes del aire (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub> y SO<sub>2</sub>) correspondiente a 3.130.000 €/año. Almacenaron 55.851 toneladas de carbono y secuestraron 5.949 toneladas/año de carbono, equivalente a 8.970.000 € y 956.000 €/año, respectivamente. La escorrentía evitada fue de 45.000 m<sup>3</sup>/año con un valor asociado de 86.000 €. Como parte de los deservicios se estimó una emisión de 60,97 toneladas métricas de compuestos orgánicos volátiles. Esta investigación contribuye con los objetivos del Plan Director del arbolado de Barcelona 2017-2037, al brindar conocimientos de las funciones, valores, servicios y deservicios del arbolado y asignar un valor económico a sus beneficios.

Palabras clave: arbolado público, valoración económica, i-Tree ECO, remoción de contaminantes del aire, almacenamiento y secuestro de carbono, escorrentía evitada.

## ABSTRACT

According to the New Urban Agenda, green infrastructure is a fundamental component for cities to achieve the Sustainable Development Goals and therefore to adapt to the effects of climate change. The goal of this study is to determine the vegetation structure, ecosystem services and economic value of Barcelona public urban trees, using i-Tree ECO. We stratified Barcelona Municipality to select two strata where we established 200 plots (48% of the area). Our results show that the vegetation structure was highly diverse and was conformed of 305 350 trees, about 19.7% of tree cover. Although, it was dominated by *Platanus x hybrida*. Furthermore, we detected 311 hectares (around 22 000 trees) of potential plantable space area. All the trees in these green spaces could remove 51.12 t of air pollutants (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub> and SO<sub>2</sub>) equivalent to 3,130,000 €/year; store about 55 851 t of carbon equivalent to 8,970,000 €, sequester about 5 949 t/year of carbon equivalent to 956,000 €/year and avoid 45,000 m<sup>3</sup>/year of runoff equivalent to 86,000 €. However, there was an emission of 60.97 t of volatile organic compounds (disservice). The study improves the knowledge of the public urban tree structure, functions, services and disservice; assigns an economic value to Barcelona public urban tree and contributes to the Barcelona Trees Master Plan 2017-2037.

Keywords: urban public trees, economic valuation, i-Tree ECO, air pollutants removal, carbon storage and sequestration, runoff reduction.

# 1. INTRODUCCIÓN

Las ciudades pueden ser grandes centros de desarrollo socioeconómico, pero el rápido ritmo del crecimiento urbano y los recursos limitados disponibles para atender la creciente demanda de alimentos y servicios básicos pueden también presentar enormes barreras para la equidad y sostenibilidad del desarrollo de las ciudades [1]. La proporción de la población de la ciudad, a nivel mundial, se duplicó del 25% en 1950 a alrededor del 50% en 2020 y se prevé que aumente lentamente al 58% para el 2070 [2].

Si bien las ciudades ocupan sólo el 2% de la superficie del planeta, sus habitantes utilizan el 75% de sus recursos naturales. El desarrollo urbano, tal y como se ha llevado a cabo frecuentemente, produce el agotamiento y la degradación de los ecosistemas naturales en y alrededor de las áreas urbanas [3]. El cambio climático y las preocupaciones ambientales dominan cada vez más los escenarios futuros. El aumento de los fenómenos meteorológicos extremos y los desastres naturales como inundaciones, olas de calor y deslizamientos de tierra afectarán más a las zonas urbanas, lo que hace que la adaptación al cambio climático sea una preocupación primordial. Mientras tanto, las áreas urbanas son responsables de la mayoría de las emisiones de carbono del mundo [2].

Las áreas urbanas se vieron particularmente afectadas por la pandemia del COVID-19, lo que subraya la importancia de intensificar los esfuerzos para construir un futuro urbano más sostenible y equitativo [2]. Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) se concentran cada vez más en las áreas urbanas [3], ya que las ciudades pueden marcar el camino para alcanzar los ODS y otras metas fijadas a nivel mundial al implementar la silvicultura urbana y periurbana [1]. Uno de los grandes desafíos mundiales es diseñar y adaptar las ciudades para que superen estos problemas. Una estrategia posible, que cuenta con el apoyo de la Unión Europea (UE), involucra las “soluciones basadas en la naturaleza” [4].

La UE también destaca la infraestructura verde en las ciudades por su multifuncionalidad, multiescalabilidad y sus atributos de gobernanza. Indudablemente, los bosques urbanos y periurbanos son los componentes más importantes de la infraestructura verde, ya que conectan a las ciudades con la naturaleza y prestan una amplia gama de servicios ecosistémicos [4]. Si están bien diseñados y gestionados, los bosques urbanos y periurbanos son fundamentales para responder a los desafíos: los bosques urbanos pueden aportar enormes contribuciones a la sostenibilidad ambiental, a la viabilidad económica y a la habitabilidad de los asentamientos urbanos [3].

Los nuevos retos de la agenda urbana y la creciente complejidad de la ciudad hacen necesaria la revisión y actualización de los instrumentos de planificación y gestión de los elementos que configuran los sistemas que conforman la ciudad, como es el caso del arbolado



y la infraestructura verde, para contribuir a un desarrollo equitativo y saludable en beneficio de las personas. La planificación y gestión adecuada del patrimonio arbóreo puede contribuir también a mejorar los servicios que los árboles, como seres vivos, prestan a la salud de la población y a la habitabilidad de Barcelona [5].

Por este motivo, este trabajo tiene como objetivo general determinar la estructura, los servicios ecosistémicos y el valor económico del arbolado urbano público en el Municipio de Barcelona, España. Y como objetivos específicos:

- ✓ Caracterizar la estructura del arbolado urbano público en el Municipio de Barcelona.
- ✓ Estimar los servicios ecosistémicos del arbolado urbano público en el Municipio de Barcelona.
- ✓ Estimar el valor económico de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano público en el Municipio de Barcelona.

## 2. ANTECEDENTES

Esta investigación se realizó en coordinación con el área de Parques y Jardines del Ayuntamiento de Barcelona, con quienes, en base al análisis del Plan Director del arbolado de Barcelona 2017-2037 se decidió investigar los servicios ecosistémicos del arbolado de la ciudad, con la finalidad de contribuir con la Línea Estratégica 2, de dicho Plan, la cual plantea “avanzar en el conocimiento del árbol y de sus valores y servicios”. Específicamente está relacionado con la acción 2.1 “Estudiar las funciones, valores, servicios y deservicios del arbolado” y la acción 2.2 “Asignar un valor económico a los beneficios del arbolado” [5].

Para calcular los servicios ecosistémicos se utilizó el modelo i-Tree Eco, un *software* diseñado por el Servicio Forestal del Departamento de Agricultura (*United States Department of Agriculture - USDA*) de los E.E.U.U. Este modelo se presenta como la herramienta más completa para el análisis del verde urbano actualmente disponible, puesto que es capaz de proporcionar los resultados más detallados sobre la estructura y las funciones del arbolado, a partir de una amplia variedad de datos, aplicable en cualquier tipo de zona y área (ciudad, distrito o zona verde). Por tanto, es una herramienta muy útil para conocer, gestionar, tomar decisiones y desarrollar una buena estrategia sobre el arbolado presente en una ciudad [6].

A continuación, se describe la bibliografía utilizada en el presente documento, que consiste en: literatura científica y especializada, documentos emitidos por las instituciones gubernamentales encargados del arbolado urbano, manuales y protocolos del modelo i-Tree Eco utilizada para valorar los servicios ecosistémicos y por último el estudio previo realizado en Barcelona en el 2009.

### 2.1 Búsqueda bibliográfica científica

Se revisó estudios previos en la cuantificación y valoración de servicios ecosistémicos del arbolado urbano mediante una búsqueda bibliográfica en *Web of Science*, el 18 de julio de 2022. Los términos de búsqueda o llamados también términos booleanos fueron: “*ecosystem services*”, “*urban trees*”, “*quantification*”, “*assessment*” y “*i-Tree*”. Estos se colocaron en la categoría de: “título”, “resumen” y “palabras clave”; tanto de manera independientes y combinados. Al obtener los resultados se verificaron los títulos y resúmenes y solo se seleccionaron los estudios que determinaron y/o valoraron los servicios ecosistémicos de los árboles en ciudades. Se contabilizaron un total de 1.748 artículos relacionados con “servicios ecosistémicos” del “arbolado urbano” los cuales fueron desarrollados entre el 2013-2022, con mayor número de publicaciones desde el 2019. Así mismo, desde el 2014 las publicaciones de estudios relacionados

con la cuantificación de servicios ecosistémicos del arbolado urbano basados en la aplicación i-Tree Eco es de 46 artículos, de los cuales 16 incluyen la valoración económica. La mayoría de dichos estudios se concentran en la mitigación de contaminantes del aire, escorrentía evitada, almacenamiento y secuestro de carbono, entre otros y han sido desarrollados en ciudades principalmente de Estados Unidos, China e Italia, así como en algunas ciudades de Inglaterra, Irán, Polonia, España (incluye Barcelona) y otros países. Cabe mencionar que algunos de estos estudios han sido utilizados en este trabajo.

## **2.2 Documentos institucionales de Barcelona**

El Ayuntamiento de Barcelona ha elaborado diversos documentos para concretar los procedimientos a seguir a la hora de administrar el espacio público y garantizar un arbolado saludable y funcional desde el punto de vista ambiental y social [5].

El Plan Director del arbolado de Barcelona 2017-2037 es el “documento estratégico municipal que define la visión, los objetivos, las líneas estratégicas y las acciones en relación con la planificación, gestión y conservación del patrimonio arbolado, tanto público como privado, del término municipal de Barcelona, de acuerdo con sus especificidades biogeográficas y urbanas, para garantizar la contribución de la masa arbolada a una ciudad más saludable para el conjunto de la población actual y para las generaciones futuras, donde la naturalización y la extensión del verde es un factor clave para hacer un espacio público vivo y habitable para las personas”. Este plan “pone énfasis en repensar los criterios y los procesos de intervención, con el fin de aplicar una gestión y un mantenimiento más sostenibles y eficientes que mejoren las condiciones de vida del arbolado de Barcelona para maximizar los servicios y funciones que los árboles saludables proporcionan a la ciudad y al bienestar de las personas” [5].

La Medida de Gobierno: Programa de Impulso de la Infraestructura Verde Urbana tiene como objetivos: el incremento de la infraestructura verde al servicio de la salud de la ciudadanía, la mejora de la infraestructura verde para obtener más servicios y la implicación de la ciudadanía en el incremento del verde y de la biodiversidad [7].

El Plan Verde y de la biodiversidad de Barcelona 2020 es un instrumento estratégico que concreta el compromiso municipal respecto a la conservación del verde y de la biodiversidad, y que promueve que la población conozca el patrimonio natural, lo disfrute y lo cuide. En otras palabras, lo que se pretende es lograr una infraestructura ecológica que ofrezca el máximo de servicios a una ciudad donde naturaleza y urbe interactúen y se potencien [8].

### 2.3 Aplicación i-Tree Eco

i-Tree es un paquete de *software* gratuito desarrollado por el Servicio Forestal del USDA y sus socios que evalúa la estructura de árboles y bosques, los servicios del ecosistema y el valor de los recursos arbóreos de una comunidad. “i-Tree Eco versión 6” es una aplicación del *software*, flexible diseñada para usar datos recopilados en el campo de árboles individuales, inventarios completos o parcelas ubicadas al azar en un área de estudio junto con la contaminación del aire local por hora y datos meteorológicos para cuantificar la estructura del bosque, los efectos ambientales y valor para las comunidades. La premisa básica de i-Tree comienza con la evaluación de la estructura, que son las características físicas del árbol y el recurso forestal en función de mediciones directas o estimaciones estadísticas. Los datos estructurales se utilizan con datos ambientales locales (meteorológicos y de contaminantes), para estimar funciones servicios. i-Tree Eco tiene diferentes requisitos y brinda diferentes resultados dependiendo de si su proyecto está en los EE. UU., en países socios internacionales seleccionados (Canadá, Australia, el Reino Unido, México, Corea del Sur, Colombia y la mayoría de los países de Europa) o en otros países donde el modelo se puede utilizar en ciudades individuales [9].

Para los EE. UU. y los países asociados, el modelo i-Tree Eco viene precargado con datos meteorológicos locales y de contaminación de una red de estaciones de monitoreo. El *software* también incluye especies locales, clima y datos de población humana. Todos estos datos precargados significan que los usuarios que realizan proyectos en estas ubicaciones solo necesitan seleccionar su ubicación y proporcionar las medidas de los árboles antes de enviar los datos para el procesamiento automatizado y la recuperación de resultados el mismo día. Sin embargo, si hace falta cargar o actualizar datos se requiere el uso de la aplicación “i-Tree Database”. Este portal en línea proporciona un proceso automatizado para que los usuarios envíen nueva información de ubicación de ciudades internacionales, datos de contaminación por hora y datos de precipitación por hora para que se validen y luego se incorporen a una versión futura de Eco [9].

La aplicación i-Tree Eco cuenta con manuales y guías desarrolladas para ayudar al usuario en la planificación de un proyecto y la toma de datos.

El Manual del Usuario (Versión 6.0) [10] describe el proceso para realizar un proyecto i-Tree Eco mediante las siguientes fases:

- ✓ **Fase I: Planificar el proyecto**; consiste en tomar decisiones para personalizar el proyecto como: establecer el límite del área de estudio, el tipo de inventario a realizar (completo o muestreo). Si se estableciese hacer un

inventario de muestreo se debe decidir el tamaño y cantidad de parcelas a evaluar.

- ✓ **Fase II: Montar el proyecto**; consiste en obtener información de las especies, información del lugar, datos de precipitación y de contaminación.
- ✓ **Fase III: Recopilación de datos de campo**; consiste en determinar las variables que se tomarán en campo. Hay variables que son obligatorias (especie y diámetro a la altura del pecho - DAP) y otras variables que dependerán de los resultados que se desea tener. Además, en esta fase se decide la forma de recolectar los datos, mediante el uso del recolector móvil o con formularios impresos.
- ✓ **Fase IV: Trabajar con Eco**; consiste en la explicación del manejo del *software* de i-Tree Eco y el uso adecuado de sus componentes. De esta manera se puede configurar el proyecto.
- ✓ **Fase V: Ver tus reportes**; se presenta los resultados del modelo que incluye gráficos, tablas y un breve reporte narrativo.

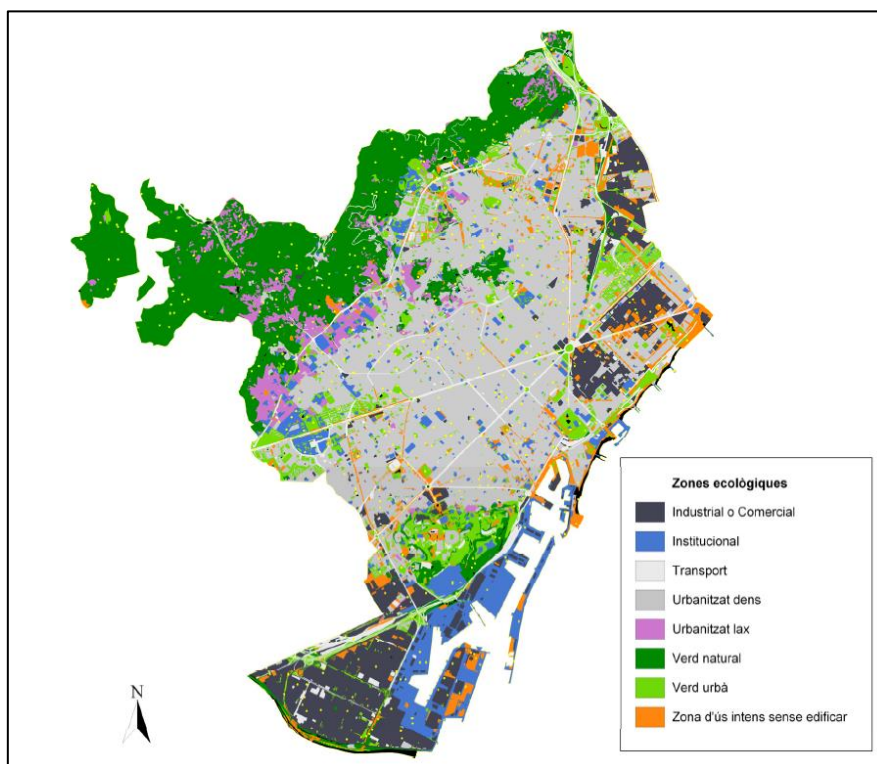
La Guía de Campo de i-Tree (Versión 6.0) describe cómo recolectar y registrar las variables de datos necesarias para su proyecto Eco. Las metodologías descritas tienen la intención de entregarle a todos los usuarios los protocolos estandarizados para recolectar sus datos [11].

## 2.4 Estudio previo en Barcelona

En enero del 2009, el Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals (CREAF) realizó un estudio [6] para cuantificar los efectos del verde urbano a partir de diferentes parcelas repartidas por toda la ciudad de Barcelona (incluyendo las zonas de Montjuïc y Collserola), es decir, desde las zonas más naturales a las más urbanizadas (101 km<sup>2</sup>). Esta evaluación se llevó a término principalmente con el modelo i-Tree ECO.

Se reagrupó los 29 tipos de uso de suelo del Mapa Ecológico de Barcelona 2006 (tercera edición), en 8 categorías (Figura 1), considerando:

- ✓ Verde urbano: Parque, jardín, parterre u otras zonas verdes;
- ✓ Verde natural: Bosque, matorral, pradera o vegetación de ribera;
- ✓ Urbanizado laxo: Vivienda 1-2 familias con huerto o jardín;
- ✓ Urbanizado denso: Densamente construido con o sin espacios verdes;
- ✓ Zona de uso intenso sin edificar: Área peatonal, zona sin edificar o zona en transformación;
- ✓ Transporte: Aparcamiento y cochera, vía urbana principal o zona ferroviaria;
- ✓ Institucional: Hospital, cementerio, centro de enseñanza o zona portuaria;
- ✓ Industrial o comercial: Industria, taller, almacén o gran zona comercial.



Fuente: [6]

**Figura 1. Mapa de las categorías de uso de suelo de la ciudad de Barcelona.**

Se establecieron 579 parcelas de evaluación distribuidas al azar, de 404 m<sup>2</sup> de superficie cada una (11,35 m de diámetro), atribuyendo más parcelas a aquellas zonas con mayor superficie. La extensión total estudiada fue de 23 hectáreas repartidas por toda la ciudad, con una densidad aproximada de una parcela por cada 17,4 hectáreas de superficie (Tabla 1).

**Tabla 1. Distribución de parcelas de muestreo por categoría.**

<b>Categoría</b>	<b>Área total (ha)</b>	<b>Área (%)</b>	<b>Nº de parcela</b>
<b>Verde Urbano</b>	806	7,96	50
<b>Verde natural</b>	2.184	21,60	125
<b>Urbanización laxa</b>	424	4,19	20
<b>Urbanización densa</b>	3.666	36,20	204
<b>Transporte</b>	513	5,07	30
<b>Institucional</b>	776	7,67	39
<b>Industrial o comercial</b>	1.185	11,70	70
<b>Zonas de uso intenso</b>	567	5,60	41
<b>Total</b>	10.121	100	579

Fuente: [6]

Las parcelas con presencia de vegetación (332 parcelas) fueron visitadas durante 3 meses (de mayo a julio) por un equipo de 2 personas. Se recogió información de la parcela, arbustos y árboles (Tabla 2).

**Tabla 2. Resultados del estudio por categorías.**

<b>Categoría</b>	<b>Área total (ha)</b>	<b>Área muestreada (ha)</b>	<b>N° de parcela</b>	<b>N° de parcela con vegetación</b>	<b>N° de árboles</b>
<b>Verde Urbano</b>	806	2,02	50	50	544
<b>Verde natural</b>	2.184	2,05	125	117	1.844
<b>Urbanización laxa</b>	424	0,81	20	15	174
<b>Urbanización densa</b>	3.666	8,24	204	102	531
<b>Transporte</b>	513	1,21	30	14	69
<b>Institucional</b>	776	1,58	39	3	21
<b>Industrial o comercial</b>	1.185	2,83	70	7	14
<b>Zonas de uso intenso</b>	567	1,66	41	24	148
<b>Total</b>	10.121	23,39	579	332	3345

Fuente: [6]

Dentro de los resultados más relevantes se tuvo que Barcelona concentra 1.419.823 árboles cuya cobertura arbórea es del 25,20%. Así mismo, la ciudad presenta un 64% de suelo impermeable y 36% de permeable. Los árboles más comunes en la totalidad del área estudiada fueron *Quercus ilex* (22,1%), *Pinus halepensis* (20,5%), *Platanus x acerifolia* (6,6%) y *Pinus pinea* (4,9%); pero al considerar solo la ciudad las especies fueron *Platanus x acerifolia* (8,8%), *Cupressus macrocarpa* (7,4%), *Ligustrum lucidum* (6,4%) y *Celtis australis* (5,5%).

En cuanto los servicios ecosistémicos se tuvieron que el arbolado urbano eliminó 305,6 toneladas de contaminantes atmosféricos, almacenó 113.437 toneladas de carbono y secuestró 5.422 toneladas de carbono

### **3. MARCO TEÓRICO**

#### **3.1 Ecosistemas urbanos**

Un ecosistema puede definirse como “un conjunto de especies que interactúan y su entorno local no biológico que funcionan juntos para sustentar la vida”. Sin embargo, las fronteras entre los diferentes ecosistemas suelen ser difusas. En el caso del entorno urbano, es posible definir la ciudad como un solo ecosistema o ver la ciudad como compuesta de varios ecosistemas individuales, por ejemplo, parques y lagos [12].

El hecho de que la ciudad constituye un ecosistema no se reconoció hasta los años setenta del siglo pasado. Los ecosistemas naturales presentan una enorme complejidad, pero los urbanos poseen un grado de heterogeneidad aún superior. Muchos aspectos de su funcionamiento están relacionados con actividades y decisiones de orden económico, político, social y cultural [13].

#### **3.2 Infraestructura verde y bosque urbano**

Todas las ciudades comparten una estructura física similar que comprende la infraestructura “gris” (edificaciones residenciales e industriales, carreteras, servicios y aparcamientos), la infraestructura “azul” (ríos, lagos, estanques y canales hídricos) y la infraestructura “verde” (árboles, arbustos y prados en los parques, bosques, jardines y calles) [3]. La infraestructura verde es una red estratégicamente planificada de zonas naturales y seminaturales de alta calidad con otros elementos medioambientales, diseñada y gestionada para proporcionar un amplio abanico de servicios ecosistémicos y proteger la biodiversidad tanto de los asentamientos rurales como urbanos [14].

La infraestructura verde es la suma de los siguientes tipos de espacios: espacios naturales, espacios fluviales y litorales, espacios agrícolas, bosques, parques, jardines, huertos, calles arboladas, verde en la vía pública y en zonas residenciales y equipamientos, balsas, sistemas urbanos de drenaje sostenible, solares, caminos, corredores verdes, cubiertas verdes y muros verdes. Se añade también la vegetación que los ciudadanos cultivan en sus balcones, terrazas, patios y jardines [7].

Los bosques urbanos son la espina dorsal de la infraestructura verde que conecta las áreas urbanas a las rurales y mejora la huella ambiental de las ciudades. Se define, bosques urbanos como redes o sistemas que comprenden todos los arbolados (rodales), grupos de árboles y árboles individuales ubicados en las áreas urbanas y periurbanas; por tanto, se incluyen: bosques, árboles en las calles, árboles en los parques y jardines y árboles en las esquinas de las calles [3]. Los bosques urbanos y periurbanos abarcan tanto los árboles como la vegetación asociada que se ubican también en las zonas naturales (por ejemplo, áreas protegidas), las zonas residenciales



y otros espacios verdes, así como en las calles y alrededor de los humedales y cuerpos de agua [15].

Los bosques urbanos están ubicados en ecosistemas altamente alterados y extremadamente complejos donde los humanos son los principales impulsores de sus tipos, cantidades y distribución [16].

Una infraestructura verde correctamente planificada, desarrollada, gestionada y mantenida se convierte en un sistema de soporte de la vida que crea una fuerte unión entre los árboles y las personas. Por este motivo, debe estar sujeto a unos determinados criterios de intervención funcionales, operativos y estéticos, que ayuden a su buen encaje en el espacio público y a su convivencia equilibrada con el resto de las infraestructuras [5]. Las autoridades de la ciudad deben invertir en los múltiples beneficios colaterales del desarrollo de infraestructura verde, tales como: la integración de la infraestructura verde en el diseño de calles, redes de calles y espacios abiertos es una forma efectiva de mejorar su flexibilidad y multifuncionalidad. De hecho, la creación de redes de áreas verdes y espacios verdes permitirá mejores respuestas a futuras pandemias y, al mismo tiempo, brindará beneficios colaterales para la mitigación del cambio climático, aumentar la salud pública y la cohesión social y, en última instancia, crear ciudades más habitables [2][17].

### **3.3 Bosques urbanos y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)**

En 2015, el desarrollo urbano sostenible estuvo en el centro de los dos principales acuerdos mundiales de desarrollo aprobados por la comunidad internacional: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y el Acuerdo de París sobre el cambio climático. Con base en los Objetivos de Desarrollo del Milenio, la Agenda 2030, que incluye 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), insta a los países a movilizar esfuerzos para poner fin a todas las formas de pobreza, combatir la desigualdad y abordar el cambio climático, procurando que nadie quede excluido [1].

Los bosques urbanos pueden suministrar una amplia gama de productos y servicios ecosistémicos para ayudar a hacer frente a las necesidades de los habitantes de las áreas urbanas y periurbanas. Pueden afrontar muchos desafíos de importancia local y general, tales como: la mitigación y adaptación al cambio climático, la seguridad alimentaria y energética, la salud y el bienestar humano, la exigencia de empleo y de ingresos económicos, la conservación de la diversidad biológica, la protección de las cuencas hidrográficas y la gestión y reducción del riesgo de desastres. En la Tabla 3 se describen la contribución de los bosques urbanos a los ODS [3].

**Tabla 3. Contribución de los bosques urbanos a los ODS.**

Objetivo de Desarrollo Sostenible	El papel de los bosques urbanos
 <p><b>1</b> FIN DE LA POBREZA</p>	<p>Los bosques urbanos crean empleo, son un recurso para los empresarios, reducen el coste de la infraestructura urbana, suministran servicios ecosistémicos para todos los ciudadanos, mejoran el espacio vital y aumentan el valor de las propiedades fomentando, en última instancia, economías locales verdes.</p>
 <p><b>2</b> HAMBRE CERO</p>	<p>Los bosques urbanos son fuentes directas de alimentos (p.ej., frutas, semillas, hojas, setas, bayas, extractos de corteza, savias y raíces comestibles, hierbas, carne de caza silvestre e insectos comestibles). Indirectamente, apoyan la alimentación saludable ofreciendo disponibilidad de leña, agua de buena calidad y mejores suelos para la producción agrícola sostenible.</p>
 <p><b>3</b> SALUD Y BIENESTAR</p>	<p>Los bosques y demás áreas verdes en y alrededor de las ciudades ofrecen entornos ideales para actividades recreativas y de relajación al aire libre, contribuyendo a la prevención y al tratamiento de enfermedades no contagiosas y al mantenimiento de la salud mental. Los bosques urbanos filtran y eliminan eficazmente los contaminantes y partículas que también contribuyen a reducir la incidencia de enfermedades no contagiosas.</p>
 <p><b>6</b> AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO</p>	<p>Los bosques urbanos son reguladores eficaces de los ciclos hidrológicos urbanos. Filtran el agua potable reduciendo los contaminantes biológicos y químicos, reducen el riesgo de inundaciones y erosión, además de las pérdidas hídricas, minimizando eventos extremos mesoclimáticos por medio de los procesos de evapotranspiración.</p>
 <p><b>7</b> ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE</p>	<p>La gestión sostenible de los bosques urbanos puede producir energía renovable para su uso en las comunidades urbanas. Esta es una función vital para miles de millones de habitantes de las zonas urbanas y periurbanas en todo el mundo, en especial los países de bajos-medios ingresos donde la leña es la fuente más asequible, y a veces la única, de energía.</p>
 <p><b>8</b> TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO</p>	<p>Las inversiones en los bosques urbanos y otra infraestructura verde se agregan significativamente al crecimiento económico verde, produciendo un entorno atractivo para turismo y negocios, mejorando el valor de las casas y los cánones de arrendamiento, creando oportunidades de empleo, suministrando materiales de construcción para las viviendas y generando ahorros en los costes asociados con la energía y el mantenimiento de la salud humana.</p>
 <p><b>11</b> CIUDADES Y COMUNIDADES SOSTENIBLES</p>	<p>Los bosques urbanos, si están bien diseñados y gestionados, contribuyen enormemente a la sostenibilidad ambiental, a la viabilidad económica y a la habitabilidad en las ciudades. Ayudan a mitigar el cambio climático y los desastres naturales, reducen los costes de energía, la pobreza y la desnutrición y suministran servicios ecosistémicos y beneficios públicos.</p>
 <p><b>13</b> ACCIÓN POR EL CLIMA</p>	<p>Los árboles y los bosques en y alrededor de las ciudades contribuyen a la mitigación del cambio climático fijando directamente el carbono y reduciendo las emisiones de GEI; e indirectamente por el ahorro de energía, reducción del efecto isla de calor en las ciudades y atenuación de las inundaciones.</p>
 <p><b>15</b> VIDA DE ECOSISTEMAS TERRESTRES</p>	<p>Los bosques urbanos ayudan a crear y a consolidar hábitats, constituyen una reserva de biodiversidad, mejoran significativamente la calidad del suelo y contribuyen a la restauración de la tierra.</p>

Fuente: [3]

### **3.4 Arbolado en espacios públicos**

El árbol es un organismo vivo que convive en el espacio urbano con las personas, y las conecta física y emocionalmente con la naturaleza [5]. Una característica importante de los árboles de las calles es su integración con la infraestructura gris de las ciudades. Esto es particularmente importante en ciudades compactas, donde la disponibilidad de suelo para la implementación de parques o jardines generalmente es limitada [17]. La ciudad no suele ofrecer a los árboles las mejores condiciones de vida. El desarrollo de un árbol plantado en la calle presenta diferencias notables respecto a un árbol de la misma especie y edad plantado en condiciones naturales o, incluso, plantado en un espacio verde de la ciudad. El suelo incide directamente en el desarrollo del arbolado viario. Cuando se encuentra demasiado compactado, debido a la presencia de asfalto, aceras, aparcamientos, etc., se produce una reducción de los niveles de oxígeno y la asfixia de las raíces. Estas mismas consecuencias tienen lugar cuando el suelo está inundado por un periodo prolongado de tiempo [18].

El arbolado de las ciudades contribuye de modo decisivo en la mejora de la calidad de vida de las personas por sus beneficios ambientales y sociales sobre la población, y es considerado un elemento urbanístico fundamental en la definición de la estructura urbana de las ciudades y en la valoración de la calidad del espacio público [5]. La Nueva Agenda Urbana destaca los roles profundos que los espacios verdes, abiertos y públicos multifuncionales, como calles, espacios peatonales, redes ciclistas, plazas, parques y espacios verdes, pueden desempeñar para impulsar el desarrollo económico y contribuir a la salud y el bienestar humanos [2].

La pandemia, del COVID-19, generó un mayor deseo de espacios verdes, abiertos y públicos, lo que probablemente cambie los patrones de distribución de dichos espacios en los próximos años. Muchos argumentan que la pandemia tendrá implicaciones significativas en la forma en que los residentes urbanos verán y utilizarán los espacios verdes, abiertos y públicos en el futuro [2].

El papel del árbol de la calle ha pasado de ser un embellecimiento y ornamentación a uno de prestación de servicios ambientales. Los árboles urbanos siempre han brindado beneficios ambientales a sus ciudades anfitrionas, pero la ciencia de evaluar los servicios de los ecosistemas estableció un nuevo rol para los árboles urbanos y, en particular, para los árboles de las calles [19].

### **3.5 Efectos de los bosques urbanos**

La estructura forestal es una variable clave porque es el elemento que los gestores forestales manipulan para influir en los beneficios y valores del bosque. Dicha estructura representa los atributos físicos del bosque, como la abundancia, el tamaño, las

especies, la salud y la ubicación de los árboles. A menudo los gestores eligen qué especies plantar, dónde y cuándo plantarlas y qué árboles quitar del paisaje. Estas acciones influyen directamente en la estructura y, en consecuencia, en los beneficios derivados de los recursos forestales urbanos y periurbanos [20].

Los árboles y los bosques en y alrededor de las ciudades brindan una amplia gama de bienes y servicios que contribuyen enormemente a los medios de vida y a la calidad de vida de los habitantes de las zonas urbanas. Los bosques urbanos, si están bien mantenidos y saludables, son una de las pocas inversiones municipales de capital que ganan valor en el tiempo, porque sus beneficios económicos aumentan con el crecimiento de los árboles y requieren menos mantenimiento. El arbolado constituye una red que interconecta todos los espacios verdes y hábitats de la ciudad y proporciona múltiples funciones y beneficios socioambientales y económicos, lo que lo hace tan necesario como cualquier otro servicio [5].

La aproximación funcional al ecosistema urbano se completa teniendo en cuenta no solo las consecuencias negativas de la interacción entre la población y el medio natural o seminatural, sino también los efectos que la naturaleza ejerce sobre la vida de las personas, algunos de ellos beneficiosos (y entonces se les denomina servicios) [13]. El término servicio ecosistémico se usa a menudo para referirse a áreas naturales que existen “sin” interferencia humana y que no requieren aporte de mano de obra ni capital. Sin embargo, dado que los bosques urbanos se encuentran en ecosistemas altamente alterados y dominados por el hombre, también se incluye los servicios ecosistémicos que brindan los sistemas seminaturales, como los árboles de las calles y las áreas verdes mantenidas en entornos altamente urbanizados sostenidos por aportes de mano de obra y recursos humanos [16].

Los bosques urbanos y periurbanos prestan servicios culturales, de regulación y aprovisionamiento que pueden ser de importancia local y mundial. Los **servicios de regulación** incluyen: la contribución a la regulación climática (por ejemplo, enfriamiento), el almacenamiento del carbono, la eliminación de la contaminación del aire y la regulación de las inundaciones. Los **servicios culturales** incluyen: el patrimonio natural, la recreación, la estética, el intercambio de conocimientos y el “sentido de pertenencia”. Los **servicios de aprovisionamiento**, que son especialmente pertinentes para los habitantes de las ciudades en los países en desarrollo, incluyen productos como: alimentos, leña para combustible, agua potable y medicinas. Así mismo, los bosques urbanos y periurbanos también contribuyen a la biodiversidad en las zonas urbanas [15]. Por lo tanto, los beneficios de la presencia de árboles en la ciudad son altísimos [5].

Ahora bien, los árboles son seres vivos y también hay que tener en consideración algunos inconvenientes que pueden generar a la hora de convivir en la ciudad. Algunos de estos inconvenientes o deservicios, como son denominados en el sector de la arboricultura, son la generación de alergias, las emisiones de COV (compuestos orgánicos volátiles), la capacidad invasora, la presencia de hojas, flores y frutos en las aceras, [5] daños a edificios y pavimentos por las raíces de los árboles, daños y lesiones por la caída de árboles, interrupción del tráfico durante el mantenimiento, emisiones de carbono a través de la operación de maquinaria, bloqueo de drenajes por hojarasca [21].

### **3.6 Cuantificación y valor económico de los efectos del arbolado con i-Tree ECO**

El Servicio Forestal de los EEUU ha desarrollado algunos modelos (UFORE ahora llamado i-Tree) que permiten un cálculo sencillo de muchos de los servicios prestados por las áreas verdes de las zonas urbanas. Estos métodos se han aplicado en distintas ciudades, la mayoría de ellas estadounidenses [13]. La premisa básica del modelo es que la estructura del arbolado urbano determina sus funciones y valores. Así pues, con una precisa evaluación de la estructura se obtendrán estimaciones de las funciones del verde y de los servicios que nos proporciona [6].

El modelo i-Tree ECO utiliza un procedimiento de muestreo para estimar varios atributos estructurales medidos sobre el bosque (número de árboles, composición de especies, distribución del diámetro, entre otros) dentro de un error de muestreo conocido. Con esta información estructural medida se estima otros atributos estructurales (área foliar, biomasa de árboles y hojas) e incorpora datos ambientales locales para estimar varios atributos funcionales (eliminación de la contaminación del aire, secuestro de carbono, efectos energéticos en la construcción). Los datos económicos de la literatura se utilizan para estimar el valor de algunas de las funciones [22]. Típicamente, todos los datos de campo se recopilan durante la temporada de hojas para evaluar correctamente el dosel de los árboles [10].

i-Tree Eco es actualmente uno de los medios más precisos para evaluar la estructura del bosque urbano y la función del ecosistema [22]. Sin embargo, i-Tree Eco se desarrolló originalmente para los Estados Unidos y, por lo tanto, incluye limitaciones inherentes y errores potenciales para proyectos internacionales. Por ejemplo, i-Tree ECO tiene un número limitado de especies que se utilizan para las ecuaciones alométricas [23].

Los beneficios más estudiados son los relacionados con la regulación ambiental y los valores de propiedad, y los datos disponibles muestran que estos suelen superar los costos. También se ha demostrado que los beneficios estéticos, de amenidad y de

sombreado brindan importantes beneficios económicos, mientras que los beneficios en términos de regulación del agua, reducción de carbono y calidad del aire suelen ser más modestos [21].

### **3.6.1 Remoción de contaminantes del aire**

i-Tree Eco calcula la eliminación de la contaminación en base a los siguientes compuestos: ozono ( $O_3$ ), dióxido de azufre ( $SO_2$ ), dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), monóxido de carbono (CO), material particulado menor a 2,5 micrones ( $PM_{2,5}$ ), y material particulado menor a 10 micrones y mayor a 2,5 micrones ( $PM_{10}$ ) [9].

La contaminación del aire puede ser por gases (principalmente, escape del tráfico rodado) o material particulado (por ejemplo, partículas de polvo y aerosoles) [24]. A nivel nacional, los árboles urbanos ofrecen la capacidad de eliminar cantidades significativas de estos contaminantes y, en consecuencia, mejorar la calidad ambiental y la salud humana. Los árboles eliminan la contaminación del aire gaseosa principalmente mediante la absorción a través de los estomas de las hojas, aunque algunos gases son eliminados por la superficie de la planta. Una vez dentro de la hoja, los gases se difunden en los espacios intercelulares y pueden ser absorbidos por películas de agua para formar ácidos o reaccionar con las superficies internas de la hoja [25].

Los árboles también eliminan la contaminación al interceptar partículas en el aire. Algunas partículas pueden ser absorbidas por el árbol, aunque la mayoría de las partículas que son interceptadas quedan retenidas en la superficie de la planta. La partícula interceptada a menudo se resuspende en la atmósfera, se lava con la lluvia o se deja caer al suelo con la caída de hojas y ramitas. En consecuencia, la vegetación es solo un sitio de retención temporal para muchas partículas atmosféricas [25]. La deposición varía según la densidad del follaje y la forma de la hoja, el espacio entre los árboles y la topografía de la superficie [24].

El material particulado se denomina comúnmente por grupos de tamaño: grueso ( $PM_{10}$ ) y fino ( $PM_{2,5}$ ). Se ha considerado que la fracción gruesa se compone principalmente de partículas naturales originados, por ejemplo de las erupciones volcánicas y las tormentas de arena; mientras que la fracción fina contiene principalmente partículas de fuentes antropogénicas, como la combustión de combustibles, el polvo de los frenos, las partículas de caucho de los neumáticos de los vehículos y las industrias de procesamiento [24]. El PM es el contaminante del aire más peligroso para la salud humana porque cuando se inhala, puede acumularse en el tejido pulmonar e incluso ingresar al torrente sanguíneo, creando un riesgo importante de enfermedad cardíaca cardiovascular y pulmonar, accidente cerebrovascular, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, enfermedad pulmonar cáncer, infecciones

respiratorias en niños, y empeorar las condiciones respiratorias existentes como el asma y la fibrosis quística. Las  $PM_{2.5}$  son más peligrosas para la salud, ya que pueden penetrar en partes más profundas del pulmón [26], además pueden permanecer en la atmósfera por distancias más largas desde su origen [24].

La contaminación del aire en las zonas urbanas es un problema ambiental importante, ya que afecta la salud y el bienestar de las personas. Los efectos de la exposición a la contaminación del aire pueden variar desde la mortalidad prematura hasta muchos efectos crónicos, como la capacidad y capacidad física reducida, tos, problemas en las vías respiratorias, daño permanente a los pulmones y enfisema. Los efectos se manifiestan en costos para la sociedad en días de trabajo perdidos, mayores facturas médicas y las consiguientes pérdidas de productividad. La contaminación del aire también reduce la visibilidad, daña la infraestructura y puede matar la vegetación. Los bosques urbanos también pueden afectar la calidad del aire local y regional al alterar los microclimas urbanos al reducir las temperaturas a través de la sombra y la evapotranspiración, cambiar los patrones de viento, modificar las alturas de la capa límite y reducir el uso de energía en los edificios. y las consiguientes emisiones de las centrales eléctricas. Los bosques urbanos también influyen en el cambio climático global mediante la eliminación directa de gases de efecto invernadero y afectando las emisiones de la producción de energía [27].

### **3.6.2 Almacenamiento y Secuestro de carbono**

La vegetación forestal, que concentra el 85% de la biomasa terrestre juega el papel más importante en el ciclo global y regional del carbono. Además de servir como sumidero de carbono al almacenar grandes cantidades de carbono en la madera sólida y otra materia orgánica, la vegetación forestal también reduce el contenido de  $CO_2$  atmosférico al aumentar la acumulación de biomasa y materia orgánica. Debido a que tanto la captura de carbono como la reducción del carbono atmosférico son importantes para equilibrar el carbono global, el impacto de la vegetación forestal urbana en el balance global de carbono es significativo, ya que facilita el almacenamiento de carbono, así como reduce consumo de energía y reducción de emisiones de carbono. Con este fin, la planificación y el manejo de los bosques urbanos pueden ser una de las formas más rentables y rentables de mitigar el cambio climático en comparación con el desarrollo de fuentes de energía alternativas [23].

El almacenamiento de carbono es la cantidad de carbono capturada en las partes de la vegetación leñosa sobre el suelo y bajo el mismo, por lo que es otra manera en la que los árboles pueden influenciar el cambio climático global. Conforme un árbol crece, almacena más carbono sujetándolo en su tejido. Cuando el árbol se muere y

descompone, nuevamente libera la mayoría del carbono almacenado a la atmósfera. Por lo tanto, el almacenamiento de carbono es una indicación de la cantidad de carbono que se puede liberar si se permite que los árboles mueran y se descompongan. Mantener árboles saludables mantendrá el carbono almacenado en los árboles, pero el mantenimiento de los árboles (como las podas) puede contribuir a las emisiones de carbono. Mientras que el secuestro de carbono. Los árboles reducen la cantidad de carbono en la atmósfera al secuestrar el carbono en el crecimiento nuevo cada año. La cantidad de carbono secuestrada anualmente aumenta con el tamaño y la salud de los árboles [9].

### **3.6.3 Escorrentía evitada**

En los ecosistemas naturales, la infiltración y la evapotranspiración de la lluvia son componentes importantes del ciclo hidrológico. En los paisajes urbanos, las extensas superficies impermeables y la vegetación reducida interrumpen la infiltración y la evapotranspiración [28], convirtiendo la precipitación en escorrentía de aguas pluviales, lo que provoca problemas de calidad y cantidad del agua [29]. Generalmente se asume que la evapotranspiración juega un papel menor en el balance hídrico de las medidas de control de aguas pluviales. Dado que los árboles urbanos establecidos pueden usar grandes cantidades de agua, su inclusión en las medidas de control de aguas pluviales podría potencialmente aumentar sustancialmente la evapotranspiración [28].

Grandes volúmenes de lluvia se convierten en escorrentía de aguas pluviales, lo que provoca inundaciones repentinas, la degradación de las vías fluviales urbanas [28]; mal funcionamiento del sistema de alcantarillado y deterioro de los recursos hídricos superficiales y subterráneos [29]; así como, contribuir a la contaminación de arroyos, humedales, ríos, lagos y océanos [9]. Por otro lado, las superficies impermeables y la alta extracción de agua hacen que el nivel freático de muchas ciudades disminuya [12].

Si bien la gestión tradicional de aguas pluviales ha dependido de la infraestructura gris, como los conductos de tuberías para recolectar y transportar las aguas pluviales a las instalaciones de tratamiento de aguas residuales o a las aguas superficiales, las ciudades están explorando la infraestructura verde para gestionar las aguas pluviales en su origen. La infraestructura verde descentralizada aprovecha las capacidades del suelo y la vegetación para infiltrarse, redistribuir y almacenar el volumen de aguas pluviales [29]. Los árboles y matorrales urbanos son benéficos al reducir el escurrimiento superficial, interceptan la precipitación, mientras que sus sistemas de raíces promueven la infiltración y el almacenamiento del agua en el suelo [9].



### **3.6.4 Emisiones biogénicas**

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) pueden contribuir a la formación de  $O_3$  y CO. La cantidad de emisiones de COV depende de la especie, la biomasa de las hojas, la temperatura del aire y otros factores medioambientales [6]. Además, los árboles pueden reducir la calidad del aire a través del polen alergénico. El ozono ( $O_3$ ) se encuentra naturalmente en la atmósfera. En estas concentraciones bajas y estables presenta poco riesgo para la salud. Sin embargo, se puede formar ozono adicional en la troposfera como contaminante secundario. Se produce por reacciones fotoquímicas con contaminantes antropogénicos, principalmente COV y dióxido de nitrógeno ( $NO_2$ ), a nivel del suelo [24].

Aunque las emisiones de COV son estimadas por i-Tree Eco, el modelo no cuantifica la formación de  $O_3$  nocivo posterior debido a la complejidad asociada con este proceso químico. El polen alergénico también se destaca comúnmente como un perjuicio para el ecosistema asociado con los árboles urbanos, incluso si los niveles de polen (y los impactos en la salud asociados) pueden variar sustancialmente en el tejido urbano, tanto espacial como temporalmente [17].

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Área de estudio

El municipio de Barcelona ocupa 102,2 km<sup>2</sup> que se extienden entre la cordillera de Collserola, el frente litoral y los ríos Besós y Llobregat. La ciudad se caracteriza por un tejido urbano denso y compacto, con una alta intensidad en la movilidad de vehículos de motor, especialmente en el centro, y una red de zonas verdes atomizada y discontinua, no siempre conectada con los entornos naturales que circundan la ciudad, pero con una elevada presencia de arbolado en la trama urbana [5]. En cuanto a la población la lectura del Padrón a 1 de enero de 2021 situaba en 1.660.314 personas residentes en la ciudad [30].

### 4.2 Datos climáticos y de contaminación del aire

La aplicación i-Tree Eco utiliza los datos climáticos (temperatura y precipitación) y de contaminantes del aire (PM<sub>2,5</sub>, CO, O<sub>3</sub>, NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>) diaria y por hora. Estos datos deben ser del mismo año y deben estar cargados en la aplicación o enviarse al servidor, para su evaluación por los especialistas, y poder utilizarlos.

Para este estudio se trabajó con los datos del año 2015, dado que ya se encontraba cargados en la aplicación i-Tree ECO. Cabe mencionar que se intentó cargar datos actuales (2021 o 2020) pero el servidor “i-Tree Database” no presentó esta alternativa. También se optó para el año 2019, pero no se pudo recolectar los datos completos de los contaminantes del aire, ya que de los 11 puntos de control de la red de vigilancia de la contaminación atmosférica de Barcelona, solo 3 estaciones presentaban 4 de los 5 contaminantes y ninguna presentaba resultado para PM<sub>2,5</sub> (Tabla 4) [31].

**Tabla 4. Datos de contaminantes en puntos de control de vigilancia en Barcelona para el año 2019.**

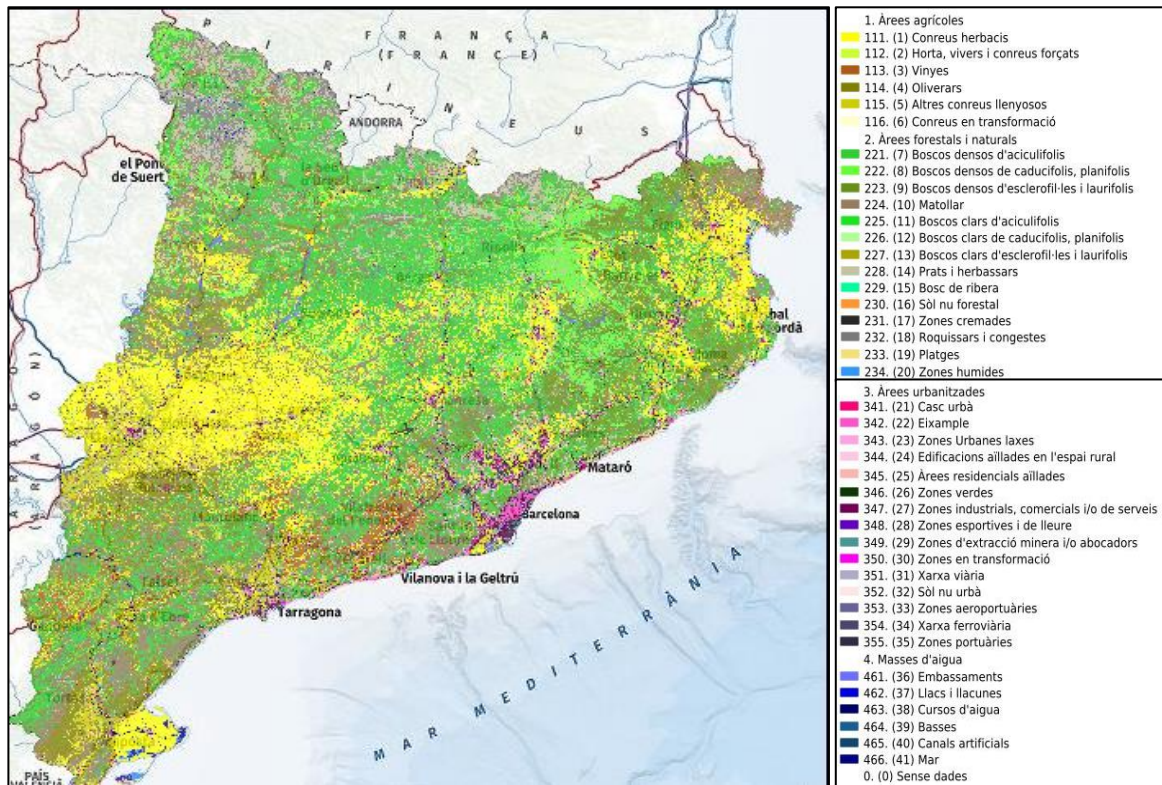
	Estación	PM <sub>2,5</sub>	CO	O <sub>3</sub>	NO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
1	Ensanche	NO	NO	SI	SI	SI
2	Ciudadella	NO	NO	SI	SI	NO
3	Gracia	NO	SI	SI	SI	SI
4	Observatorio Fabra	NO	NO	SI	SI	NO
5	Palacio real	NO	SI	SI	SI	SI
6	Parque Vall Hebron	NO	SI	SI	SI	SI
7	Poblenou	NO	NO	NO	SI	NO
8	Sagrera	NO	NO	NO	NO	NO
9	Santos	NO	NO	NO	SI	NO
10	St. Gervasi	NO	NO	NO	NO	NO
11	Torre Girona	NO	NO	NO	NO	NO

Fuente: Elaboración propia adaptado de [31].

## 4.3 Parcelas de evaluación

### 4.3.1 Estratificación de la cobertura del suelo

Se utilizó el Mapa de Cobertura del Suelo de Catalunya del año 2018, la cual establece 41 categorías (Figura 2). Dicho mapa se descargó y utilizó directamente en el Sistema de Información Geográfica denominado QGIS, mediante el conector “Open ICGC” [32] del Instituto Cartográfico y Geográfico de Catalunya (ICGC). Este mapa constituye la mejor representación de estructura urbana; sus sucesivas actualizaciones dan cuenta de los cambios en el uso del suelo a lo largo del tiempo [13].



Fuente: (ICGC) [32]

Figura 2. Mapa de Cobertura del Suelo de Catalunya del año 2018.

Debido que la presencia del arbolado público es diferente en cada categoría, se realizó un “inventario de muestreo pre estratificado”. La estratificación es un método rentable para la evaluación a gran escala y brinda resultados de muestreo más representativos [23]. Bajo este criterio se recategorizó las 41 categorías en 6 estratos (Tabla 5 y Figura 3), teniendo en cuenta las coberturas de suelo en común, tal como se detalla a continuación:

- ✓ Verde Natural: áreas agrícolas, bosques, matorrales, pradera o vegetación de ribera.
- ✓ Verde Urbano: Parques y Jardines.
- ✓ Urbano Denso: Densamente construido con o sin espacios verdes, edificaciones multifamiliares.
- ✓ Urbano Densidad Baja: Vivienda 1-2 familias con huerto o jardín, se encuentran alejadas del centro de la ciudad.

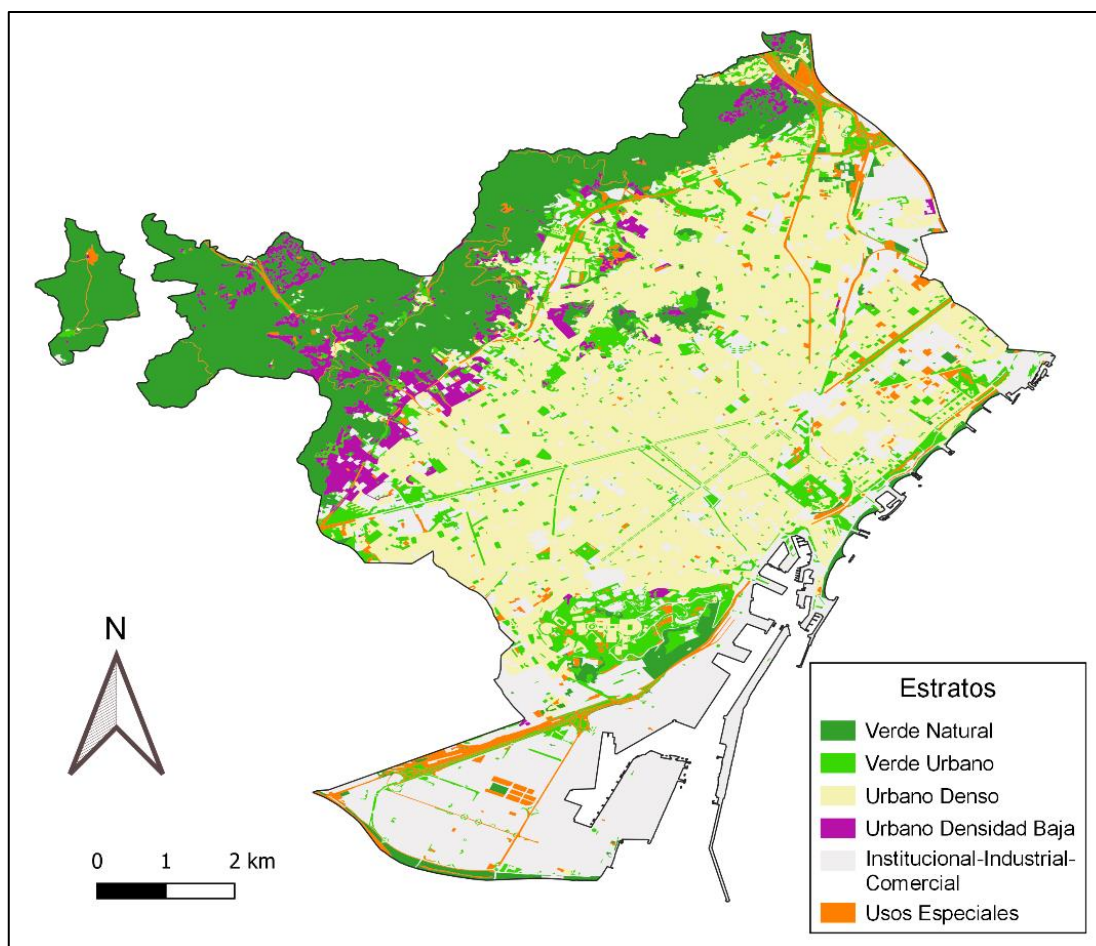
- ✓ Institucional-Industrial-Comercial: Hospital, cementerio, centro de enseñanza o zona portuaria; Industria, taller, almacén o gran zona comercial.
- ✓ Usos Especiales: cultivos agrícolas, áreas desnudas usado para cocheras y cercadas privadas. carga viaria y ferroviarias, masas de agua.

Tabla 5. Recategorización del mapa de cobertura de suelo de Barcelona

Estratos	Código según categorías del Mapa de Cobertura 2018	Área (ha)	Área (%)
Verde Urbano	26	1.013,89	10
Verde Natural	7, 8, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 20	2.094,17	21
Urbano Denso	21, 22, 28	3.843,32	38
Urbano Densidad Baja	23, 24, 25	369,3	4
Institucional- Industrial- Comercial	27, 29, 30, 35	2.419,14	24
Usos especiales*	1, 2, 3, 5, 31, 32, 34, 36, 37, 38, 39	433,01	4

Nota: Los códigos 4, 6, 12, 17, 33, 40 y 41 no se encuentran en el área de estudio.

Fuente: Elaboración propia adaptado de ICGC [32].



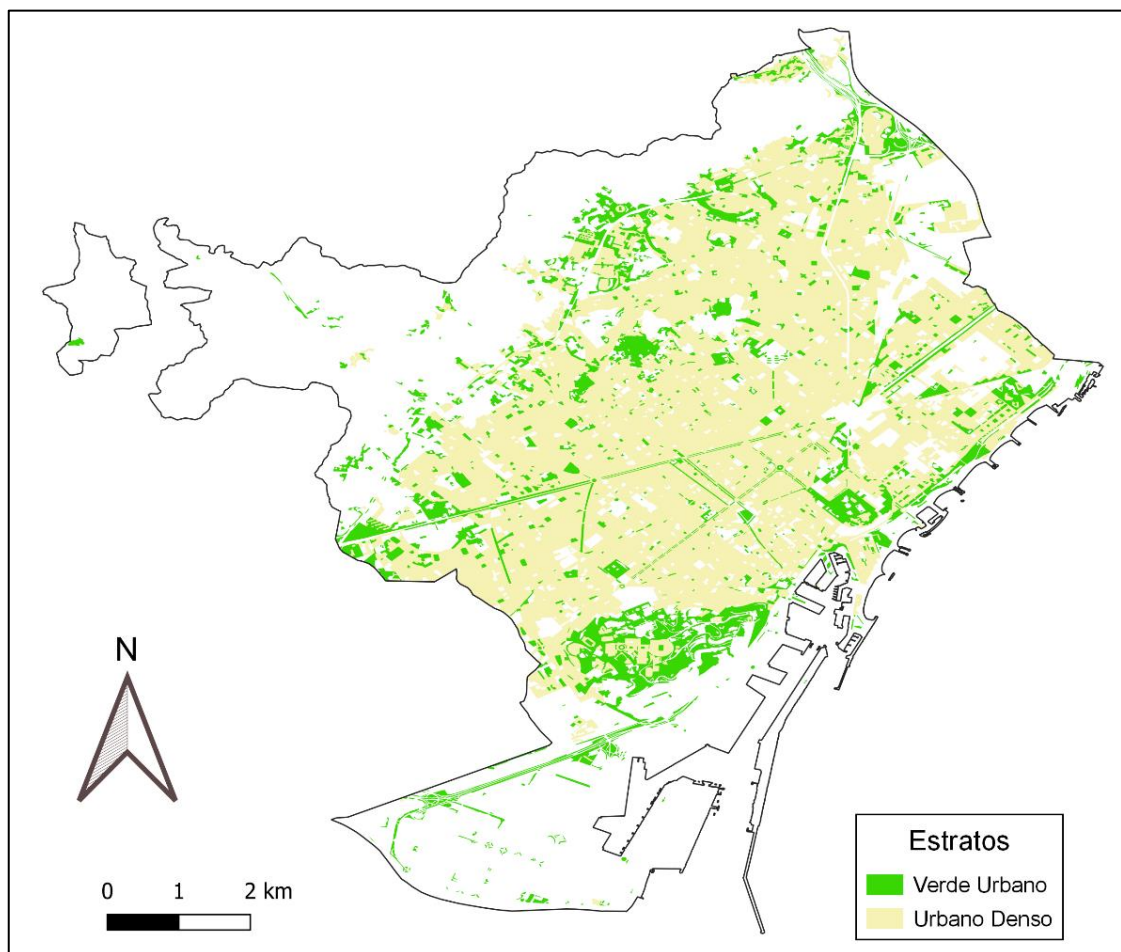
Fuente: Elaboración propia adaptado de ICGC [32].

Figura 3. Mapa de estratos establecidos para el Municipio de Barcelona.

Posteriormente se decidió que de los 6 estratos se trabajaría con 2 (Verde Urbano y Urbano Denso) (Figura 4), debido que son las que contienen la mayor cantidad de arbolado urbano público. Los otros 4 estratos fueron descartados debido a que:

- ✓ El estrato Verde Natural y Urbano Densidad Baja, son de difícil acceso al encontrarse lejos de la ciudad, además de que muchos árboles se encuentran en propiedad privada.
- ✓ El estrato Institucional-Industria-Comercial y Usos Especiales, presentan zonas con escasa o nula vegetación arbórea

El área de estudio final fue de 4.857 hectáreas, es decir el 48% de Barcelona Municipio.



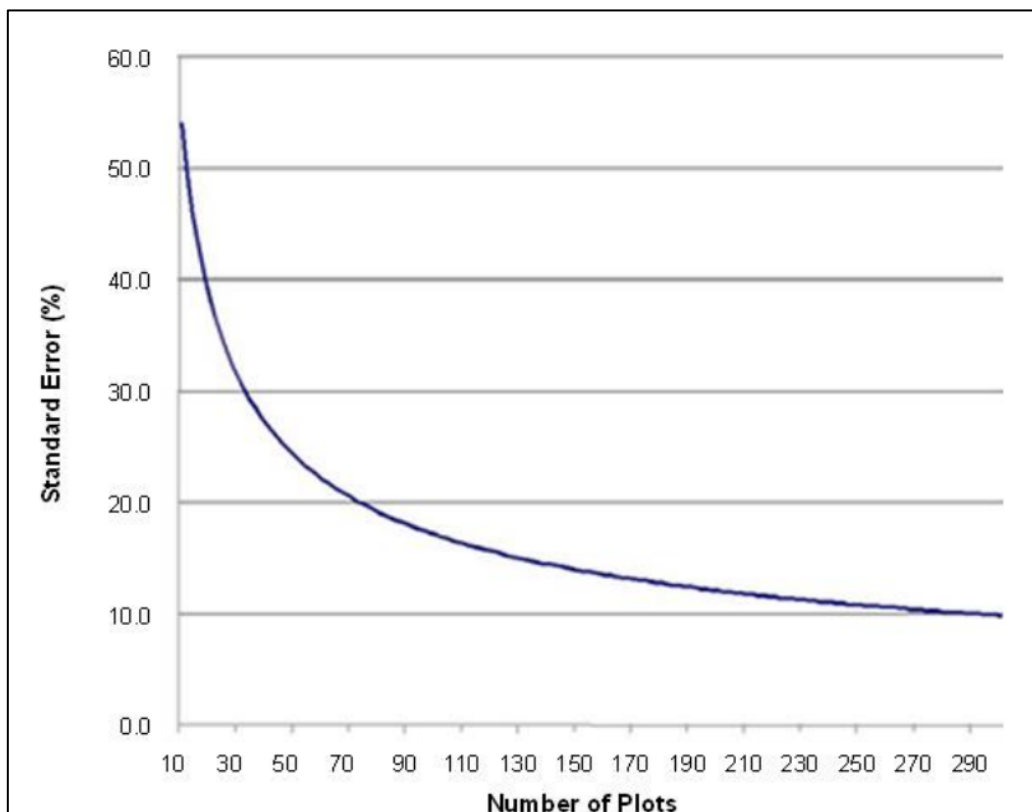
Fuente: Elaboración propia.

**Figura 4. Mapa de los 2 estratos seleccionadas para el área de estudio.**

#### **4.3.2 Determinación del número de parcelas**

EL número de parcelas se determinó en base a su relación con el error estándar (Figura 5) establecida en el Manual de i-Tree ECO, el cual menciona que la cantidad y tamaño de las parcelas afectará la variación de las estimaciones por lo que se recomienda trabajar con un error estadístico de 10 a 15% para lo cual el número de parcelas a evaluar estaría entre 100 a 250 [10].





Fuente: [10]

**Figura 5. Gráfica de relación error estándar – número de parcelas.**

También se tuvo en cuenta que Barcelona es una ciudad compacta y densamente construida, para lo cual el protocolo i-Tree Eco recomienda establecer 200 parcelas considerando, a la vez, que un estrato no debería tener menos de 20 parcelas. Se puede utilizar cualquier tamaño de parcela, pero el tamaño de parcela típico utilizado es de 0,04 hectáreas (radio de 11,35 m) [10].

De acuerdo con lo mencionado se estableció evaluar 200 parcelas que fueron distribuidas proporcionalmente en base a la superficie de cada estrato (Tabla 6), siendo 160 parcelas para Urbano Denso y 40 parcelas para Verde Urbano. Además, se determinó trabajar parcelas con un radio de 12 m (por practicidad) por lo que el área para cada una sería de 0,05 hectáreas.

**Tabla 6. Superficie y número de parcelas establecidas por categoría.**

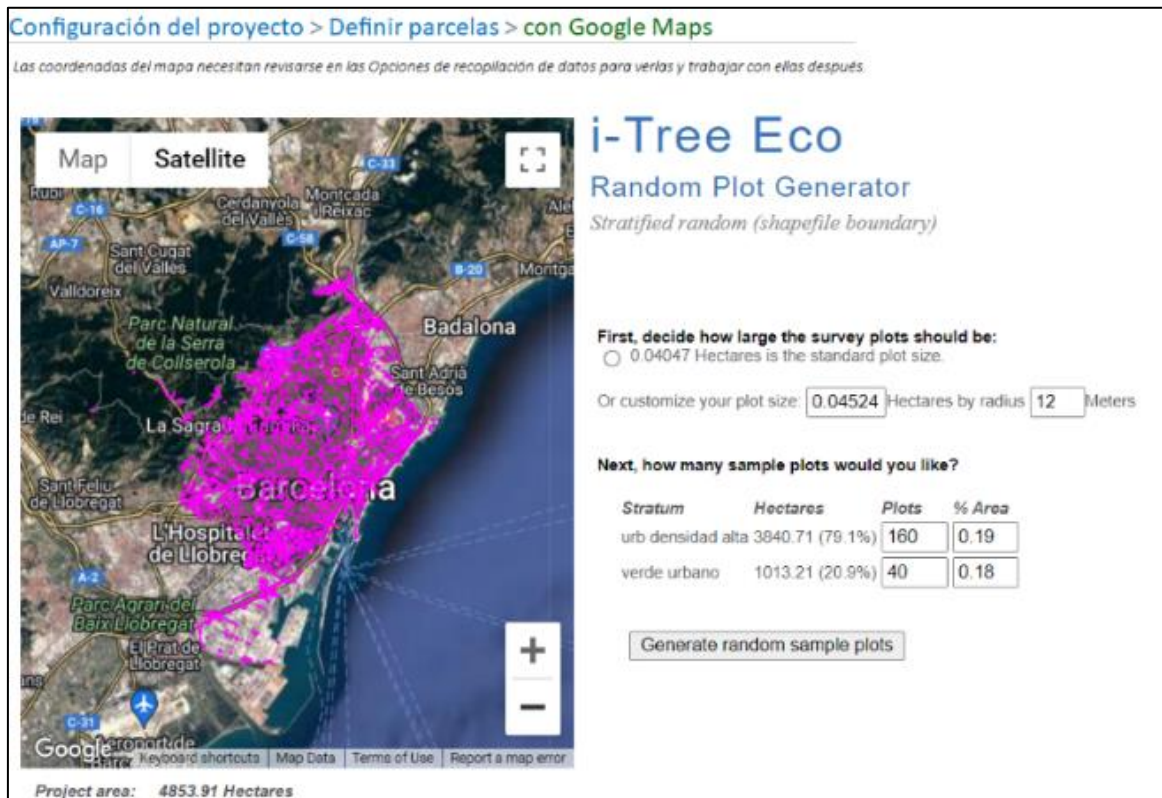
Estratos	Área total (ha)	% del total	N° de parcelas	Área evaluada (ha)	Área evaluada (%)
<b>Urbano Denso</b>	3,843	79,14	160	7,24	0,19
<b>Verde Urbano</b>	1,013	20,86	40	1,81	0,18
	4,856	100	200	9,05	

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.3.3 Distribución de parcelas

El muestreo aleatorio estratificado permite distribuir las parcelas entre los estratos para disminuir potencialmente la varianza general de la población estimada [10]. Para

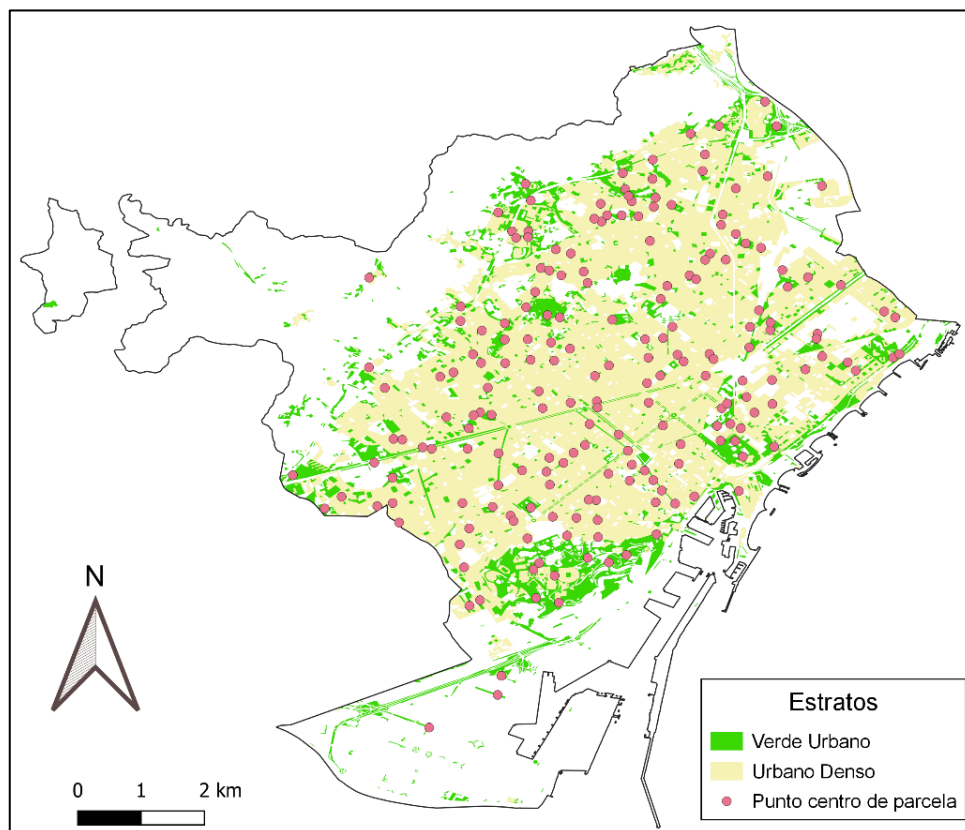
generar las parcelas aleatoriamente se utilizó la herramienta “Vía Google Maps” de la misma aplicación i-Tree Eco. Este método utiliza los límites del área de estudio previamente realizado y en formato ESRI (*Environmental Systems Research Institute*). Se seleccionó la opción “Stratified random (*shapefile boundary*)” y se cargaron los archivos del área de estudio considerando que deben estar en proyección geográfica (latitud/longitud) [10]. Luego se rellenó el tamaño de parcela (radio de 12 m); tal como se observa en la Figura 6.



Fuente: [9] [10]

**Figura 6. Generación de puntos centros de las parcelas aleatorias en la aplicación i-Tree ECO.**

Una vez elaboradas las parcelas se descargan las coordenadas de lo que serían los puntos centros de la parcela. Estos son exportados y llevados al QGIS donde se define las parcelas circulares (con la herramienta “*buffer*”) con radio de 12 m (Figura 7).



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7. Ubicación de los puntos centros de las parcelas.**

Las parcelas que no pudieron evaluarse fueron reemplazadas de un listado de parcelas alternas (10 para cada estrato), seleccionándolas según el orden consecutivo.

#### **4.4 Recopilación de datos en campo**

El levantamiento de los datos se realizó en los meses de mayo y junio, época en la que los árboles caducifolios ya vuelven a presentar hojas, lo cual es fundamental para las evaluaciones. Previo al inicio de la evaluación se realizaron salidas de pruebas en la que se determinó un tiempo de evaluación de 60 minutos por parcela, aproximadamente.

Para la planificación y programación de levantamiento de datos en campo se identificaron las parcelas con presencia de vegetación arbórea, mediante las imágenes satelitales (Google Earth) y la ubicación espacial de los árboles públicos (OpenDataBCN [31]). Para aquellas parcelas sin vegetación pública o con vegetación en zonas privadas (acceso restringido) solo se anotó el tipo de recubrimiento del suelo. Con esta información se estableció rutas de evaluación considerando la evaluación de 5 a 8 parcelas por día y con un rango entre 20 a 30 árboles por día.

Las variables seleccionadas; tanto para la información de la parcela como para la vegetación dependieron de los servicios ecosistémicos que se desean cuantificar [11]. Para esto se consideró la matriz de la Tabla 7.



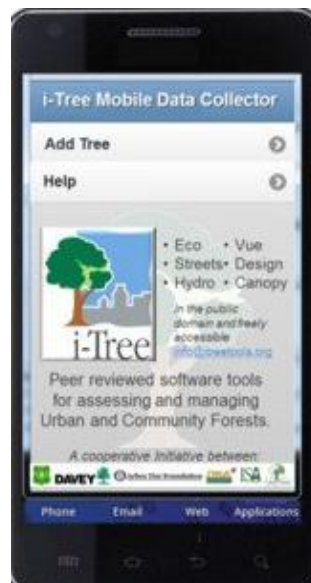
Tabla 7. Matriz de variables vs resultados.

Variables derivadas	Servicios ecosistémicos						
	Área foliar	Biomasa foliar	Remoción de contaminantes del aire	Almacenamiento de carbono	Secuestro de carbono	Escorrentía evitada	Emisiones COV
Especies	D	D	I	D	D	D	D
Diámetro a la altura del pecho (DAP)				D	D		
Altura total	D	D	I	D	D	I	I
Altura a la base de la copa	D	D	I	D	D	I	I
Ancho de copa	D	D	I	D	D	I	I
Exposición de luz en copa (CLE)				D	D		
Copa ausente (%)	D	D	I	D	D	I	I
Muerte regresiva de copa (%)	D	D	I	D	D		
Uso de tierra				D	D		
Cobertura de copa (%)			D			D	
Cobertura de suelo (%)							

Nota: D= uso directo. I= uso indirecto.

Fuente: Elaboración propia adaptado de Manual del Usuario [10] y Guía de Campo [11].

Los datos fueron registrados en el “Recolector Móvil de Datos” que es un formulario de recolección de datos de inventario basado en la red de la misma aplicación i-Tree Eco (Figura 8). Para esto se utilizó un móvil con servicio de internet y para la recopilación de datos se siguió las pautas y recomendaciones del Manual del Usuario [10].



Fuente: [11]

**Figura 8. Recolector móvil de datos de i-Tree ECO.**

Previo a cada salida de campo, se realizó un esbozo del área de cada parcela (Figura 9); para lo cual se utilizó el Programa QGIS y las imágenes satelitales (Google Earth) y en las que se determinó la distancia del centro de la parcela a ciertos componentes fijos de la ciudad (edificios, semáforo, tachos de basura, líneas de tránsito pintadas en el asfalto, veredas y otros) con la finalidad de facilitar, en el campo, el establecimiento del punto centro de la parcela. Además, con los datos de los árboles del censo urbano descargados de “OpenDataBCN” [31] se identificó los árboles dentro de cada parcelas.



Fuente: elaboración propia.

**Figura 9. Imagen guía para establecimiento de la parcela en el campo con componentes fijos (puntos azules) y árboles (puntos amarillos).**

#### 4.4.1 Información de la parcela

Una vez ubicado el centro de la parcela se estableció el perímetro de la parcela con el telémetro NIKON Forestry Pro II (Figura 10), el cual mide distancias horizontales con una precisión de  $\pm 0,3$  m. Si el centro de la parcela estuviese en una edificación o lugar inaccesible se procedió a seguir las instrucciones del Manual del Usuario para “Centros de Parcela Sin Acceso” [10].



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 10. Telémetro NIKON Forestry Pro II.**

En la Tabla 8 se detallan las variables seleccionadas para la información de la parcela.

**Tabla 8. Información de la parcela.**

Variable	Descripción	Materiales y consideraciones
<b>Fotografía</b>	Es útil por si se presentase algún error en la fase de gabinete y no tener que regresar a la parcela.	Cámara del móvil.
<b>Porcentaje medido</b>	Se estima el área de la parcela a evaluar. Puede ser menor a 100% si parte de la parcela está en otro estrato o es inaccesible.	Programa QGIS e imágenes satelitales. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Cubierta arbórea</b>	Cantidad de la parcela cubierta por el dosel de los árboles. La cubierta arbórea puede provenir de árboles fuera de la parcela, así que las parcelas sin árboles podrían aun tener cubierta arbórea.	Imágenes satelitales y comprobado en campo visualmente. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Cubierta arbustiva</b>	Cantidad de la parcela cubierta por el dosel de los arbustos.	Estimación visual. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Espacio plantable</b>	Cantidad de área de parcela que es plantable para árboles (suelo plantable que no está debajo del dosel de los árboles ni tiene otras restricciones encima y donde plantar o establecer árboles no estaría prohibido debido al uso del suelo, tales como senderos o caminos).	Estimación visual. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Uso de suelo *</b>	Describe cómo se está utilizando el suelo (residencial, parque, comercial, institucional, etc.).	Se seleccionó una alternativa de la lista predeterminada y se estimó visualmente la proporción de cada categoría en porcentaje.
<b>Cubierta terrestre</b>	Describe los materiales que cubren el suelo (roca, cemento, asfalto, césped, etc.) todo lo que está por debajo de árboles y arbustos.	Se seleccionó una alternativa de la lista predeterminada y se estimó visualmente la proporción de cada categoría en porcentaje.

\*Nota: Para edificios de uso mixto, el uso del suelo se basa en el uso dominante (uso que recibe la mayoría del tráfico peatonal); puede no siempre ocupar la mayoría del espacio en el edificio.

Fuente: Elaboración propia adaptado de Guía de Campo [11].

#### 4.4.2 Información de la vegetación arbórea

Dentro de la vegetación arbórea se consideró también las palmeras, por lo que en este trabajo las palmeras estarán incluidas en el concepto de arbolado urbano. Se consideró árbol a los individuos leñosos con DAP mayor a 2,54 cm y altura mayor a 30,50 cm, además todos los árboles se deben registrar siempre y cuando por lo menos la mitad de su tronco se encuentre dentro de la parcela [10]. Cabe mencionar que los árboles de área privadas ubicadas dentro de las parcelas no fueron considerados ya que solo se consideraron los árboles públicos.

Para medir distancias horizontales y alturas se utilizó el telémetro NIKON Forestry Pro II y para medir el diámetro de los árboles se utilizó una cinta diamétrica SDMO-QUINO de acero templado flexible con graduación simultanea de diámetro y circunferencia (Figura 11).



Fuente: elaboración propia.

**Figura 11. Equipos utilizados para las mediciones (telémetro y cinta diamétrica).**

En la Tabla 9 se detallan las variables seleccionadas para la información de la vegetación arbórea.

**Tabla 9. Información de la vegetación arbórea**

<b>Variable</b>	<b>Descripción</b>	<b>Consideraciones y materiales</b>
<b>Id del árbol</b>	Identificador único dentro de una parcela.	Enumerar según el orden en el que se evalúa cada árbol.
<b>Especie</b>	Se identifican a la clasificación taxonómica más específica posible. Los árboles que no se clasifican a nivel de la especie pueden clasificarse por género o grupo de especie.	Se utilizó los datos del censo de árboles urbanos descargado en OpenDataBCN [31] y en campo se utilizó la aplicación de Atlas de Biodiversidad [33].
<b>Árbol de calle</b>	Se determinó como árbol de calle, aquellos que se encuentran en línea o presentan cubierta impermeable a su alrededor (menos de 2 m).	Se registra si el árbol es de calle o no.
<b>Uso del suelo</b>	El tipo del uso del suelo en el cual se ubica el árbol. Los usos del suelo que se definieron, anteriormente, en la información de la parcela.	Se registra el uso del suelo para cada árbol.
<b>Diámetro a la altura del pecho (DAP)</b>	Diámetro a una altura entre 1,30 a 1,40 m. En árboles bifurcados se midieron hasta 6 tallos.	Se utilizó una cinta diamétrica de metal
<b>Muerto</b>	Indicación si el árbol está muerto.	Aquellos árboles muertos en pie. Se determinó su especie, DAP y altura.
<b>Altura total</b>	Distancia a lo largo del fuste desde el suelo hasta la parte superior del árbol (vivo o muerto).	Telémetro Niko modo altura. Con aproximación cada 50 cm.
<b>Altura de la copa</b>	La altura desde el suelo a la cima viva del árbol. No puede ser mayor a la altura total, pero si puede ser igual.	Telémetro Niko modo altura. Con aproximación cada 50 cm.
<b>Altura a la base de la copa</b>	Desde el suelo a la base de la copa. la base de la copa viva se determina por medio del follaje vivo y no por el punto donde la rama converge con el fuste principal. Por lo tanto, si la base de la copa toca el suelo, cero sería un valor aceptable	Telémetro Niko modo altura. Con aproximación cada 50 cm.
<b>Ancho de la copa</b>	Se midió en dos direcciones: norte-sur y este-oeste.	Aplicación de brújula del móvil. Telémetro Niko modo distancia, para distancias mayores a 7 m y estimación para distancias menores a 7 m o cuando era difícil acceso. Con aproximación cada 50 cm.
<b>Porcentaje de copa faltante</b>	Porcentaje del volumen de la copa que no está ocupado por ramas y hojas, debido a la poda, muerte, defoliación, copa dispareja, u hojas enanas o escasas (no se incluye la poda natural).	Teniendo en cuenta la forma natural de la copa de cada especie se visualizó (desde varias perspectivas) la “silueta de la copa” esperada, como si fuera un árbol saludable y en excelente condición. Se estimó el porcentaje de follaje ausente.
<b>Muerte regresiva</b>	El porcentaje de la muerte no incluye la muerte natural y normal de las ramas, por ejemplo, la autopoda debido a la competencia de copas o sombreado en la parte inferior de la copa. Sin embargo, la muerte de ramas en el lado o lados y cima de la copa debido a sombra de un edificio u otro árbol se incluiría.	Se visualizó una silueta (mentalmente) para estimar la proporción de ramas muertas en la copa. Los árboles se asignan a una de siete clases de estado posibles: excelente (menos de un 1% de ramas muertas); buen estado (1% a 10%); regular o pasable (11 a 25%); pobre (26% a 50%); crítico (51% a 75%); moribundo (76% al 99%) o árbol muerto (100% de ramas muertas).
<b>Exposición de copa a la luz</b>	Lados del árbol que reciben luz solar desde arriba.	Se dividió la copa verticalmente en 4 lados iguales, la cima del árbol se cuenta como un lado. Se contó el número de lados que

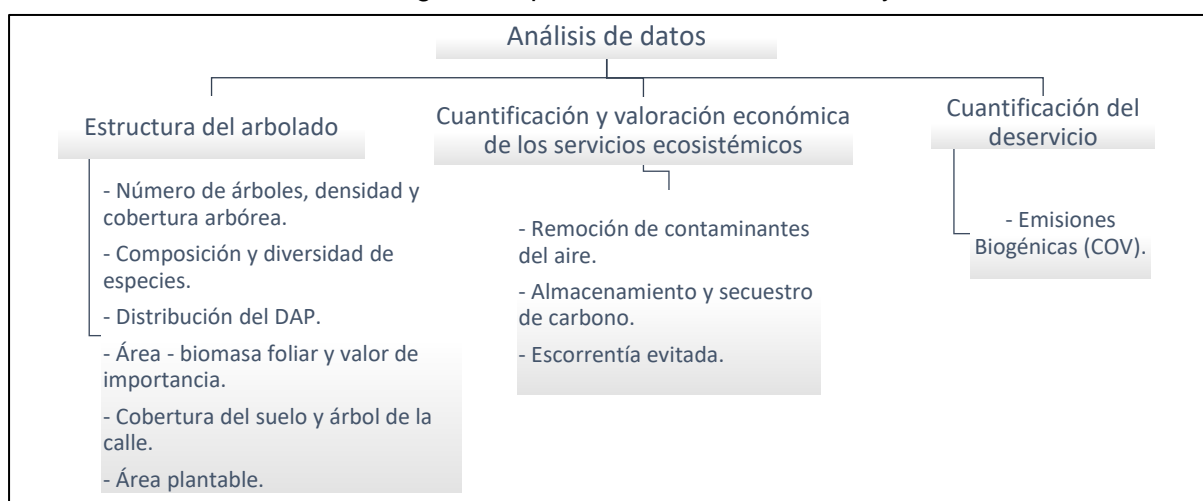
Variable	Descripción	Consideraciones y materiales
		recibirían luz directa, como mínimo una tercera parte del lado.
<b>Porcentaje impermeable</b>	El área impermeable debajo de la línea de goteo del árbol. Si la copa del árbol cruza el límite de la parcela, toda la zona debajo del árbol aún se considera.	Estimación visual. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Porcentaje de arbusto</b>	El porcentaje del área debajo de la línea de goteo que está ocupada por arbustos. Si la copa del árbol cruza el límite de la parcela, toda la zona debajo del árbol aún se considera.	Estimación visual. Se coloca el dato en porcentaje.
<b>Dirección edificios</b>	Para árboles mayores a 6,1 m de altura, que estén a una distancia menor a 18,3 m. de edificios residenciales. Se pueden registrar hasta tres edificios, los cuales no tienen que estar ubicados en la parcela.	Se registró la dirección (azimut en grados) y la distancia del árbol (metro) a la parte más cercana del edificio. Se utilizó la aplicación de brújula del móvil y Telémetro Niko modo distancia.

Fuente: Elaboración propia adaptado de Guía de Campo [11].

#### 4.5 Procesamiento de datos

Al culminar de evaluar las 200 parcelas se volvió a revisar los datos en búsqueda de errores. Finalmente, los datos se cargaron a la aplicación i-Tree Eco (versión 6.0), que contiene varios modelos matemáticos (científicamente validados) basados en procesos que estiman y extrapola los datos introducidos del muestreo a toda el área de estudio [9].

Posteriormente se descargó la información en formato Microsoft Excel para elaborar tablas resúmenes y gráficos que ayuden al análisis tanto para el área de estudio como por estratos (Urbano Denso y Verde Urbano) siguiendo el esquema de la Figura 12; de esta manera se podrá comparar con resultados de otras ciudades (ver Anexo 1). Cabe mencionar que la aplicación solo brinda resultados concretos, es decir no presenta el procedimiento ni las ecuaciones utilizadas. Motivo por el cual, para poder entender estos cálculos, se buscó en la bibliografía especializadas, la cual es muy limitada.



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 12. Esquema para el análisis de los resultados.**



#### 4.5.1 Estructura del arbolado

Dado que la estructura del bosque urbano determina los servicios ecosistémicos que estos brindan a la ciudad, se cuantificó y describió la estructura del área de estudio.

##### a) Número de árboles, densidad y cobertura arbórea

El número de árboles estimados por la aplicación i-Tree ECO es comparado con los resultados del censo a junio del 2022 [31], de igual manera para la cobertura arbórea. Debido a que el tamaño de la ciudad puede influir significativamente en el número total de árboles, se utilizó la densidad arbórea (árboles/hectárea) para compararla con otras ciudades (ver Anexo 1) ya que es un índice más estandarizado de la estructura del bosque urbano.

##### b) Composición y diversidad de especies

La diversidad en el área de estudio se ha calculado utilizando dos índices diferentes. La riqueza de especies, que es el número de especies muestreadas, y el índice de Shannon-Wiener ( $H'$ ), que se calcula a partir del número de especies presentes en un área (riqueza) y de la cantidad relativa de cada una de estas especies (abundancia), mediante la siguiente ecuación:

$$H' = \sum_{i=1}^S p_i \times \ln(p_i)$$

Donde: S = número de especies presentes.

Pi = proporción de las especies  $p_i = n_i/N$

$n_i$  = número de individuos de la especie i.

N = número total de individuos.

Este índice contempla la cantidad y abundancia de especies que hay en la zona de estudio y se expresa con valores positivos que varían entre 1 y 5. Los resultados del índice de Shannon-Wiener serán categorizados según la Tabla 10.

**Tabla 10. Categorización del índice de Shannon-Wiener.**

<b>Índice de Shannon (<math>H'</math>)</b>	<b>Denominación</b>
<b>0 a 1</b>	Muy baja diversidad
<b>1 a 2</b>	Baja diversidad
<b>2 a 3</b>	Moderada diversidad
<b>Mayor a 3</b>	Alta diversidad

Fuente: [34].

Además, dentro de la diversidad se incluye el origen de las especies muestreadas, para determinar la proporción de especies con base en el área de distribución nativa de cada especie.

### a) Distribución de DAP

Los árboles fueron agrupados de acuerdo con su DAP y categorizados, tal como se muestra en la tabla 11.

Tabla 11. Categorización de DAP.

DAP (cm)	Denominación
Menor a 15	Juveniles
15 a 30	Madurando
30 a 60	Semimaduros
Mayor a 60	Maduros

Fuente: [35].

### b) Área - biomasa foliar y valor de importancia

El área foliar (LA, por sus siglas en inglés) se calcula mediante ecuaciones de regresión establecidas para especies latifoliadas y coníferas. Para estos cálculos se utiliza un coeficiente de sombra, que es el porcentaje de intensidad de luz interceptada por las copas de los árboles; además de las variables de especie, altura total, altura y anchura de la copa; y ajustado al porcentaje de ramas muertas.

$$LA = \left[ \frac{\ln(1 - X_s)}{-k} \right] \pi r^2$$

Donde:  $X_s$  = coeficiente de sombreado promedio de la especie

$k$  = coeficiente de extinción de luz (0,52 para coníferas y 0,65 para frondosas)

$r$  = radio de copa

La estimación final del área foliar se ajusta en función de la muerte regresiva de la hoja de la copa (condición del árbol) que oscilan entre 1 que indica que no hay muerte regresiva y 0 que indica 100% de muerte regresiva (árbol muerto).

Por otro lado, la biomasa foliar se calcula convirtiendo las estimaciones del área foliar, utilizando medidas específicas (gramos de peso seco de hoja/m<sup>2</sup> de área foliar) de cada especie.

Por su parte los valores de importancia se calculan como la suma del porcentaje de la población y porcentaje del área de las hojas.

### c) Cobertura de suelo y árbol de la calle

Se diferencia las coberturas permeables de las impermeables establecidas por la aplicación. Siendo las coberturas permeables: mantillo o hojarasca, hierbas o herbáceas, gras, gras sin mantenimiento, roca y agua. Y las coberturas impermeables: edificio, cemento y asfalto. Tal como se muestra en la Figura 13 y Figura 14, respectivamente.





Fuente: Elaboración propia.

**Figura 13. Cobertura del suelo con materiales permeables (roca, hojarasca, hierbas o herbáceas, gras, gras sin mantenimiento y agua).**



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 14. Cobertura del suelo con materiales impermeables (edificio, cemento y asfalto).**

Se determinó como árbol de calle, aquellos que se encuentran en línea o presentan cubierta impermeable a su alrededor (menos de 2 m). Y la aplicación i-Tree ECO los calculó en base a la denominación dada para cada árbol durante el muestreo.

#### **d) Área plantable**

Calculado en base a la información tomada durante el muestreo, en el cual se estimó la proporción de área, en cada parcela, en donde se podría establecer un árbol. Esta área debe permitir el crecimiento del árbol sin interrumpir el desarrollo de otro ya establecido, además de no afectar otros usos del suelo (como caminos).

### **4.5.2 Cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos**

Se obtuvo información de cantidad y valor de remoción de contaminación del aire, almacenamiento y secuestro de carbono y escorrentía evitada. Para el caso del deservicio de producción de Compuestos orgánicos volátiles (COV) solo se obtuvo la cuantificación. Estos resultados fueron comparados con otras investigaciones.

#### **a) Remoción de contaminantes del aire**

La aplicación i-Tree ECO utiliza el modelo de "Deposición Seca" de la contaminación del aire (es decir, la eliminación de la contaminación durante los períodos sin precipitaciones) que consta de una serie de ecuaciones basadas en la concentración de contaminantes (CO, O<sub>3</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub> y PM<sub>2,5</sub>), datos meteorológicos (temperatura y precipitación) y la superficie foliar saludable de los árboles. Cabe mencionar que, si bien el CO<sub>2</sub> es un contaminante del aire y el componente principal del Calentamiento Global, este se cuantifica dentro de la biomasa del árbol (almacenamiento y secuestro de carbono) ya que forma parte del comportamiento fisiológico de las plantas (mediante la fotosíntesis); a diferencia de los otros contaminantes, mencionados, que se remueven del aire al posarse en la superficie, principalmente, de las hojas.

El índice de área foliar (LAI) es la cantidad total de área foliar unilateral de follaje de plantas leñosas por unidad de área de suelo. Este índice influye en la cantidad de contaminación eliminada y en la productividad de la planta. La cantidad de cubierta de dosel y su LAI asociado son las principales variables del bosque urbano utilizadas para estimar la cantidad de deposición seca por parte de la vegetación urbana [27].

Para cuantificar la cantidad de remoción de contaminantes por los árboles urbanos es fundamental determinar el "Flujo de Contaminantes" y la "Velocidad de deposición", las cuales son explicadas mediante sus ecuaciones, a continuación. Sin embargo, el cálculo final conlleva un procedimiento más complejo que no se detallará en este estudio, pero que se encuentra en el documento "*i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions*" [36] o en algunas pocas publicaciones [25] [37] [38].

El flujo contaminante ( $F$ ; en  $\text{g/m}^2/\text{s}$ ) se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$F = Vd \cdot C$$

Donde:  $Vd$  = velocidad de depósito (m/s).

$C$  = concentración del contaminante ( $\text{g/m}^3$ ).

La velocidad de deposición seca ( $Vd$ ) indica la capacidad del bosque urbano para filtrar los contaminantes del aire de la atmósfera. La velocidad de deposición se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$Vd = (Ra + Rb + Rc)^{-1}$$

Donde:  $Ra$  = resistencia aerodinámica.

$Rb$  = resistencia de la capa límite cuasilaminar.

$Rc$  = resistencia del dosel.

El valor de la eliminación de contaminantes del aire se evalúa mediante el método BenMAP, que estima los costos evitados por incidentes de salud adversos en función de la mejora de la calidad del aire y los registros médicos en los EE.UU. [39]. Estos valores se encuentran establecidos en la misma aplicación y son de: 1,10 € por tonelada métrica de  $\text{CO}$ , 53,85 € por tonelada métrica de  $\text{O}_3$ , 8,04 € por tonelada métrica  $\text{NO}_2$ , 2,93 € por tonelada métrica de  $\text{SO}_2$ , 1.868,90 € por tonelada métrica  $\text{PM}_{2,5}$ , 2,98 € por tonelada métrica de  $\text{PM}_{10}$  [9].

Debe considerarse que los  $\text{PM}_{2,5}$  y  $\text{PM}_{10}$  depositados en la superficie de las hojas, puede volver a suspenderse en la atmósfera o eliminarse durante las lluvias y disolverse o transferirse al suelo. Motivo por el cual la combinación de eventos puede conducir a una eliminación y valor de la contaminación positiva o negativa según los diferentes factores atmosféricos [9].

#### **b) Almacenamiento y secuestro de carbono**

Se calcula el carbono total almacenado y el carbono secuestrado anualmente por el bosque urbano, utilizando ecuaciones alométricas para cada especie. Si no se encuentra una ecuación alométrica para una especie individual, se usa el promedio de los resultados de las ecuaciones del mismo género. Si no se encuentran ecuaciones de género, se usa el promedio de los resultados de todas las ecuaciones de hoja ancha o de coníferas.

Las ecuaciones que predicen la biomasa aérea se convierten en biomasa de todo el árbol en función de una relación raíz-brote de 0,26. Las ecuaciones que calculan la biomasa en peso fresco (PF) se multiplican por factores de conversión ( $fc$ ) específicos de especie o género (derivados del contenido promedio de humedad de las especies) que son 0,48 para coníferas y 0,56 para latifoliadas, con lo cual se obtiene la biomasa en peso seco (PS). Los árboles urbanos tienden a tener menos biomasa aérea que la

predicha por las ecuaciones de biomasa derivadas de un bosque natural, por lo cual deben multiplicarse por un factor de ajuste ( $f_a$ ) de 0,8. Debido a que los árboles de hoja caduca pierden sus hojas anualmente, solo se calcula el carbono almacenado en la biomasa de madera.

$$PS = PF \cdot f_c \cdot f_a$$

La biomasa total en peso seco de los árboles se convierte en carbono almacenado (CA) total multiplicándolo por 0,5.

$$CA = PS \cdot 0,5$$

Para estimar el carbono secuestrado se utiliza la tasa de crecimiento estandarizadas (CE) promedio para los árboles de la calle (crecidos al aire libre) que es de 0,83 cm/año. Luego se calcula el crecimiento base (CB) mediante un factor de corrección (FC) que depende de las medidas de exposición a la luz (CLE), siendo el FC igual a 2,26 cuando la CLE de la copa es de 0 a 1; FC igual a 1,78 cuando la CLE de la copa es de 2 a 3 y FC igual a 1 cuando la CLE de la copa es de 4 a 5. Luego las tasas de CB se ajustan según la condición del árbol ( $Ca$ ) dado por la muerte regresiva para lo cual se multiplican por 1 (sin ajuste) para los árboles en condición regular a excelente, por 0,76 para árboles pobres, por 0,42 para los árboles críticos, por 0,15 para los árboles moribundos y por 0 para los árboles muertos.

$$CB = \frac{CE}{FC} \cdot Ca$$

Finalmente, la diferencia en las estimaciones de almacenamiento de carbono entre el año X y el año X+1 es la cantidad bruta de carbono secuestrado anualmente.

Para este análisis, los valores de almacenamiento y secuestro de carbono se calculan con base en 161 € por tonelada métrica [9].

### **c) Escorrentía evitada**

El escurrimiento superficial evitado anual se calcula con base en las precipitaciones interceptadas por la vegetación, en particular la diferencia entre el escurrimiento anual con y sin vegetación. Aunque las hojas de los árboles, las ramas y la corteza pueden interceptar la lluvia y mitigar así el escurrimiento evitado, sólo se toman en cuenta las precipitaciones interceptadas por las hojas.

UFORE-Hydro modificó el modelo *Rutter* al incorporar un término de almacenamiento de intercepción del índice de área foliar (LAI) que varía estacionalmente, incluyó la simulación de vegetación escasa y redujo los parámetros del modelo al restringir el goteo del dosel hasta que se llene el almacenamiento. La interceptación de la precipitación por el dosel está controlada tanto por la dinámica climática de la intensidad

y la duración de la precipitación, como por las características del árbol en cuanto al área foliar, la capacidad de almacenamiento y el almacenamiento inicial. La ecuación de intercepción en UFORE-Hydro es la siguiente:

$$\frac{\Delta C}{\Delta t} = P - R - E$$

Donde: C (m) = profundidad del agua en el dosel de la unidad en el momento t.

P (m/s) = precipitación por encima del dosel.

R (m/s) = precipitación por debajo del dosel que llega al suelo, disminuida de P por intercepción.

E (m/s) = tasa de evaporación del dosel húmedo.

$\Delta t$  = intervalo de tiempo de simulación

El cálculo final conlleva un procedimiento más complejo que no se detallará en este estudio, pero que se encuentra en el documento "*Mechanistic Simulation of Tree Effects in an Urban Water Balance Model*" [40].

El valor del escurrimiento evitado se calcula por el precio 1,902 €/m<sup>3</sup> [9].

### **4.5.3 Cuantificación del deservicio**

#### **Emisiones biogénicas (COVs)**

A partir de los datos de campo y datos meteorológicos el modelo cuantifica: emisiones horarias de COVs (monoterpenos, isopreno y otros compuestos orgánicos volátiles); y formación de O<sub>3</sub> y CO a partir de las emisiones de COVs. Gracias a estos datos, se podrán clasificar las especies que mejor efecto tienen sobre la calidad del aire [9].

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

### 5.1 Estructura del arbolado

#### 5.1.1 Número de árboles, densidad y cobertura arbórea

Tal como se observa en la Tabla 12, el área de estudio presenta un total de 305.350 árboles (con un error estándar de  $\pm 17.933$  árboles). Mientras que el Ayuntamiento de Barcelona reporta en el censo del arbolado, a junio del 2022 [31], un total de 232.555 árboles (para todo el Municipio de Barcelona), de los cuales aproximadamente el 85% (197.308 árboles) coinciden con del área de estudio. Es decir, al comparar ambos resultados se tiene, aparentemente, una sobreestimación del 55% de árboles por parte de la aplicación i-Tree ECO. Sin embargo, cabe mencionar que varios árboles aún no se encuentran dentro del censo mencionado; principalmente los ubicados en la Zona Franca, la zona de Montjuic y las zonas aledañas al Parque Natural de la Sierra del Collserola (Figura 15). A pesar de que la cantidad de árboles para cada estrato son similares (45,8% en Verde Urbano y 54,2% en Urbano Denso) se debe considerar que el área evaluada para Urbano Denso es más de tres veces que el Verde Urbano. Por otro lado, los resultados obtenidos son cercanos a los calculados por la investigación del CREAM en el 2009 [6], siendo 212.437 para Verde Urbano y 223.304 árboles para Urbano Denso.

Tabla 12. Composición del arbolado.

Categoría	Área (ha)	N° árboles estimados con i-Tree Eco	N° de árboles del censo junio 2022	Sobreestimación (%)
Verde Urbano	1.013	139.761 (45,8%)	78.445 (39,8%)	78
Urbano Denso	3.843	165.589 (54,2%)	118.863 (60,2%)	39
Área de estudio	4.856	305.350	197.308	55



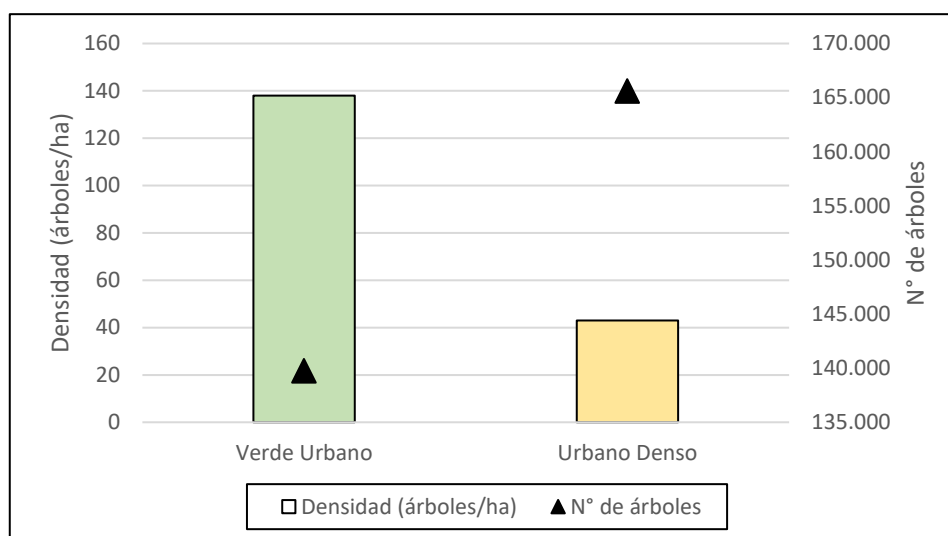
Nota: árboles del censo a junio 2022 (puntos) [31].

Figura 15. Espacios dentro del área de estudio (Izquierda, Zona Franca. Derecha, Zona de Montjuic) con árboles no censados.

La densidad arbórea del área de estudio es de 63 árboles/hectárea, pero al observar la densidad del Verde Urbano (138 árboles/hectárea) su valor es significativamente mayor que Urbano Denso (43 árboles/hectárea) (Figura 16), esto debido a que claramente en Urbano Denso la proporción de edificación, asfalto y otros componentes



comunes de la infraestructura gris de una ciudad es predominante y por otro lado, el Verde Urbano cuenta con el espacio y condiciones necesarias para contener mayor cantidad de árboles.



**Figura 16. Densidad y número de árboles por estrato.**

La cobertura arbórea es de casi el 20% y la arbustiva del 3% (Tabla 13), lo que quiere decir que alrededor de la quinta parte del área estudiada se encuentra bajo una cubierta vegetal. Este resultado es similar al calculado por el estudio del CREAM [6] en el cual se obtuvo un 25,2% de cobertura total (considerando el Parque del Collserola), siendo el 56,30% y 15,20% para los estratos Verde Urbano y Urbano Denso, respectivamente.

**Tabla 13. Proporción de la cobertura vegetal.**

Categoría	Cobertura arbórea (ha)	Cobertura arbórea (%)	Cobertura arbustiva (%)
<b>Verde Urbano</b>	408	40,30	9,90
<b>Urbano Denso</b>	548	14,20	1,10
<b>Área de estudio</b>	956	19,70	3,00

Al comparar la cantidad de árboles obtenidos con las de otras ciudades en el mundo (ver Anexo 1) se observa que Barcelona está muy por debajo en la lista, pero cabe recordar que el presente estudio solo abarcó el 48% de todo el Municipio de Barcelona. El CREAM [6] calculó 1.419.823 árboles para todo el Municipio de Barcelona (considerando el Parque del Collserola) con lo cual ya se estaría acercando a ciudades más arborizadas. Sin embargo, la densidad y la cobertura arbórea son mejores índices para hacer estas comparaciones. Teniendo esto en cuenta se observa que Barcelona presenta valores parecidos a la ciudad de Nueva York (que cuenta con más de 5.000.000 de árboles) pero de igual manera aún se encuentra lejos de estar entre los primeros lugares, pues otras ciudades como Mongantown y Atlanta superan el 30% de cobertura arbórea y alcanza casi los 300 árboles/hectárea.

### 5.1.2 Composición y diversidad de especies

De acuerdo con lo obtenido en las parcelas de muestreo la riqueza es de 60 especies, el estrato Verde Urbano presenta 37 especies mientras que Urbano Denso 46. Ambos estratos comparten 23 especies, pero cuando se analiza las 10 especies más abundantes por estrato se observa que 7 especies se encuentran en ambos y en proporciones variadas (Figura 17). El índice de Shannon presenta valores altos por lo que ambos estratos, así como toda el área de estudio se consideran de alta diversidad (Tabla 14).

Tabla 14. Diversidad de especies.

Estrato	Riqueza (S)	Shannon (H')
Verde Urbano	37	3,00
Urbano Denso	46	3,10
Área de estudio	60	3,30

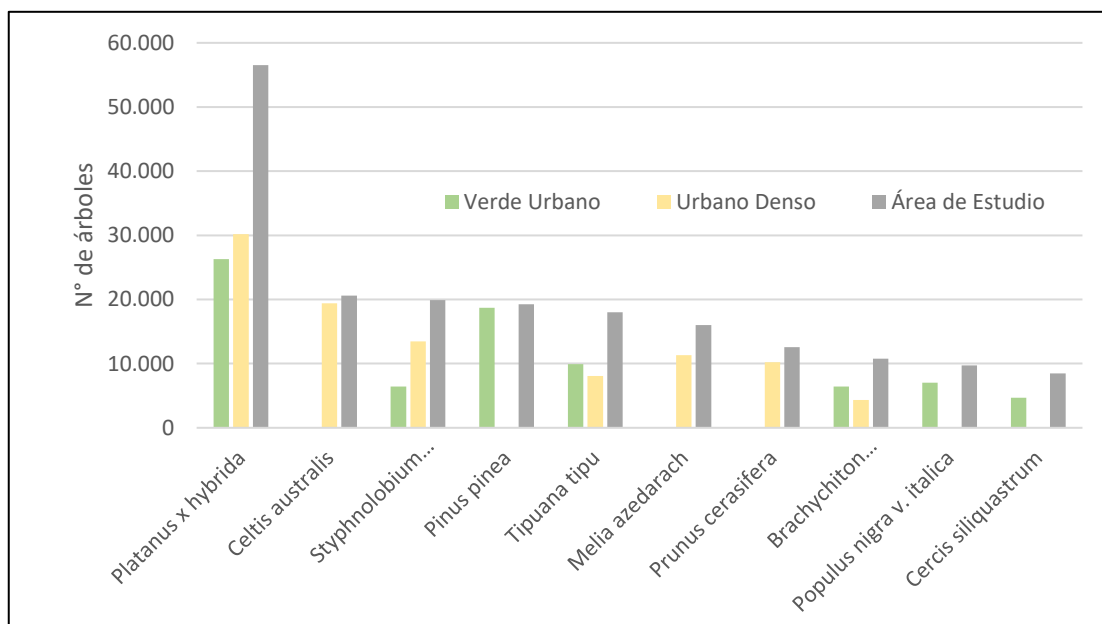


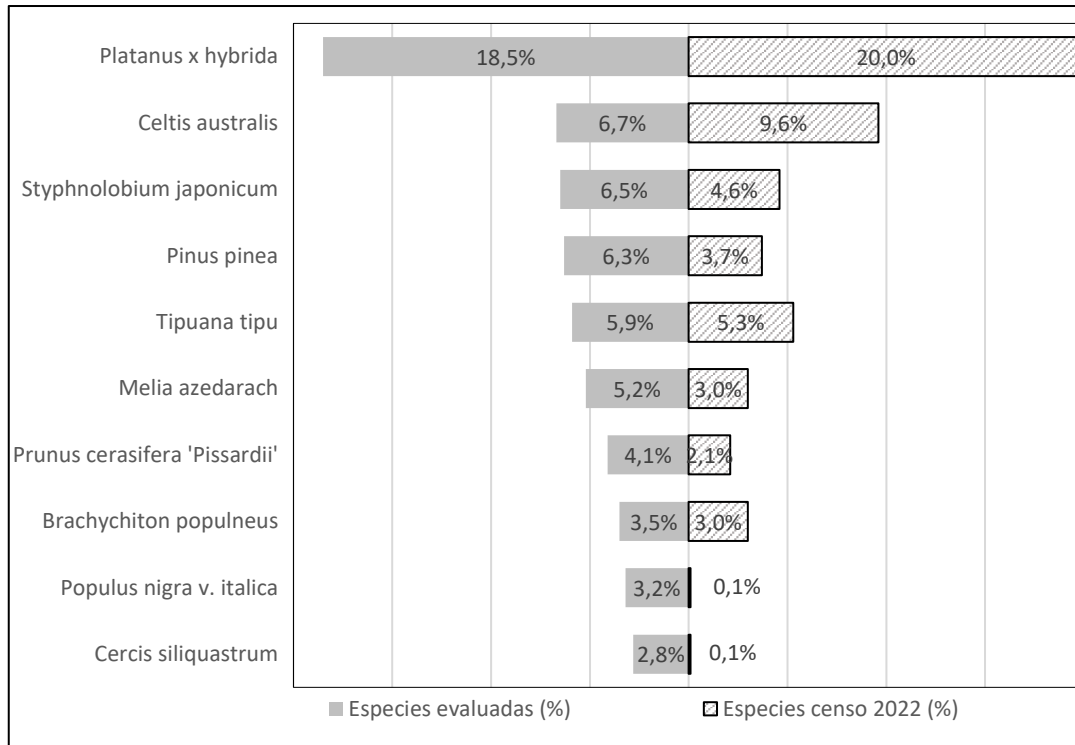
Figura 17. Especies más abundantes en área de estudio y por estratos.

Estas 60 especies obtenidas no reflejan, a primera vista, la verdadera diversidad del arbolado en Barcelona, ya que en realidad existen más de 150 especies de árboles [8] y si se considera los cultivares, variedades o híbridos esta suma puede ascender a más de 450 especies [31].

De acuerdo con las Figura 18, de las 10 especies más abundantes, como resultado del muestreo, se tiene que las 7 primeras representan el 53,2% del total de los árboles. El orden de estas especies así como su valor relativo coinciden con la del censo a junio del 2022 [31]. Esto podría indicar una dependencia excesiva de una pequeña cantidad de especies tal como se menciona en un estudio en 50 ciudades de California (EEUU), en la cual se registró que 5 especies representan entre el 45% y 60% de las poblaciones

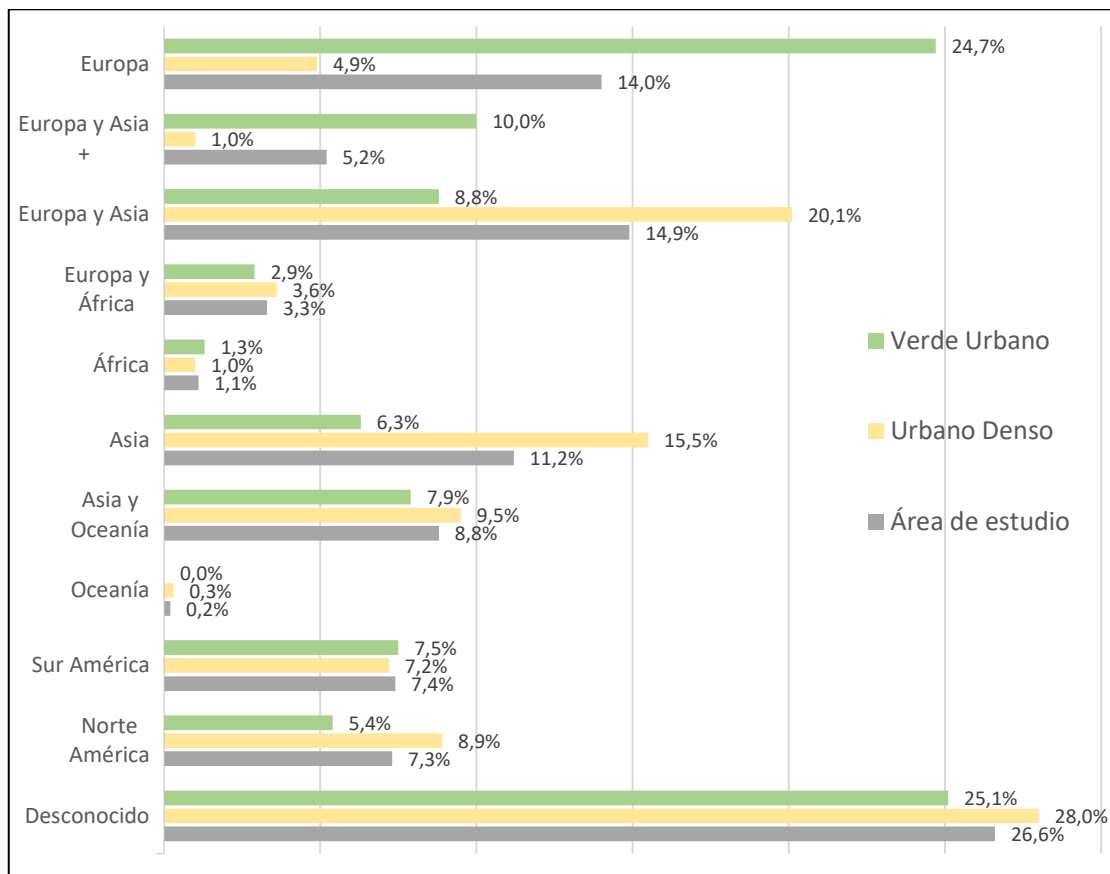


totales de árboles en las calles [35]. En el año 2012 se inició un proyecto para equilibrar la abundancia del conjunto de árboles y palmeras de la calle, con el objetivo de que en 50 años ninguna especie supere el 15% del total de la población [7]. Aunque si se quiere ser más riguroso se tendría en cuenta la regla de *Santamour* que a veces se denomina “la regla del 10%”, pues propone que no debería plantarse más de un 10% de una sola especie [4].



**Figura 18. Especies más abundantes según la evaluación del muestreo y del censo 2022.**

Tal como se observa en la Figura 19, Barcelona está compuesta de una mezcla de especies de árboles nativos y exóticos. El 14% de los árboles son especies nativas de Europa y el 23,4% es de origen de zonas cercanas o vinculadas a Europa. La mayoría de las especies de árboles exóticos son de origen desconocido (26,6%), le sigue en procedencia América (14,7%) y Asia (11,2%). Al observar el origen de las especies por estratos se tiene que, del estrato Urbano Denso resalta la alta proporción de especies originarias de otros continentes no vinculados a Europa (42,4%, sin considerar desconocidos); mientras que en Verde Urbano las especies nativas de Europa tienen mayor presencia (24,7%).



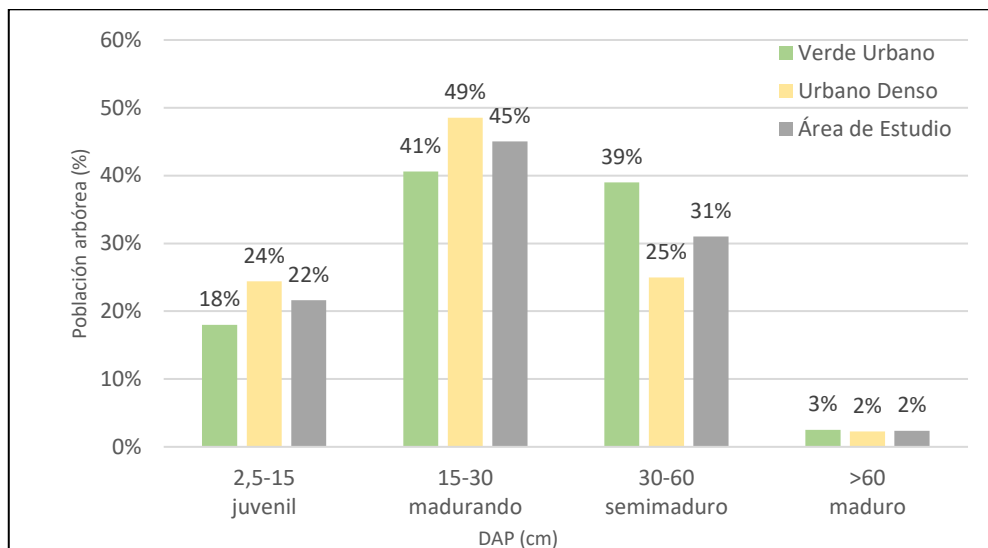
Nota: "Europa y Asia +" indica que la especie es originaria de Europa, de Asia y de otro continente más.

**Figura 19. Origen de las especies por estratos.**

Dado que en la ciudad los árboles son seleccionados según sus características, se tiene a menudo una diversidad mayor en los bosques urbanos que en los paisajes nativos que los rodean. La diversidad de especies disminuye el riesgo que se produciría si una plaga propagará una enfermedad que afectaría a una parte importante de los árboles, si estos fuesen dominados por una sola especie; además con una alta diversidad la población arbórea sería más resiliente ante los posibles efectos del cambio climático (sequías, tormentas, etc.) [8] [35] [7] [4]. Sin embargo, algunas especies exóticas puede presentar un riesgo invasivo si su adaptación les permitiera competir y desplazar a las nativas.

### 5.1.3 Distribución del DAP

En toda el área de estudio el 22% de los árboles son juveniles (<15 cm), el 45% madurando (15-30 cm), el 31% semimaduros (30-60 cm) y el 2% maduros (>60 cm). Esta tendencia es la misma para ambos estratos, aunque con una ligera diferencia en los árboles semimaduros (Figura 21). La literatura consultada recomienda una distribución de edad objetivo que busqué la estabilidad de la población de árboles, para lo cual el 40% de todos los árboles deben ser menor de 20 cm, el 30% de 20 a 40 cm, el 20% de 40 a 60 cm y el 10% mayor a 60 cm [41].



**Figura 20. Población de árboles según DAP (cm).**

Los resultados obtenidos muestran una concentración de DAP del arbolado en las categorías medias y denota una baja cantidad de árboles maduros. La diversidad de edades es esencial para la estabilidad de la población porque una población de edades desiguales permite a los administradores asignar los costos de mantenimiento de manera uniforme durante muchos años y asegura un flujo constante de beneficios de la cubierta de dosel estable de los árboles [35]. Además, los beneficios asociados con la biomasa de los árboles grandes y viejos pueden verse parcialmente anulados por su potencial de falla, así como por sus altos costos de mantenimiento y remoción [35].

#### 5.1.4 Área - biomasa foliar y valor de importancia

El área foliar total es de 47,18 Km<sup>2</sup>, siendo la correspondiente a Verde Urbano ligeramente menor que para Urbano Denso. Sin embargo, al analizar la densidad foliar es Verde Urbano el que presenta mayor valor (22.231 m<sup>2</sup>/ha), más de tres veces el valor respecto a Urbano Denso (6.420 m<sup>2</sup>/ha). La biomasa foliar para ambos estratos es cercana, sin embargo, la densidad de la biomasa (kg/ha) es significativamente superior en Verde Urbano (Tabla 15).

**Tabla 15. Área y biomasa foliar.**

Estrato	Área foliar total (km <sup>2</sup> )	Densidad de área foliar (m <sup>2</sup> /ha)	Biomasa foliar (tonelada métrica)	Densidad biomasa foliar (kg/ha)
<b>Verde Urbano</b>	22,52	22.231	1.726,3	1.703,8
<b>Urbano Denso</b>	24,66	6.420	1.489,1	387,7
<b>Área de estudio</b>	47,18	9.720	3.215,4	662,4

Las 10 especies con los valores de importancia más altos son enumeradas en la Tabla 16, siendo el *Platanus x hybrida* el de mayor valor. Los valores de alta importancia no significan que estos árboles deban usarse necesariamente en el futuro, sino que estas especies dominan actualmente la estructura del bosque urbano.

Tabla 16. Valor de importancia de las especies más comunes.

Especie	Población (%)	Área de las hojas (%)	Valor de importancia
<i>Platanus x hybrida</i>	18,50	39,80	58,30
<i>Tipuana tipu</i>	5,90	8,90	14,80
<i>Celtis australis</i>	6,70	7,40	14,20
<i>Styphnolobium japonicum</i>	6,50	3,50	10,00
<i>Pinus pinea</i>	6,30	3,50	9,80
<i>Melia azedarach</i>	5,20	3,90	9,10
<i>Ulmus pumila</i>	2,50	4,70	7,20
<i>Populus nigra v. italica</i>	3,20	2,30	5,50
<i>Brachychiton populneus</i>	3,50	1,50	5,00
<i>Prunus cerasifera</i>	4,10	0,70	4,90

### 5.1.5 Cobertura de suelo y árbol de la calle

Tal como se observa en la Figura 21, la cobertura impermeable (79.7%) domina en toda el área de estudio, siendo edificación el 40,9%, cemento el 21,9% y asfalto 16,9%. Al analizar por estratos se observa que este material impermeable es mayor aún (92,6%) en Urbano Denso y la escasa área permeable corresponde a materiales de categoría denominada roca la cual sería el alcorque de los árboles (Figura 22a) y algunos espacios con jardineras. Por el contrario, el estrato Verde Urbano presenta un 70% de área permeable, siendo el 35% vegetación baja (herbácea, gras y gras no mantenido) y el resto es roca (25%) y hojarasca (8,9%). Además, en Verde Urbano resalta una proporción de cemento alta (21,1%), lo cual es debido principalmente a la presencia de caminos hechos con este material (Figura 22b).

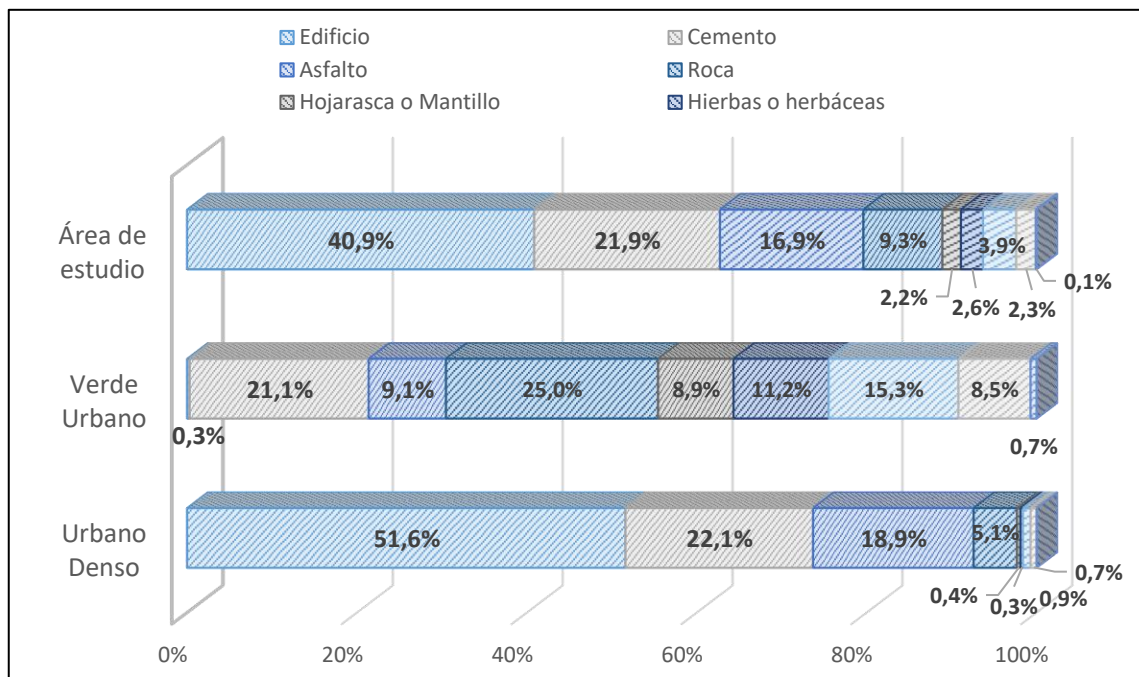


Figura 21. Porcentaje de cobertura de suelo.



**Figura 22. Cobertura de suelo. a) Cobertura permeable (alcorque) en Urbano Denso. b) Cobertura impermeable (cemento) en Verde Urbano.**

Las superficies impermeables están estrechamente relacionadas con las necesidades ecológicas de una ciudad y son un indicador importante para evaluar el grado de urbanización. La cobertura vegetal representa la cantidad de naturalismo en un área determinada, mientras que las superficies impermeables indican la cantidad de área pavimentada y edificada. La fragmentación del hábitat inducida por la urbanización separará y reducirá el espacio disponible para los árboles, generando una correlación negativa entre la superficie impermeable y la cubierta vegetal [23]. Más de un 80% del ámbito municipal de Barcelona está urbanizado o es urbanizable, de la cual un 56% está ocupada por edificios [5].

En este estudio el 50% de los árboles se encuentran bajo la denominación “árboles de la calle” (Tabla 17). Aunque se esperaría que todos los árboles de Urbano Denso se encuentren bajo estas condiciones solo el 81% lo está, pues se observó árboles en espacios con un alcorque de grandes dimensiones. Por el contrario se esperaría que los árboles del Verde Urbano no estén en esta clasificación de árboles de calle, sin embargo, dentro de este estrato se encuentran las ramblas que es un espacio arbolado con predominancia de cobertura impermeable cerca a los árboles.

**Tabla 17. Árboles de la calle.**

<b>Estrato</b>	<b>Nº de árboles total</b>	<b>Nº de árboles de calle</b>	<b>% árboles de estrato</b>	<b>% de todos los árboles</b>
<b>Verde Urbano</b>	139.761	19.882	14	7
<b>Urbano Denso</b>	165.589	133.227	81	43
<b>Área de estudio</b>	305.350	153.109		50

La trama urbana, en general, no suele ofrecer a los árboles las mejores condiciones de vida, por lo que el desarrollo de un árbol plantado en la calle presenta diferencias notables con respecto a un árbol de la misma especie y edad en condiciones naturales o, incluso, plantado en un parque o en lugares más naturalizados. Factores como la anchura y orientación de la calle, la disponibilidad de suelo, el tipo de pavimento, la altura de los edificios, el grado de insolación, las sombras proyectadas, los usos de los edificios o el nivel de tráfico inciden de forma notable en la capacidad de supervivencia de cada especie. Los factores limitantes no solo inciden en el bienestar de la parte aérea del árbol, visible para todos los ciudadanos, sino también en el del sistema radicular sobre el que se fundamenta su desarrollo, y que suele pasar desapercibido [5]. Los árboles de las calles a menudo reciben una atención especial debido a su función pública [42].

Se esperaría que en Verde Urbano la proporción de cobertura arbórea sea mayor, pero algunos de estos espacios contienen otras áreas utilizadas para: dispersión y ocio (mayormente con cobertura de gras), juegos infantiles y área para animales de compañía (con cobertura de arena), cuyas áreas contienen árboles con mayor distanciamiento (Figura 23a). En cuanto a Urbano Denso la copa de los árboles no se desarrolla de manera óptima, ya que deben competir y adecuarse a las edificaciones y al paso de los vehículos (principalmente camiones y buses) por lo que deben ser podados constantemente; además la compactación del suelo alrededor del árbol y la predominancia de cobertura impermeable también disminuye el crecimiento de las copas (Figura 23b). Las superficies impermeables reducen la disponibilidad de agua para la vegetación urbana, como los árboles de las calles. La reducción de la infiltración debajo de superficies impermeables, combinada con volúmenes de raíces limitados, compactación del suelo y alta demanda de evaporación en las ciudades, lo que significa que es probable que los árboles de las calles experimenten estrés por sequía, que podría reducir los valiosos servicios ecosistémicos que brindan los árboles [28].





Figura 23. a) Espacios en Verde Urbano con mayor distanciamiento de árboles. b) Copa de árbol adaptado al edificio en Urbano Denso.

### 5.1.6 Área plantable

En la Tabla 18 se observa el espacio plantable en el área de estudio (6,4%), un valor nada despreciable dado que corresponden a más de 311 hectáreas, siendo 233 hectáreas (23%) de Verde Urbano y 77 hectáreas (2%) de Urbano Denso. En el caso de Urbano Denso el espacio plantable se podría considerar alto ya que la ciudad de Barcelona presenta arbolado en casi todas sus calles y los pocos espacios con condiciones adecuadas para plantar árboles son escasos.

Tabla 18. Espacio plantable.

	Verde Urbano (%)	Urbano Denso (%)	Área de estudio (%)
<b>Espacio plantable</b>	23,00	2,00	6,40

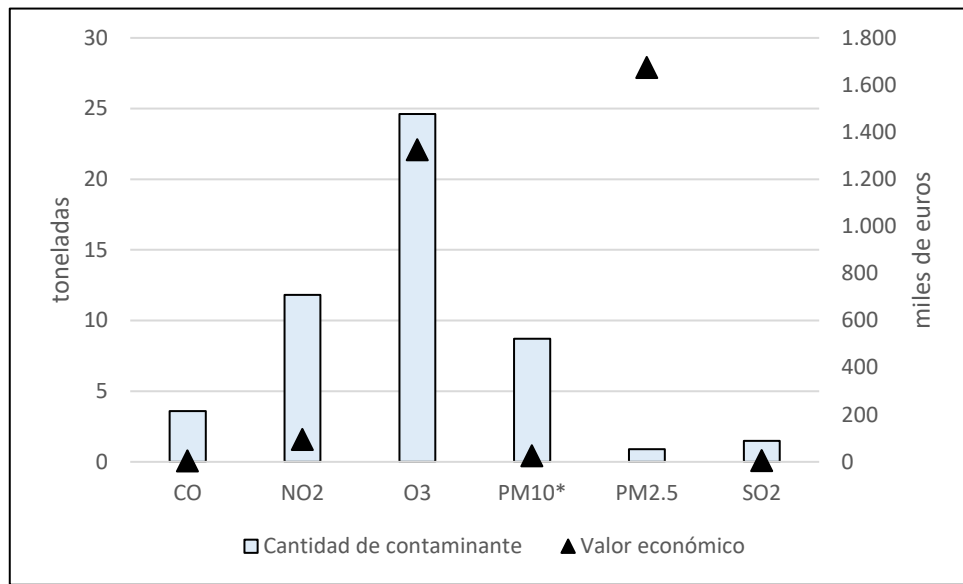
El Proyecto Cerdà determina que en las grandes avenidas y en las calles se planten árboles de porte grande, para ofrecer sombra a la ciudad, con un distanciamiento de 8 m [18]. Con esta distancia se estima que se podrían plantar más de 12.000 árboles en el estrato Urbano Denso. Y si para Verde Urbano, donde los árboles están más dispersos, se utilizaría un distanciamiento entre 12 a 16 m; se estima que habría espacio para plantar más de 10.300 árboles. Es decir, en el área estudiada habría espacio para plantar más de 22.000 árboles.

## 5.2 Cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos

### 5.2.1 Remoción de contaminantes del aire

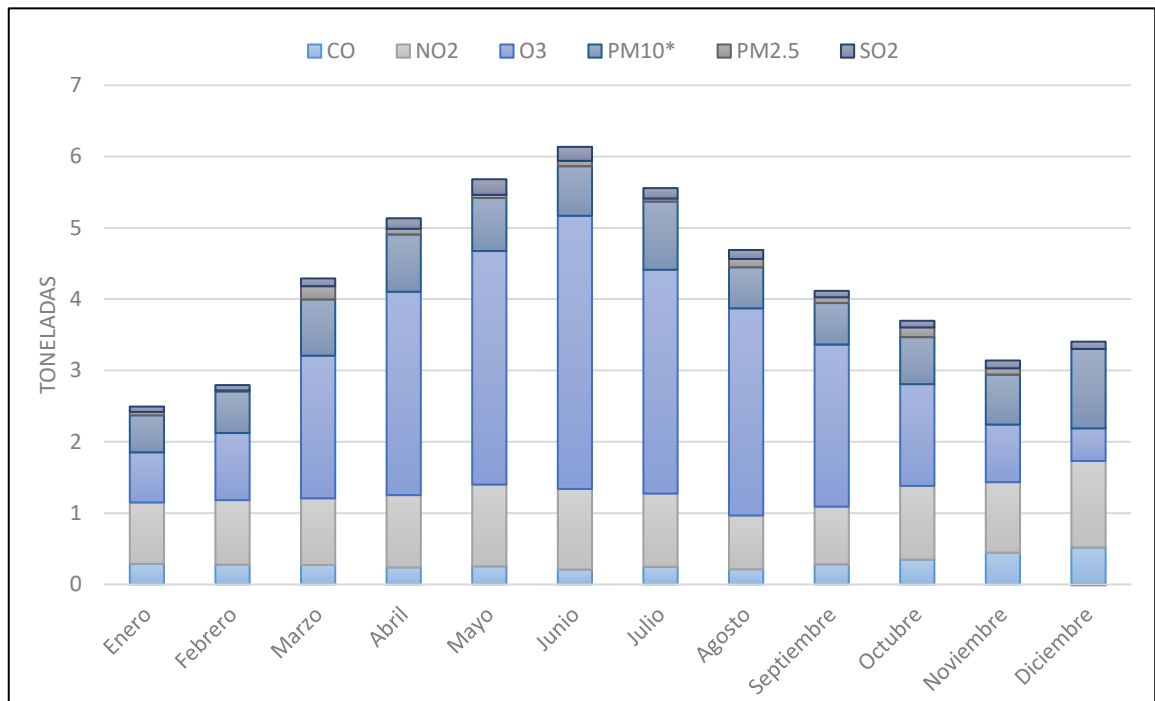
Se estima que los árboles eliminan 51,12 toneladas métricas de la contaminación del aire (O<sub>3</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>) por año con un valor asociado de 3.130.000 €. La Figura 24 muestra que 48,14% de la contaminación eliminada corresponde al O<sub>3</sub> (24,61 t), un 23,03% a NO<sub>2</sub> (11,81 t), 17,05% a PM<sub>10</sub> (8,72 t), 7,05% a CO (3,60 t), 2,91% a SO<sub>2</sub> (1,49 t) y 1,75% a PM<sub>2,5</sub> (0,90 t). Sin embargo, como se observa el valor económico

no necesariamente es proporcional a la cantidad de los contaminantes eliminados, como es el caso del PM<sub>2,5</sub>.



**Figura 24. Contaminantes atmosférico eliminados y su valor económico.**

La Figura 25 muestra la distribución de los contaminantes a lo largo del año. Siendo los meses de abril a agosto cuando se eliminan el 53% de los contaminantes. Esta tendencia es similar para O<sub>3</sub>, PM<sub>10</sub>, PM<sub>2,5</sub> y SO<sub>2</sub> y lo opuesto pasa con CO debido que su mayor concentración se da durante el otoño e invierno, mientras que el NO<sub>2</sub> se mantiene con valores similares durante todo el año.



**Figura 25. Contaminantes atmosférico eliminados por mes.**

La eliminación de contaminantes por área es de 10,52 kg/ha/año. Al comparar este resultado con los de otras ciudades (ver Anexo 1), el área de estudio se encuentra entre



las últimas de la lista, incluso por debajo de aquellas ciudades que presentan similares densidades arbóreas (árboles/hectárea), como Nueva York, Minneapolis, Philadelphia y Chicago. Otra diferencia que destacar es con la ciudad de Los Ángeles que presenta una cobertura arbórea (11,1%) y densidad arbórea (48 árboles/hectárea), valores menores pero cuya eliminación de contaminantes es mayor (14,7 kg/ha/año).

Estas diferencias podrían suceder debido a las características de los árboles y la estructura del bosque urbano. La retención de contaminantes puede ser favorecida por superficies ásperas, pubescentes, húmedas y/o pegajosas [24]. Existe evidencia de que una mayor pegajosidad de la superficie facilita particularmente una mayor captura de partículas más gruesas, mientras que la rugosidad de la superficie tiene una mayor influencia en la absorción de partículas más finas. Algunas partículas pueden ser absorbidas por el árbol, pero la mayoría se retiene en la superficie de la planta. Algunas partículas se volverán a suspender, pero otras se lavarán (particularmente las partículas solubles) o caerán con hojas o ramitas. La resuspensión de partículas finas es menos probable ya que se incrustan más fácilmente dentro de la capa límite de la hoja [43]. Así mismo, parece que los árboles más jóvenes y más pequeños de la misma especie también son muy efectivos para eliminar partículas contaminantes debido a su mayor densidad de follaje en comparación con especímenes maduros mucho más grandes [44].

Incluso la ubicación y estructura de la vegetación es importante para la capacidad de filtrar el aire. Estudios informan que se puede filtrar hasta el 85% de la contaminación del aire en un parque, y en una calle con árboles, hasta el 70%. La vegetación espesa puede simplemente causar turbulencia en el aire, mientras que una cubierta más delgada puede dejar pasar el aire y filtrarlo. Según algunas estimaciones, 1 hectárea de bosque mixto puede eliminar 15 toneladas de partículas por año del aire, mientras que un bosque puro de abetos puede filtrar 2 o 3 veces más [12].

Un estudio elaborado en Gran Bretaña determina otros beneficios sociales vinculado a los impactos en la salud (mortalidad y morbilidad). Dicho estudio menciona que en una extensión de 1 km<sup>2</sup> con bosques de más de 2 hectáreas, los bosques evitan entre 5 y 7 muertes, que de otro modo se habrían adelantado, y entre 4 y 6 ingresos hospitalarios cada año [24]. La mala calidad del aire es responsable de aproximadamente 1 de cada 9 muertes en todo el mundo. Solo en 2015, 422.000 personas en toda Europa murieron a causa de enfermedades causadas por la exposición a la contaminación del aire exterior [26].

## 5.2.2 Almacenamiento y secuestro de carbono

El arbolado del área de estudio ha almacenado 55.851,10 toneladas de carbono y han secuestrado 5.949,03 toneladas/año, equivalente a 8.970.000 € y 956.000 €/año, respectivamente (Tabla 19). Cuando se observa estos datos por estrato, ambos presentan valores cercanos; sin embargo, al dividirlo por el área de cada estrato se obtiene que Verde Urbano presenta valores mayores. Esto último es debido a que el Verde Urbano presenta mayor densidad de árboles por hectárea, así como árboles de mayores dimensiones y biomasa foliar. La capacidad de secuestro de carbono se ve afectada por la edad de los árboles. Los árboles jóvenes tienen niveles de almacenamiento de carbono más bajos que los árboles maduros, los cuales acumulan más carbono [23].

Tabla 19. Almacenamiento y secuestro de carbono.

Estrato	Almacenamiento de carbono (tm)	Secuestro de carbono (tm/año)	Almacenamiento de carbono (tm/ha)	Secuestro de carbono (tm/año/ha)
Verde Urbano	33.218,50	3.283,25	32,79	3,24
Urbano Denso	22.632,70	2.665,78	5,89	0,69
Área de estudio	55.851,10	5.949,03	11,50	1,23

De las especies muestreadas, *Platanus x hybrida* almacena y secuestra la mayor cantidad de carbono (aproximadamente 23,9% del total de carbono almacenado y 17,3% de todo el carbono secuestrado). Como se observa en la Figura 26 y 27, esta especie es significativamente superior a las otras.

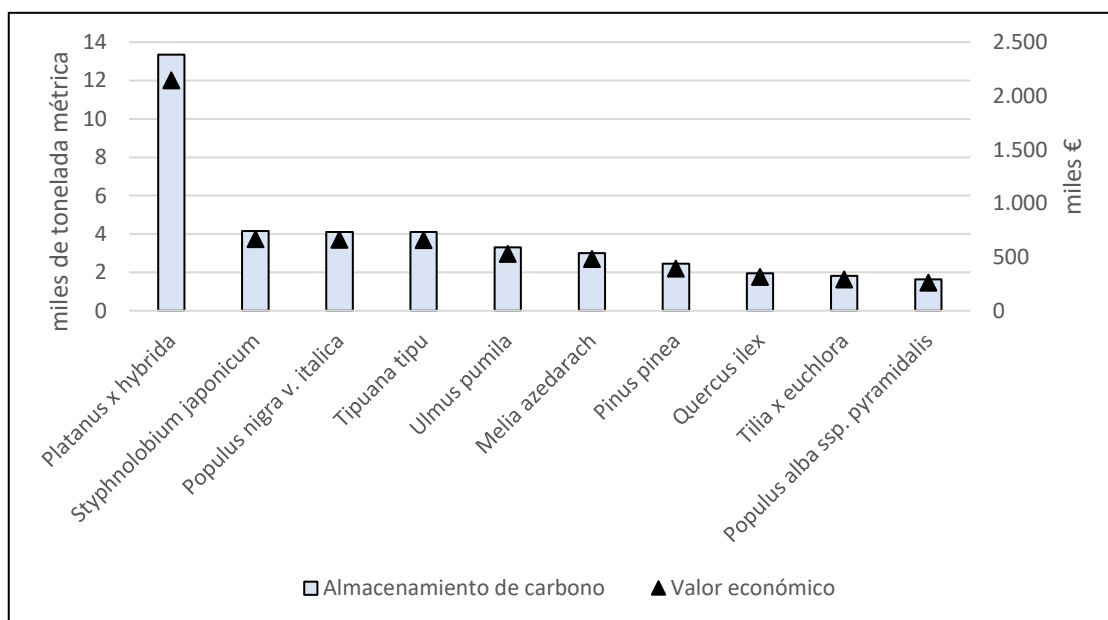
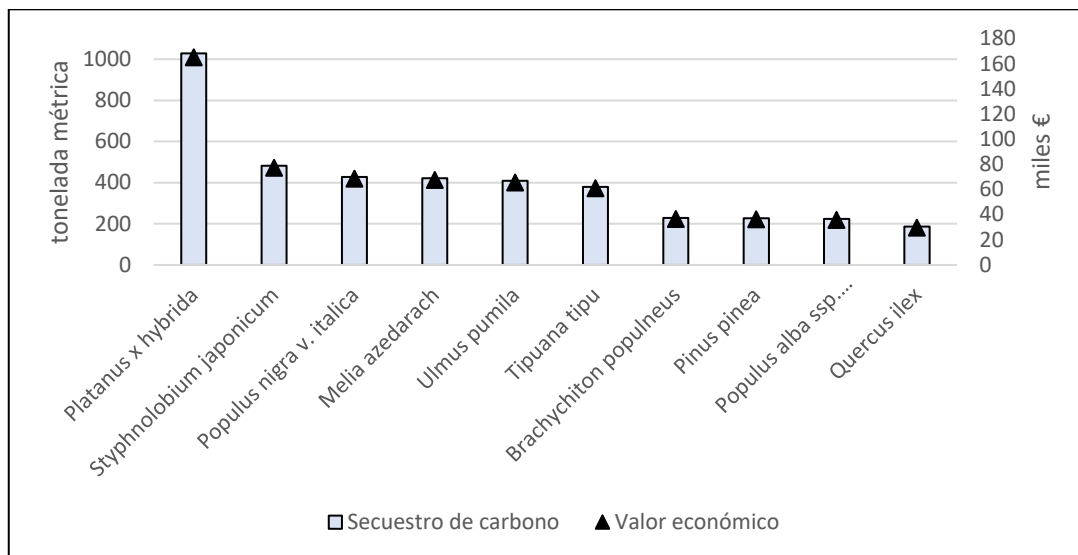


Figura 26. Almacenamiento de carbono y valor calculado para las 10 especies con mayor almacenamiento.



**Figura 27. Secuestro de carbono anual y valor calculado para las 10 especies con mayor secuestro.**

Al comparar los valores almacenamiento de carbono con las de otras ciudades (ver Anexo 1) se observa que el área de estudio se encuentra entre las últimas ciudades de la lista. Lo mismo ocurre si lo comparamos con un estudio que presenta valores de almacenamiento de carbono para ciudades de primer nivel en China, determinando valores similares para Beijing (46 t/ha) y Shanghái (47,8 t/ha) y un valor menor para Guangzhou (28,8 t/ha) [23]. El almacenamiento de carbono total dentro de los bosques urbanos generalmente aumenta en función del aumento de cobertura arbórea y la proporción de árboles grandes y/o saludables en la población. Como ya se ha visto en el área de estudio una gran proporción de los árboles (67%) se encuentran en estado juveniles y/o madurando, es decir por debajo de 30 cm de DAP y por ende presentan un volumen bajo de madera [23].

Todo lo contrario, sucede al comparar los valores de secuestro de carbono, pues el área de estudio se posiciona en primer lugar junto la ciudad de Atlanta. Esto se podría explicar ya que la cantidad de carbono secuestrado anualmente aumenta con el tamaño y la salud de los árboles [9]. Además, altos niveles de biodiversidad mantienen un desarrollo estable de la capacidad de secuestro de carbono de los bosques urbanos [23].

### 5.2.3 Escorrentía evitada

Los árboles del área de estudio ayudan a reducir el escurrimiento por más de 45.000 m<sup>3</sup>/año con un valor asociado a 86.000 €, tal como se observa en la Tabla 20. Al observar los datos por estratos claramente en el Verde Urbano la zona que evita mayor escorrentía pluvial, dado que presenta mayor densidad y cobertura arbórea, así como, mayor cobertura de suelo permeable.

Tabla 20. Escorrentía evitada.

Estrato	Escurrimiento evitado (m <sup>3</sup> /año)	Escurrimiento evitado (m <sup>3</sup> /año/ha)	Valor del escurrimiento evitado (€/año)
Verde Urbano	21.635	21,36	41.151
Urbano Denso	23.683	6,16	45.045
Área de estudio	45.318	9,33	86.196

Como se observa en la Figura 28, el *Platanus x hybrida* es la especie que intercepta mayor cantidad de agua, pero no solo es por su abundancia de individuos, sino también por las dimensiones de su copa.

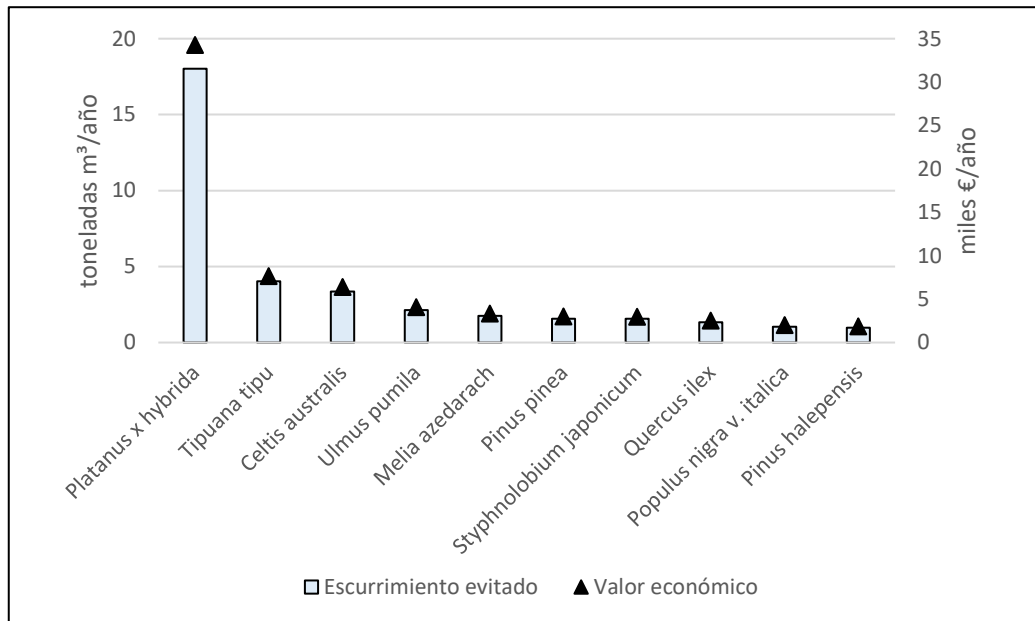


Figura 28. Escorrentía evitada y valoración para las especies con mayor impacto.

La investigación sobre la interacción entre el bosque urbano y las aguas pluviales ha sido relativamente poco estudiada en comparación con otros temas como la calidad del aire y los beneficios del secuestro de carbono. Sin embargo, algunos estudios han demostrado que los árboles en áreas urbanas juegan un papel crucial en la reducción de la escorrentía de aguas pluviales [29]. Los resultados de un estudio en la ciudad de Luohe, China, muestran que aproximadamente se evitó una escorrentía de 122.636,8 m<sup>3</sup> gracias a espacios verdes completos, siendo los parques públicos los de eficiencia más alta con 51,1 m<sup>3</sup>/ha/año, lo que significa que solo el 21,4% de las aguas pluviales interceptadas fue capturada. En términos de capacidad de intercepción de árboles individuales, los árboles individuales en parques públicos tuvieron la mayor capacidad con 0,67 m<sup>3</sup>/año [45]. Otro estudio resalta que, en áreas con vegetación, solo del 5 al 15% del agua de lluvia se escurre del suelo, y el resto se evapora o se infiltra en el suelo. En las ciudades sin vegetación, alrededor del 60% del agua de lluvia se conduce a través de los desagües pluviales. Por supuesto, esto afectará tanto al clima local como a los niveles de las aguas subterráneas [12].

Los espacios verdes urbanos podrían ser una forma muy rentable de disminuir la necesidad de una costosa infraestructura gris, como tanques de retención y sistemas de alcantarillado. Sin embargo, actualmente los espacios verdes urbanos tienen una capacidad muy limitada para evitar la escorrentía, lo que indica que el desarrollo combinado de infraestructura verde y gris sería más eficaz y práctico para mitigar las inundaciones [45].

### 5.3 Cuantificación de deservicios

#### 5.3.1 Emisiones biogénicas

Los árboles presentes en el área de estudio emiten aproximadamente 60,97 toneladas métrica de compuestos orgánicos volátiles (COV) (46,08 tonelada métrica de isopreno y 14,89 tonelada métrica de monoterpenos) (Tabla 21). Estos valores son bastante similares a los mencionados por el estudio del CREAM [6].

Tabla 21. Emisiones de COV.

Estrato	Monoterpeno (kg/año)	Isopreno (kg/año)	COV totales (kg/año)
Verde Urbano	11.150,00	25.120,10	36.270,10
Urbano Denso	3.737,90	20.960,10	24.698,00
Área de estudio	14.888,00	46.080,20	60.968,10

Las emisiones varían entre las especies con base en las características de estas (por ejemplo, algunos géneros como los robles son altos emisores de isopreno) y la cantidad de biomasa de las hojas. El 55% de las emisiones de COV del bosque urbano fueron de *Platanus x hybrida* (38%) y *Quercus ilex* (17%). Estos COV son sustancias químicas precursoras de la formación de ozono, por lo cual debe considerarse para su selección y ubicación dentro de la ciudad.

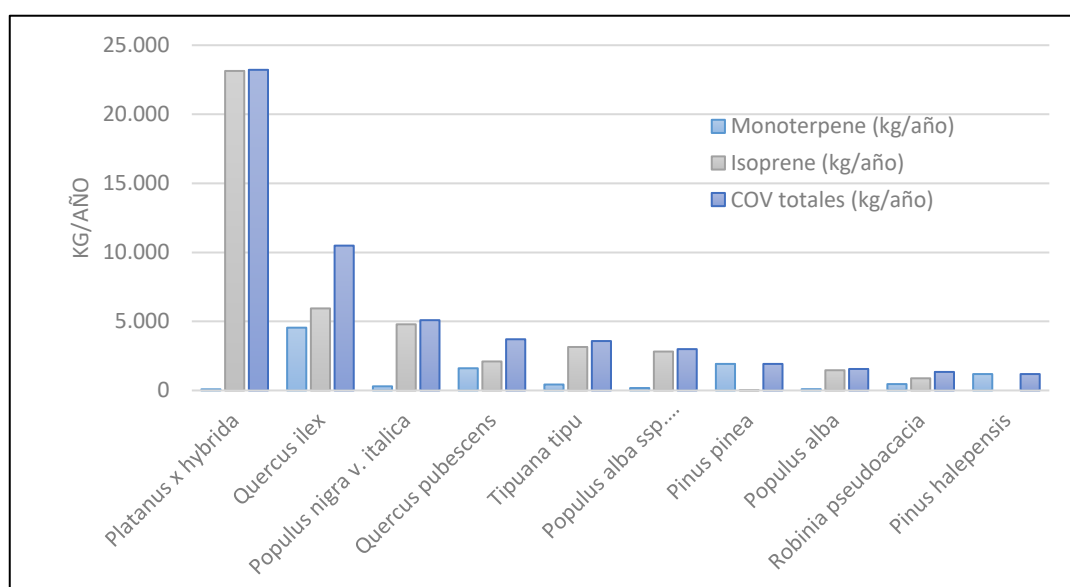


Figura 29. Emisiones de COV por especie.

#### 5.4 El rol del arbolado público en Barcelona

La Tabla 22, muestra la distribución porcentual de los servicios ecosistémicos calculados para las 10 especies más abundantes (ver Anexo 2 para más detalles). El *Platanus x hybrida* es la especie que mayores servicios brindan y es dado a que es la especie con mayor abundancia (casi el 20% de los árboles totales) y con las mayores dimensiones de DAP, altura y ancho de copa. Muchos de estos árboles que se pueden ver en el espacio público datan de la segunda mitad del siglo XIX. Sin embargo en los últimos años, se está reduciendo la presencia de esta especie en favor de otras, aunque se mantiene como árbol identitario en las grandes avenidas [8]. Otro motivo por el que se debería estar dejando de utilizar esta especie es la gran cantidad de COV que emite, principalmente el isopropano.

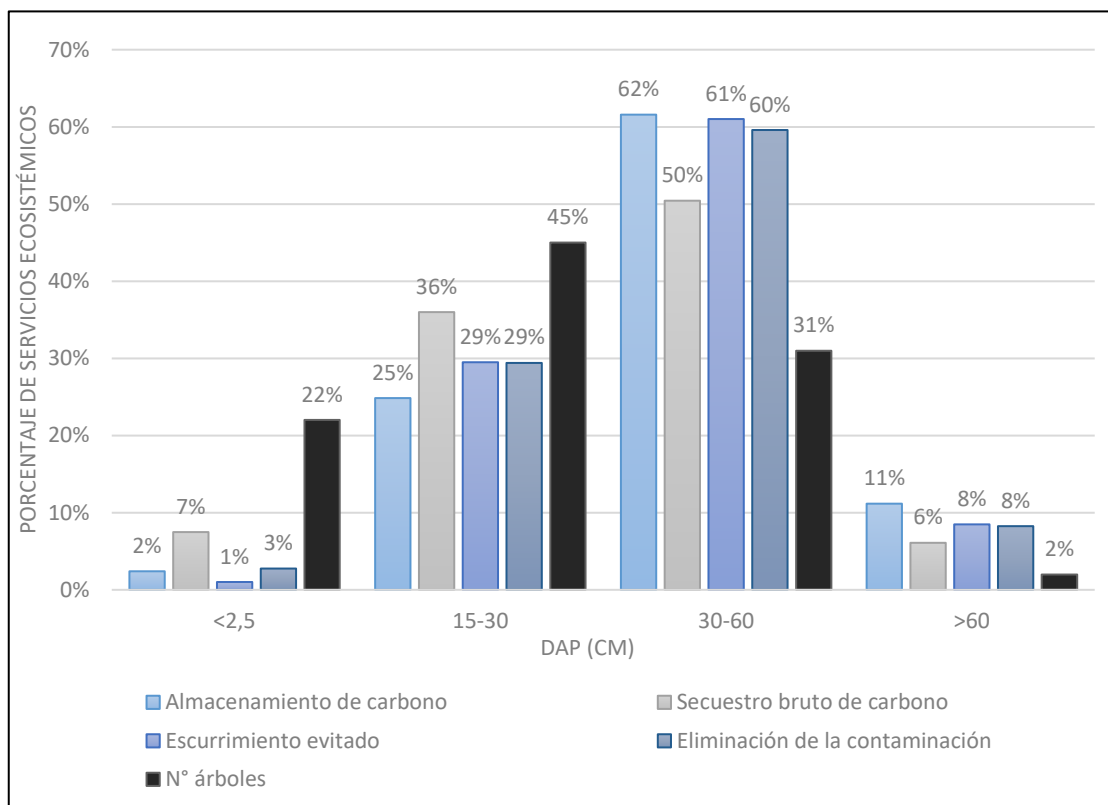
Como es de esperar la cantidad de árboles es el principal motivo por el cual una especie contribuye con mayores valores a estos servicios. Sin embargo, algunas especies como: *Ulmus pumila*, *Quercus ilex*, *Populus alba* y *Tilia x euchlora* a pesar de ser menos abundantes, brindan servicios que deben ser considerados dentro de los criterios de selección de las especies que serán plantadas en un futuro.

Tabla 22. Distribución de los servicios ecosistémicos por especie.

Especies	Árboles (%)	Remoción de contaminantes (%)	Almacenamiento de carbono (%)	Secuestro bruto de carbono (%)	Esguerrimiento evitado (%)
<i>Platanus x hybrida</i>	18,5%	40%	24%	17%	40%
<i>Celtis australis</i>	6,7%	7%	2%	2%	7%
<i>Styphnolobium japonicum</i>	6,5%	3%	7%	8%	3%
<i>Pinus pinea</i>	6,3%	3%	4%	4%	3%
<i>Tipuana tipu</i>	5,9%	9%	7%	6%	9%
<i>Melia azedarach</i>	5,2%	4%	5%	7%	4%
<i>Prunus cerasifera</i>	4,1%	1%	1%	2%	1%
<i>Brachychiton populneus</i>	3,5%	2%	2%	4%	2%
<i>Populus nigra v. italica</i>	3,2%	2%	7%	7%	2%
<i>Cercis siliquastrum</i>	2,8%	1%	1%	2%	1%
<i>Ulmus pumila</i>	2,5%	5%	6%	7%	5%
<i>Quercus ilex</i>	1,5%	3%	4%	3%	3%
<i>Populus alba</i>	1,3%	1%	3%	4%	1%
<i>Tilia x euchlora</i>	1,3%	1%	3%	3%	1%

Al analizar los servicios ecosistémicos por rangos de DAP (Figura 30) se observa que la mayor contribución de estos servicios (más del 50%) está dada por árboles semimaduros (<15 cm) a pesar de que esta categoría solo representa el 31% de árboles totales. Algo parecido sucede con los árboles maduros (> 60 cm) que a pesar de su baja cantidad de individuos (2%) representan valores considerables de los servicios estudiados (casi 10%). Lo contrario sucede con los árboles juveniles que con un 22% de árboles presenta valores bajos. Esto se puede explicar debido que los árboles con

mayores DAP presentan mayores dimensiones de su copa por lo cual presentaría mayor biomasa foliar y tendría mayor exposición de su copa a la luz, características importantes para eliminar contaminantes del aire y capturar CO<sub>2</sub> que será almacenado. Así mismo, estos árboles también tienen raíces establecidas y adaptadas a las zonas por lo cual pueden capturar y filtrar mayor volumen de agua precipitada.



**Figura 30. Servicios ecosistémicos por DAP.**

La Tabla 23, resume la valoración económica de los servicios ecosistémicos que en su conjunto alcanza los 4.170.653 €/año. No se consideran los 8.970.000 € del almacenamiento de carbono, ya que este servicio no se valoriza anualmente sino por los años que tiene cada árbol. Además, se observan los valores de €/año y €/cápita que, a pesar de parecer poco significativos, estos son similares o superiores a los resultados de otros estudios. Por ejemplo, en un estudio del arbolado en Hungría [46] los valores de secuestro de carbono reportaron 0.15 €/año y para la remoción de contaminantes 1,5 €/año.

**Tabla 23. Valor económico de los servicios ecosistémicos calculados.**

Servicios ecosistémicos	Total (€/año)	€/árbol	€/cápita *
<b>Eliminación de contaminantes</b>	3.128.644,56	10,25	1,89
<b>Secuestro de carbono</b>	955.813,02	3,13	0,58
<b>Escurrimiento evitado</b>	86.195,68	0,28	0,05
	4.170.653,26	13,66	2,52

\*Nota: Población total en Barcelona Municipio igual a 1.660.314 personas.

## 6. CONCLUSIONES

El área de estudio, que corresponde al 48% del Municipio de Barcelona, contiene alrededor de 305.350 árboles divididos en los estratos Urbano Denso (54,2%) y Verde Urbano (45,8%).

Contiene una cobertura boscosa del 19,7% del área total y una densidad de 63 árboles/hectárea.

Presenta valores altos de diversidad, aunque 7 especies conforman el 53,2% de los árboles totales, siendo el *Platanus x hybrida* el que domina, con gran diferencia, la estructura del bosque urbano.

La distribución diamétrica está formada por 75% de árboles con DAP menor a 30 cm y solo 2% de árboles maduros con DAP mayor a 60 cm.

Barcelona está dominada por cobertura de suelo impermeable (principalmente edificios) sobre todo en el estrato Urbano Denso que solo contiene un 7,4% de cobertura permeable.

Se estima que el potencial de área plantable es de 311 hectárea que permitiría instalar más de 22.000 árboles.

Barcelona es una ciudad compacta con una gran cantidad de árboles en sus calles y parques. Aunque estos árboles no puedan eliminar todos los contaminantes del aire o evitar inundaciones ante una tormenta, sin duda pueden disminuir los riesgos y mejorar la calidad de vida de las personas.

Los árboles del área de estudio eliminaron 51,12 toneladas métrica de contaminantes del aire ( $O_3$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ ,  $PM_{2,5}$ ,  $PM_{10}$   $SO_2$ ) al año lo que corresponde a 3.130.000 €.

El arbolado almacenó 55.851 toneladas de carbono y secuestró 5.949 toneladas de carbono al año, lo que equivale a 8.970.000 € y 956.000 €/año, respectivamente.

La escorrentía evitada, por el arbolado urbano, es de 45.000 m<sup>3</sup>/año con un valor asociado de 86.000 €.

Como parte de los deservicios que causa el arbolado urbano se estimó una emisión de 60,97 toneladas métricas de compuestos orgánicos volátiles (COV) (46,08 tonelada métrica de isopreno y 14,89 tonelada métrica de monoterpenos).

La metodología diseñada por i-Tree ECO es útil y práctica de aplicar, más aún si se tiene en cuenta para estudiar los servicios ecosistémicos del arbolado de una ciudad. Sin embargo, la aplicación no permitió trabajar con datos de contaminantes del aire y precipitación para el año 2021, por lo que se trabajó con los del año 2015 (última actualización).





## 7. REFERENCIAS

- [1] S. Borelli, M. Conigliaro, y F. Pineda, «Los bosques urbanos en el contexto global», *Unasyuva* 250, vol. 69, n.º 1, pp. 11-21, 2018.
- [2] UN-Habitat, «World Cities Report 2022», 2022. <https://unhabitat.org/wcr/> (accedido jul. 25, 2022).
- [3] FAO, *Directrices para la silvicultura urbana y periurbana*. 2017.
- [4] P. Calaza, P. Cariñanos, F. Escobedo, J. Schwab, y G. Tovar, «Crear paisajes urbanos e infraestructura verde», *Unasyuva* 250, vol. 69, n.º 1, pp. 11-21, 2018.
- [5] Ajuntament de Barcelona, *Árboles Para Vivir. Plan director del arbolado de Barcelona 2017-2037*. 2017.
- [6] CREAF, *Serveis Ecològics del Verd Urbà a Barcelona*. 2009.
- [7] Ajuntament de Barcelona, *Programa de impulso de la infraestructura verde urbana : medida de gobierno*. 2017.
- [8] Ajuntament de Barcelona, *Plan del Verde y de la Biodiversidad de Barcelona 2020*. 2013.
- [9] USDA Forest Service, «i-Tree Software Suite v2.0.», 2022. <https://www.itreetools.org/> (accedido feb. 10, 2022).
- [10] USDA Forest Service, «i-Tree Eco User's manual. Version 6.0.», 2022. <https://www.itreetools.org/> (accedido feb. 10, 2022).
- [11] USDA Forest Service, «i-Tree Eco Field Guide. Version 6.0.», 2022. <https://www.itreetools.org/> (accedido feb. 10, 2022).
- [12] P. Bolund y S. Hunhammar, «Ecosystem services in urban areas», *Ecol. Econ.*, vol. 29, pp. 293-301, 1999.
- [13] J. Terradas, T. Franquesa, M. Parés, y L. Chaparro, *Ecología urbana*. 2011.
- [14] Unión Europea, *Construir una infraestructura verde para Europa*. 2014.
- [15] C. Dobbs, A. A. Eleuterio, J. D. Amaya, J. Montoya, y D. Kendaly, «Beneficios de la silvicultura urbana y periurbana», *Unasyuva* 250, vol. 69, n.º 1, pp. 22-29, 2018.
- [16] F. J. Escobedo, T. Kroeger, y J. E. Wagner, «Urban forests and pollution mitigation : Analyzing ecosystem services and disservices», *Environ. Pollut.*, vol. 159, n.º 8-9, pp. 2078-2087, 2011, doi: 10.1016/j.envpol.2011.01.010.
- [17] F. Baró, A. Calderón-Argelich, J. Langemeyer, y J. J. T. Connolly, «Under one canopy? Assessing the distributional environmental justice implications of street tree benefits in Barcelona», *Environ. Sci. Policy*, vol. 102, pp. 54-64, 2019, doi: 10.1016/j.envsci.2019.08.016.
- [18] Ajuntament de Barcelona, *Gestión del arbolado viario de Barcelona*. 2011.
- [19] G. Silvera, «Mainstreaming the environmental benefits of street trees», *Urban For. Urban Green.*, vol. 12, n.º 1, pp. 2-11, 2013, doi: 10.1016/j.ufug.2012.08.004.
- [20] D. J. Nowak, «Bosques y ciudades sostenibles», *Unasyuva*, vol. 69, n.º 1, pp. 11-21, 2018.
- [21] X. Ping, P. Yok, P. Edwards, y D. Richards, «The economic benefits and costs of trees in urban forest stewardship : A systematic review», *Urban For. Urban Green.*, vol. 29, pp. 162-170, 2018, doi: 10.1016/j.ufug.2017.11.017.

- [22] D. J. Nowak, D. E. Crane, J. C. Stevens, R. E. Hoehn, y J. T. Walton, «A Ground-Based Method of Assessing Urban Forest Structure and Ecosystem Services», *Arboric. Urban For.*, vol. 34, pp. 347-358, 2008.
- [23] J. Ma, X. Li, B. Jia, X. Liu, T. Li, y W. Zhang, «Spatial variation analysis of urban forest vegetation carbon storage and sequestration in built-up areas of Beijing based on i-Tree Eco and Kriging», *Urban For. Urban Green.*, vol. 66, pp. 127-413, 2021, doi: 10.1016/j.ufug.2021.127413.
- [24] N. A. Powe y K. G. Willis, «Mortality and morbidity benefits of air pollution ( SO<sub>2</sub> and PM<sub>10</sub> ) absorption attributable to woodland in Britain», *J. Environ. Manage.*, vol. 70, pp. 119-128, 2004, doi: 10.1016/j.jenvman.2003.11.003.
- [25] D. Nowak, D. Crane, y J. Stevens, «Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States», *Urban For. Urban Green.*, vol. 4, pp. 115-123, 2006, doi: 10.1016/j.ufug.2006.01.007.
- [26] E. Riondato, F. Pilla, A. Sarkar Basu, y B. Basu, «Investigating the effect of trees on urban quality in Dublin by combining air monitoring with i-Tree Eco model», *Sustain. Cities Soc.*, vol. 61, p. 102356, 2020, doi: 10.1016/j.scs.2020.102356.
- [27] F. J. Escobedo y D. J. Nowak, «Landscape and Urban Planning Spatial heterogeneity and air pollution removal by an urban forest», *Landsc. Urban Plan. J.*, vol. 90, pp. 102-110, 2009, doi: 10.1016/j.landurbplan.2008.10.021.
- [28] J. K. Thom, C. Szota, A. M. Coutts, T. D. Fletcher, y S. J. Livesley, «Transpiration by established trees could increase the efficiency of stormwater control measures», *Water Res.*, vol. 173, p. 115597, 2020, doi: 10.1016/j.watres.2020.115597.
- [29] A. Berland *et al.*, «Landscape and Urban Planning The role of trees in urban stormwater management», *Landsc. Urban Plan.*, vol. 162, pp. 167-177, 2017, doi: 10.1016/j.landurbplan.2017.02.017.
- [30] Ajuntament de Barcelona, *Anuari Estadístic de la Ciutat de Barcelona 2021*. 2021.
- [31] Ayuntamiento de Barcelona, «Open Data BCN. Servicio de datos abiertos del Ajuntament de Barcelona». <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/es/> (accedido jul. 22, 2022).
- [32] I. C. y G. de Cataluña, «Connector QGIS Open ICGC». <https://www.icgc.cat/es/Aplicaciones/Herramientas/Connector-QGIS-Open-ICGC> (accedido abr. 10, 2022).
- [33] Ayuntamiento de Barcelona, «Atlas de biodiversidad de Barcelona». <https://ajuntament.barcelona.cat/ecologiaurbana/es/atlas-de-biodiversidad-de-barcelona> (accedido jun. 28, 2022).
- [34] E. Z. Castillo, *Análisis del comportamiento del arbolado urbano público durante el período de 1995 a 1999 en la ciudad de Linares, Nuevo León*. 2001.
- [35] E. G. Mcpherson, N. Van Doorn, y J. De Goede, «Urban Forestry & Urban Greening Structure , function and value of street trees in California , USA», *Urban For. Urban Green.*, vol. 17, pp. 104-115, 2016, doi: 10.1016/j.ufug.2016.03.013.
- [36] S. Hirabayashi, C. N. Kroll, D. J. Nowak, y T. A. Endreny, *i-Tree Eco Dry Deposition Model Descriptions*. 2022.
- [37] J. Wu, Y. Wang, S. Qiu, y J. Peng, «Using the modified i-Tree Eco model to quantify air pollution removal by urban vegetation», *Sci. Total Environ.*, vol. 688, pp. 673-683, 2019,

doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.05.437.

- [38] R. Pace *et al.*, «Comparing i-Tree Eco Estimates of Particulate Matter Deposition with Leaf and Canopy Measurements in an Urban Mediterranean Holm Oak Forest», *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, n.º 10, pp. 6613-6622, 2021, doi: 10.1021/acs.est.0c07679.
- [39] J. Kang, S. Hirabayashi, y S. Shibata, «Urban Forest Ecosystem Services Vary with Land Use and Species: A Case Study of Kyoto City», *Forests*, n.º 67, pp. 67-, ene. 2022.
- [40] J. Wang, T. Endreny, y D. Nowak, «MECHANISTIC SIMULATION OF TREE EFFECTS IN AN URBAN WATER BALANCE MODEL1», *J. Am. wqater Resour. Assoc.*, vol. 44, n.º 1, p. 75, 2008.
- [41] R. NA, «Diversity and stability in a street tree population», *Urban Ecol.*, vol. 7, pp. 42-54, 1983.
- [42] F. D. Cowett y N. L. Bassuk, «Statewide assessment of street trees in New York State , USA», *Urban For. Urban Green.*, vol. 13, n.º 2, pp. 213-220, 2014, doi: 10.1016/j.ufug.2014.02.001.
- [43] K. P. Beckett, P. H. Freer-smith, y G. Taylor, «Urban woodlands : their role in reducing the effects of particulate pollution», *Environ. Pollut.*, vol. 99, pp. 347-360, 1998.
- [44] K. P. Beckett, P. H. Freer-smith, y G. Taylor, «Particulate pollution capture by urban trees: effect of species and windspeed», *Glob. Chang. Biol.*, vol. 6, pp. 995-1003, 2000.
- [45] P. Song, G. Kim, A. Mayer, R. He, y G. Tian, «Assessing the Ecosystem Services of Various Types of Urban Green Spaces Based on i-Tree Eco», *Sustainability*, pp. 1-16, 2020.
- [46] M. Kiss, Á. Takács, R. Pogácsás, y Á. Gulyás, «The role of ecosystem services in climate and air quality in urban areas: Evaluating carbon sequestration and air pollution removal by street and park trees in Szeged (Hungary)», *Morav. Geogr. reports*, vol. 23, n.º 3, pp. 36-46, 2015, doi: 10.1515/mgr-2015-0016.



## 8. ANEXO

### ANEXO 1.

#### Resultados de estudios para otras ciudades

Ciudad	Cobertura de árboles (%)	N° de árboles	N° arboles/ha	Almacenamiento de carbono (t/ha)	Secuestro de carbono (t/ha/año)	Eliminación de contaminantes (kg/ha/año)
Área de estudio – Barcelona *	19,7	305.350	63	11,5	1,23	10,52
Toronto, ON, Canada	26,6	10.220.000	160,4	17,4	0,73	29,9
Atlanta, GA	36,7	9.415.000	275,8	35,7	1,23	44,2
Los Angeles, CA	11,1	5.993.000	48,4	9,4	0,36	14,7
New York, NY	20,9	5.212.000	65,2	15,3	0,48	19
London, ON, Canadá	24,7	4.376.000	185,5	15,3	0,53	15,7
Chicago, IL	17,2	3.585.000	59,9	10,9	0,38	13,5
Phoenix, AZ	9	3.166.000	31,8	2,9	0,3	5,1
Baltimore, MD	21	2.479.000	118,5	25	0,8	18,6
Philadelphia, PA	15,7	2.113.000	61,9	14,1	0,43	15,3
Washington, DC	28,6	1.928.000	121,1	29,8	0,92	23,8
Oakville, ON , Canadá	29,1	1.908.000	192,9	13,4	0,61	12,4
Albuquerque, NM	14,3	1.846.000	53,9	8,8	0,28	6,6
Boston, MA	22,3	1.183.000	82,9	20,3	0,67	18
Syracuse, NY	26,9	1.088.000	167,4	23,1	0,77	15,2
Woodbridge, NJ	29,5	986.000	164,4	24,2	0,84	31,9
Minneapolis, MN	26,4	979.000	64,8	15	0,53	18,3
San Francisco, CA	11,9	668.000	55,7	14,7	0,39	10,7
Morgantown, WV	35,5	658.000	294,5	37,7	1,17	29,2
Moorestown, NJ	28	583.000	153,4	27,9	0,9	28,1
Hartford, CT	25,9	568.000	124,6	28,5	0,86	11,5
Jersey City, NJ	11,5	136.000	35,5	5	0,21	9,6
Casper, WY	8,9	123.000	22,5	6,2	0,2	6,2
Freehold, NJ	34,4	48.000	94,6	35,9	0,98	39,6

Nota: \* resultados de este estudio.

Fuente: [9]



## ANEXO 2.

### Cuantificación y valoración económica de los servicios ecosistémicos por especie ordenada por su abundancia.

Especie	N° Árboles	Eliminación de la contaminación (tonelada métrica/año)	(€/año)	Almacenamiento de carbono (tonelada métrica)	(€)	Secuestro de carbono (tonelada métrica/año)	(€/año)	Escurrimiento evitado (m³/año)	(€/año)
<b>Platanus x hybrida</b>	56.520	20,33	1.244.064	13.351,29	2.145.112	1.028,67	165.273	18.019,91	34.275
<b>Celtis australis</b>	20.587	3,79	232.150	948,88	152.453	95,25	15.304	3.362,63	6.396
<b>Styphnolobium japonicum</b>	19.917	1,76	107.956	4.153,69	667.361	482,37	77.500	1.563,70	2.974
<b>Pinus pinea</b>	19.252	1,78	108.779	2.448,35	393.369	226,71	36.424	1.575,63	2.997
<b>Tipuana tipu</b>	18.032	4,54	277.766	4.105,89	659.682	380,16	61.080	4.023,37	7.653
<b>Melia azedarach</b>	16.005	1,97	120.515	3.004,81	482.773	421,55	67.730	1.745,63	3.320
<b>Prunus cerasifera</b>	12.587	0,38	23.276	621,50	99.854	115,43	18.546	337,14	641
<b>Brachychiton populneus</b>	10.748	0,78	47.438	1.370,22	220.150	227,92	36.619	687,13	1.307
<b>Populus nigra v. italica</b>	9.714	1,18	72.458	4.113,02	660.827	427,97	68.761	1.049,54	1.996
<b>Cercis siliquastrum</b>	8.454	0,56	34.134	556,36	89.388	117,29	18.844	494,42	940
<b>Ulmus pumila</b>	7.687	2,41	147.485	3.297,24	529.757	408,56	65.642	2.136,28	4.063
<b>Robinia pseudoacacia</b>	6.473	0,53	32.536	620,70	99.726	99,54	15.992	471,27	896
<b>Cupressus sempervirens</b>	6.432	0,10	6.002	727,22	116.840	134,39	21.592	86,93	165
<b>Magnolia grandiflora</b>	5.757	0,35	21.258	314,69	50.560	65,44	10.513	307,92	586
<b>Pinus halepensis</b>	5.712	1,10	67.197	1.169,35	187.875	92,73	14.899	973,33	1.851
<b>Olea europaea</b>	5.263	0,27	16.634	783,97	125.958	71,28	11.453	240,94	458
<b>Pyrus calleryana</b>	4.854	0,07	4.120	54,81	8.806	20,04	3.220	59,68	114
<b>Quercus ilex</b>	4.633	1,50	91.516	1.958,28	314.631	185,93	29.872	1.325,58	2.521
<b>Tamarix africana</b>	4.315	0,09	5.659	601,38	96.621	128,14	20.587	81,97	156
<b>Populus alba ssp. pyramidalis</b>	3.957	0,70	42.612	1.637,15	263.036	224,05	35.998	617,22	1.174
<b>Tilia x euchlora</b>	3.912	0,76	46.649	1.817,55	292.021	180,22	28.955	675,69	1.285



Especie	N° Árboles	Eliminación de la contaminación (tonelada métrica/año)	(€/año)	Almacenamiento de carbono (tonelada métrica)	(€)	Secuestro de carbono (tonelada métrica/año)	(€/año)	Escurrimiento evitado (m³/año)	(€/año)
<b>Phoenix canariensis</b>	3.372	0,44	27.149	348,61	56.010	12,95	2.080	393,24	748
<b>Celtis sinensis</b>	3.236	0,41	25.344	124,42	19.991	12,58	2.021	367,10	698
<b>Gleditsia triacanthos</b>	3.236	0,32	19.776	140,47	22.568	48,50	7.792	286,44	545
<b>Cedrus deodara</b>	2.924	0,81	49.375	802,73	128.972	97,12	15.603	715,18	1.360
<b>Washingtonia robusta</b>	2.833	0,05	3.194	134,24	21.567	17,52	2.815	46,26	88
<b>Jacaranda mimosifolia</b>	2.697	0,31	18.736	313,56	50.379	37,16	5.970	271,39	516
<b>Ligustrum lucidum</b>	2.697	0,08	4.814	135,52	21.774	19,04	3.059	69,73	133
<b>Morus alba</b>	2.697	0,12	7.227	298,81	48.009	33,10	5.319	104,68	199
<b>Ailanthus altissima</b>	2.158	0,63	38.535	761,58	122.361	71,15	11.432	558,17	1.062
<b>Ceratonia siliqua</b>	1.754	0,48	29.510	823,44	132.300	8,69	1.396	427,45	813
<b>Platycladus orientalis</b>	1.754	0,05	2.962	74,28	11.935	22,86	3.673	42,91	82
<b>Quercus pubescens</b>	1.754	0,53	32.352	695,88	111.805	59,82	9.612	468,60	891
<b>Populus alba</b>	1.709	0,30	18.371	358,03	57.524	68,51	11.007	266,10	506
<b>Prunus avium</b>	1.664	0,04	2.199	48,64	7.815	20,76	3.335	31,86	61
<b>Citrus aurantium</b>	1.618	0,03	2.025	86,01	13.819	20,52	3.298	29,33	56
<b>Laurus nobilis</b>	1.170	0,22	13.363	439,27	70.576	31,79	5.108	193,57	368
<b>Paulownia tomentosa</b>	1.170	0,01	842	7,99	1.284	4,92	791	12,20	23
<b>Tilia x europaea</b>	1.170	0,32	19.471	590,36	94.851	78,02	12.535	282,03	536
<b>Acer campestre</b>	1.124	0,00	257	4,74	762	2,15	346	3,72	7
<b>Koelreuteria paniculata</b>	1.124	0,01	350	8,41	1.350	3,19	512	5,07	10
<b>Washingtonia filifera</b>	1.124	0,02	1.092	108,13	17.374	10,71	1.721	15,82	30
<b>Albizia julibrissin</b>	1.079	0,01	893	6,55	1.052	4,10	659	12,93	25
<b>Schinus molle</b>	1.079	0,29	17.765	192,05	30.855	9,54	1.533	257,33	489
<b>Tilia cordata</b>	1.079	0,11	6.819	73,60	11.826	17,67	2.839	98,77	188
<b>Crataegus monogyna</b>	585	0,00	243	4,99	801	1,18	189	3,52	7

Especie	N° Árboles	Eliminación de la contaminación (tonelada métrica/año)	(€/año)	Almacenamiento de carbono (tonelada métrica)	(€)	Secuestro de carbono (tonelada métrica/año)	(€/año)	Escurrimiento evitado (m³/año)	(€/año)
<b>Cupressus arizonica</b>	585	0,11	7.011	1.082,76	173.964	48,33	7.765	101,55	193
<b>Phoenix dactylifera</b>	585	0,00	272	22,41	3.601	0,94	151	3,94	8
<b>Phytolacca dioica</b>	585	0,04	2.412	108,98	17.509	6,08	977	34,93	66
<b>Pinus nigra</b>	585	0,06	3.536	86,97	13.973	7,03	1.130	51,22	97
<b>Acer monspessulanum</b>	539	0,00	126	7,29	1.171	3,34	536	1,83	3
<b>Acer negundo</b>	539	0,12	7.421	55,18	8.866	8,73	1.402	107,48	204
<b>Acer saccharinum</b>	539	0,00	271	4,05	650	3,17	510	3,92	7
<b>Broussonetia papyrifera</b>	539	0,15	9.046	122,49	19.681	1,36	219	131,03	249
<b>Catalpa bignonioides</b>	539	0,04	2.177	26,22	4.212	6,27	1.007	31,54	60
<b>Crataegus x media</b>	539	0,01	712	5,56	894	1,37	220	10,32	20
<b>Gleditsia triacanthos v. inermis</b>	539	0,02	1.273	13,18	2.117	2,70	433	18,44	35
<b>Grevillea robusta</b>	539	0,02	1.182	13,98	2.245	4,04	649	17,12	33
<b>Nerium oleander</b>	539	0,01	317	4,77	767	2,19	352	4,58	9
<b>Washingtonia</b>	539	0,00	23	58,65	9.424	6,30	1.013	0,33	1
<b>Total</b>	305.350	51,12	3.128.645	55.851,12	8.973.432	5.949,03	955.813	45.317,53	86.196

Fuente: [9]