



Trabajo de fin de máster

Título:

Mapeo de los Servicios Ecosistémicos de una ciudad compacta:
El caso de Barcelona

Apellidos: Porcar Anento

Nombre: Roger

Titulación: Máster en Ciencia y Tecnología de la Sostenibilidad

Departamento: DECA – Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental

Director/a: Josep Mercadé Aloy

Fecha de lectura: Septiembre de 2019



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

**Institut Universitari de Recerca en Ciència
i Tecnologies de la Sostenibilitat**

“Primero la vida, después los espacios, después los edificios.

Al revés, nunca funciona.”

Jan Gehl

Abstract (English)

Many studies highlight the importance of Ecosystem Services to contribute to population's welfare, with numerous studies about Ecosystem Service valuation and quantification at the regional scale. Nonetheless, few studies have addressed this question from a local point of view, and even fewer have been used as tools for decision-making about policies on air quality targets or climate change mitigation, as well as to evaluate more sustainable urbanization models.

In the present study a method is proposed for the quantification by means of biophysical indicators of the Ecosystem Services of a) carbon stock and b) carbon sequestration by vegetation, c) cooling capacity of green spaces and d) volume perception on green spaces.

The methods proposed use different bands (thermal, thermal infrared and near-infrared) of satellite images from Landsat 8 for the calculation of Land Surface Temperature, as well as 3D point cloud from LiDAR data for the classification of vegetation in three categories according to height (high, medium and low) which allows the calculation of carbon stock and sequestration, as well as the volume difference between buildings and vegetation. By using open datasets, it is possible to apply these methods to any place with an appropriate coverage of Landsat 8 and/or LiDAR data.

In this study, the methods proposed are applied to the city of Barcelona and the contribution of different urban ecosystems (or Service Providing Units) is analyzed: a) forest, b) urban parks and gardens and c) street trees.

Finally, a comparison between the results obtained in this study and the results from similar studies from the same study area is conducted in order to evaluate the viability and precision of the methods proposed.

Keywords:

Urban Ecosystem Services

Compact city

Biophysical indicators

Mapping (GIS-based)

Resumen (Castellano)

Muchos estudios destacan la importancia de los Servicios Ecosistémicos para contribuir al bienestar de la población, siendo numerosos los estudios realizados sobre la valoración y cuantificación de Servicios Ecosistémicos a escala regional. Sin embargo, pocos estudios abordan esta cuestión desde un punto de vista local, y muchos menos se utilizan como herramientas para la toma de decisiones sobre políticas para conseguir los objetivos de calidad del aire o para la mitigación del cambio climático, así como para evaluar modelos de urbanización más sostenibles.

En el presente estudio se propone un método para la cuantificación mediante indicadores biofísicos de los Servicios Ecosistémicos de a) almacenaje y b) secuestro de carbono por la vegetación, c) capacidad de enfriamiento de los espacios verdes y d) percepción volumétrica de los espacios verdes.

Los métodos propuestos utilizan distintas bandas (térmica, infrarrojo térmica e infrarrojo cercano) de imágenes del satélite Landsat 8 para el cálculo de la temperatura de la superficie terrestre, así como la nube de puntos 3D procedentes del LiDAR para la clasificación de la vegetación en tres categorías según la altura (alta, media y baja) que permite el cálculo del almacenaje y secuestro de carbono, así como la diferencia de volumen entre edificios y vegetación. Al utilizar fuentes de datos abiertas, es posible aplicar estos métodos a cualquier lugar del planeta con una cobertura adecuada del Landsat 8 y/o LiDAR.

En este estudio se aplican los métodos propuestos a la ciudad de Barcelona y se analiza la contribución a estos indicadores de distintos ecosistemas urbanos o Unidades de Suministro de Servicios: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos y c) arbolado viario.

Finalmente, se realiza una comparación de los resultados obtenidos en este estudio con aquellos obtenidos en distintos estudios realizados en la misma zona de estudio para poder determinar la viabilidad y precisión de los métodos propuestos.

Palabras clave:

Servicios Ecosistémicos Urbanos

Ciudad compacta

Indicadores biofísicos

Mapeo (SIG)

Resum (Català)

Molts estudis destaquen la importància dels Serveis Ecosistèmics per contribuir al benestar de la població, sent nombrosos els estudis realitzats sobre la valoració i quantificació de Serveis Ecosistèmics a escala regional. Tot i així, pocs estudis aborden aquesta qüestió des d'un punt de vista local, i molts menys s'utilitzen com a eines per a la presa de decisions sobre polítiques per aconseguir els objectius de qualitat de l'aire o per a la mitigació del canvi climàtic, així com per avaluar models d'urbanització més sostenibles.

A l'estudi actual es proposa un mètode per a la quantificació mitjançant indicadors biofísics dels Serveis Ecosistèmics de a) emmagatzematge i b) segrest de carboni per la vegetació, c) capacitat de refredament dels espais verds i d) percepció volumètrica dels espais verds.

Els mètodes proposats utilitzen diverses bandes (tèrmica, infraroja tèrmica i tèrmica propera) d'imatges del satèl·lit Landsat 8 per al càlcul de la temperatura de la superfície terrestre, així com el núvol de punts 3D procedent del LiDAR per a la classificació de la vegetació en tres categories segons l'alçada (alta, mitjana i baixa) que permet el càlcul de l'emmagatzematge i segrest de carboni, així com la diferència de volum entre edificis i vegetació. A l'utilitzar fonts de dades obertes, és possible aplicar aquests mètodes a qualsevol lloc del planeta amb una cobertura adequada del Landsat 8 i/o del LiDAR.

En aquest estudi s'apliquen els mètodes proposats a la ciutat de Barcelona i s'analitza la contribució a aquests indicadors de diferents ecosistemes urbans o Unitats de Subministrament de Serveis: a) parc forestal, b) parcs i jardins urbans i c) arbrat viari.

Finalment, es realitza una comparació dels resultats obtinguts en aquest estudi amb aquells obtinguts en diferents estudis realitzats a la mateixa zona d'estudi per a poder determinar la viabilitat i precisió dels mètodes proposats.

Paraules clau:

Serveis Ecosistèmics Urbans

Ciutat compacta

Indicadors biofísics

Mapeig (SIG)

Tabla de contenidos

Listado de figuras	i
Listado de tablas	iii
Listado de acrónimos y abreviaturas	iv
1. Introducción	1
2. Definición de objetivos	5
3. Estado del arte	6
4. Materiales y métodos	12
4.1. Contexto	13
4.2. Desarrollo de indicadores	17
4.2.1. Regulación micro-climática.	17
4.2.2. Stock de carbono.	22
4.2.3. Secuestro de carbono.	26
4.2.4. Percepción de los espacios verdes.	28
5. Descripción y análisis de resultados	30
5.1. Regulación micro-climática	30
5.2. Stock de carbono	33
5.3. Secuestro de carbono	35
5.4. Percepción de los espacios verdes	37
5.5. Relación entre indicadores	39
6. Discusión de resultados	43
7. Conclusiones	47
8. Bibliografía	49

Listado de figuras

Figura 3.1. Estudios existentes sobre ES de Barcelona a distintas escalas: ciudad, área metropolitana (AMB), región metropolitana (RMB) y provincia

Figura 4.1. Extensión de los distintos usos del suelo de Barcelona (en % y km²)

Figura 4.2. Clasificación agrupada de usos del suelo de Barcelona

Figura 4.3. Infraestructura verde de Barcelona: parque forestal, parques y jardines urbanos, y arbolado viario

Figura 4.4. Precio medio del alquiler por barrios, año 2018 (€)

Figura 4.5. Proceso seguido para la obtención del indicador de regulación micro-climática

Figura 4.6. Detalle del índice NDVI (a) del cual se extraen los píxeles con valores >0,2 y se superponen a la geolocalización de árboles viarios (b)

Figura 4.7. Comparación del índice NDVI en parques y jardines urbanos (a) con la clasificación de usos del suelo de parques y jardines urbanos (b)

Figura 4.8. Buffers realizados alrededor de a) parques y jardines urbanos, b) parque forestal y c) árboles viarios

Figura 4.9. Detalle del alzado de a) DSM, b) DEM y c) CHM

Figura 4.10. Vista 2D de perfil de a) DSM, b) DEM y c) CHM

Figura 5.1. Temperatura de la superficie terrestre (LST) en °C

Figura 5.2. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen del arbolado viario

Figura 5.3. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen de parques y jardines urbanos

Figura 5.4. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen del parque forestal

Figura 5.5. Áreas de influencia de parques y jardines urbanos (buffer = 200m) que intersecan otros parques y jardines próximos

Figura 5.6. Límites del Parque Natural de Collserola y comparación con los límites del parque forestal de Barcelona y su área de influencia (buffer = 500m)

Figura 5.7. Distribución espacial del stock de carbono en la ciudad de Barcelona (kg C/m²)

Figura 5.8. Detalle de la distribución espacial del stock de carbono según las SPUs: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

Figura 5.9. Distribución espacial del secuestro de carbono en la ciudad de Barcelona (kg C/m²*año)

Figura 5.10. Detalle de la distribución espacial del secuestro de carbono según las SPUs: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

Figura 5.11. Valores del índice NDGB

Figura 5.12. Detalle de los valores del índice NDGB en las SPUs analizadas: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

Figura 5.13. Valor medio de LST por barrios (°C)

Figura 5.14. Stock de carbono por barrios (t C)

Figura 5.15. Secuestro de carbono por barrios (t C/año)

Figura 5.16. Índice NDGB por barrios

Figura 5.17. Relación entre indicadores

Figura 5.18. Stock de carbono almacenado en el estrato arbóreo de la provincia de Barcelona (a) según la cartografía digital elaborada por CREAM et al. (2016) y detalle de la ciudad de Barcelona (b)

Listado de tablas

Tabla 1.1. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos relevantes para las ciudades (TEEB, 2011)

Tabla 3.1. Artículos de revisión de literatura existente ('reviews')

Tabla 3.2. Listado de UES del 'Manual for cities' (TEEB, 2011) y métodos propuestos por distintos autores para su cuantificación y/o mapeo

Tabla 3.3. Características principales de los estudios realizados sobre ES de Barcelona a distintas escalas

Tabla 4.1. Cubiertas del suelo de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009)

Tabla 4.2. Valores límite de contaminantes atmosféricos según la OMS y la UE, y valores medios de Barcelona

Tabla 4.3. Bandas espectrales del satélite Landsat 8

Tabla 4.4. Metadatos de la Banda térmica 10 (TIRS 1) del Landsat 8

Tabla 4.5. Clasificación de los puntos LiDAR

Tabla 4.6. Valores del stock de carbono por cobertura del dosel arbóreo (KgC/m^2) para cada tipo de vegetación, según distintos estudios

Tabla 4.7. Árboles más comunes de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009) y clasificación entre latifolios y coníferas

Tabla 4.8. Valores del secuestro anual de carbono por cobertura del dosel arbóreo ($\text{KgC}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$) según distintos estudios

Tabla 4.9. Población de árboles (%) según diámetro (DBH = diámetro del tronco a 1,30m) de la ciudad de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009) y reclasificación según los diámetros utilizados por Nowak & Rowntree (1991)

Tabla 4.10. Tipos de población de árboles según distribución de la población perteneciente a cada categoría de DBH

Tabla 5.1. Indicador GCI de las distintas SPUs analizadas, obtenido de la diferencia entre la media de LST dentro del SPU y su área de influencia (buffer)

Tabla 5.2. Stock de carbono de las SPUs analizadas (en toneladas métricas)

Tabla 5.3. Secuestro de carbono de las SPUs analizadas (en t C/año y t $\text{CO}_2\text{eq}/\text{año}$)

Tabla 5.4. Valor medio del índice NDGB de las SPUs analizadas

Tabla 6.1. Comparación de los resultados de stock y secuestro de carbono obtenidos en este estudio con los obtenidos por Chaparro & Terradas (2009), CREAM et al. (2016) y Baró et al. (2014)

Tabla 6.2. Ranking de los 10 parques con mayor stock de carbono

Tabla 6.3. Ranking de los 10 parques con mayor secuestro de carbono

Tabla 6.4. Ranking de los 10 parques con valores más reducidos de LST

Tabla 6.5. Ranking de los 10 parques con valores más elevados del índice NDGB

Listado de acrónimos y abreviaturas

ASPB = Agencia de Salud Pública de Barcelona

BHM = *Building Height Model*

BT = *Brightness Temperature*

CC = *Cloud Cover*

CHM = *Canopy Height Model*

CNIG = Centro Nacional de Información Geográfica

CO = Monóxido de carbono

CO₂ = Dióxido de carbono

COV = Compuestos Orgánicos Volátiles

CREAF = *Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals*

DEM = *Digital Elevations Model*

DIBA = Diputación de Barcelona

DSM = *Digital Surface Model*

DTM = *Digital Terrain Model*

ES = *Ecosystem Service*

GCI = *Green space Cool Island*

GIS = *Geographical Information Systems*

ICTA = *Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals*

LST = *Land Surface Temperature*

LUR = *Land Use Regression model*

MA = *Millennium Ecosystem Assessment*

NDGB = *Normalized Difference Green-Building volume*

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

NO₂ = Dióxido de nitrógeno

MAES = *Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services*

O₃ = Ozono troposférico

OMS = Organización Mundial de la Salud

PM_{2,5} = Materia Particulada inferior a 2,5 micras

PM₁₀ = Materia Particulada inferior a 10 micras

P_v = *Proportion of vegetation*

SO₂ = Dióxido de azufre

SPUs = *Service Providing Units*

TEEB = *The Economics of Ecosystems and Biodiversity*

TOA = *Top-of-atmosphere*

UE = Unión Europea

UES = *Urban Ecosystem Services*

UFORE = *Urban Forests Effects*

UHI = *Urban Heat Island*

UN = *United Nations*

USGS = *United States Geological Survey*

1. Introducción

Actualmente más del 50% de la población mundial vive en entornos urbanos y se espera un crecimiento de hasta el 68% de la población (6.700 millones de personas) viviendo en ciudades para el año 2050 y de hasta el 90% de la población para finales del siglo XXI (United Nations, 2019).

Este proceso de urbanización constituirá el principal cambio en los usos del suelo a nivel global (Davies, Edmondson, Heinemeyer, Leake, & Gaston, 2011), ya que el 60% de las áreas urbanas todavía no están construidas (Larondelle, Haase, & Kabisch, 2014). Esta expansión del suelo construido y densificación del tejido urbano existente reduce la cantidad de zonas naturales urbanas y peri-urbanas, poniendo más presión sobre los ecosistemas urbanos que suministran agua potable, mejoran la calidad del aire, regulan la temperatura, ofrecen espacios verdes para el ocio y entretenimiento, etc.

Mientras algunas de las soluciones propuestas para hacer frente a esta presión creciente sobre los ecosistemas hacen referencia al desarrollo de ciudades más 'compactas' para minimizar la extensión de terreno afectada, otros estudios analizan la posibilidad de construir ciudades compactas pero manteniendo las áreas de hábitat natural y suministrando servicios ecosistémicos útiles para sus habitantes (Tratalos, Fuller, Warren, Davies, & Gaston, 2007).

En este aspecto, es importante diferenciar entre los modelos de urbanización existentes en distintas partes del mundo, ya que la morfología urbana afecta en gran medida al suministro de servicios ecosistémicos (Larondelle et al., 2014). Por ejemplo, Estados Unidos muestra unos patrones de urbanización más dispersos (zonas residenciales peri-urbanas de baja densidad conocidas como '*urban sprawl*') mientras que en Europa se tiende a densificar las zonas urbanas existentes, llegando incluso a construir sobre los espacios verdes restantes como jardines y patios privados (lo que se conoce como '*garden grabbing*' o '*backland development*') (Davies et al., 2011).



Figura 1.1. Distintos modelos de urbanización presentes en Barcelona: a) residencial de baja densidad, b) usos mixtos compactos, c) casco antiguo

Aunque la mayoría de estudios sobre servicios ecosistémicos se han realizado a escala regional, seguido de la escala nacional y, en muy menor medida, de las escalas local y global (Haase et al., 2014; Martínez-Harms & Balvanera, 2012; Seppelt, Dormann, Eppink, Lautenbach, & Schmidt, 2011), en los últimos años ha crecido el interés en el estudio de los servicios ecosistémicos suministrados sobre todo en entornos urbanos, ya que su suministro está directamente relacionado con la calidad de vida de los ciudadanos (Larondelle et al., 2014) en zonas donde la demanda de estos servicios es mayor debido a la densidad de población.

Los Servicios Ecosistémicos (ES), también llamados servicios ambientales, se definen como los beneficios que los seres humanos obtienen de los ecosistemas (Seppelt et al., 2011) y se pueden clasificar en cuatro categorías (Millennium Ecosystem Assessment, 2005):

1. **Servicios de aprovisionamiento:** Producción de recursos materiales, energía, comida, etc.
2. **Servicios de regulación:** Mantenimiento de las funciones ecosistémicas (calidad del aire, del suelo, regulación de la temperatura, etc.)
3. **Servicios culturales:** Beneficios no materiales que las personas obtienen del contacto con los ecosistemas (oportunidades recreativas y ocio, salud mental, inspiración estética, etc.)
4. **Servicios de hábitat o de soporte:** Posibilitan el resto de ES al proporcionar espacios para los organismos vivos.

Estos ES se pueden cuantificar o bien mediante unidades biofísicas del servicio que suministran o bien mediante su valor societal, enfoque más propio de la economía ambiental, que suele otorgar valor monetario a los distintos ES mediante métodos de valoración contingente, coste del viaje, precios hedónicos, sustitución de costes, costes evitados, etc. (Freire-González, Jofra-Sora, & Puig-Ventosa, 2019).

El informe *'Manual for cities'* de The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB, 2011) presenta una clasificación de los ES relevantes a escala urbana (Tabla 1.1):

Tabla 1.1. Clasificación de los Servicios Ecosistémicos relevantes para las ciudades (TEEB, 2011)

Servicios de aprovisionamiento	Alimentos
	Materias primas (madera, forraje, biomasa...)
	Agua dulce
	Recursos medicinales
	Energía (biocombustibles...)
Servicios de regulación	Regulación micro-climática y de la calidad del aire
	Secuestro y almacenamiento de carbono
	Moderación de eventos extremos (inundaciones...)
	Control de la escorrentía del agua de lluvia
	Tratamiento de aguas residuales
	Prevención de la erosión y mantenimiento de la fertilidad del suelo
	Polinización
Control biológico (control de plagas...)	
Servicios culturales	Ocio y salud física y mental
	Turismo
	Apreciación e inspiración estética para la cultura, el arte y el diseño
	Experiencia espiritual y sentimiento de pertenencia del lugar
	Belleza del paisaje
	Conocimiento tradicional
Servicios de hábitat o de soporte	Hábitat para las especies
	Mantenimiento de la diversidad genética
	Polinización

Bolund & Hunhammar (1999) identifican siete tipos de ecosistemas urbanos considerados naturales (aunque cualquiera de ellos esté manipulado o gestionado por humanos por el hecho de estar en áreas urbanas):

- 1) Árboles viarios
- 2) Parques y jardines urbanos
- 3) Bosques urbanos
- 4) Campos de cultivo
- 5) Humedales
- 6) Lagos/mar
- 7) Cursos de agua

A estas siete categorías de ecosistemas urbanos se les conoce como Unidades de Suministro de Servicios (SPUs, *Service Providing Units*), aunque hay muchas otras entidades suministradoras de servicios que no se tienen en cuenta en esta clasificación: huertos urbanos, jardines verticales, cubiertas verdes, balcones y otro verde privado, etc.

El informe Millenium Ecosystem Assessment (MA, 2005) presentó por primera vez el concepto de Servicios Ecosistémicos como una herramienta útil para llevar a cabo políticas para el uso sostenible de los recursos naturales. Por otro lado, las técnicas de análisis espacial que permiten el mapeo de ES pueden ser útiles para informar la toma de decisiones en distintos contextos: comunicación y concienciación, planeamiento urbano y territorial, cuantificación de ecosistemas, etc. (Baró et al., 2016).

A nivel Europeo, la acción 5 de la Estrategia para la Biodiversidad para 2020 de la Unión Europea (EU) hizo un llamamiento a los estados miembro para evaluar y mapear los ES de su territorio nacional como una acción para mantener y mejorar los ecosistemas (European Comission, EC, 2012). En este sentido, la UE publicó su quinto informe MAES –*Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services* (EU, 2018) en el que desarrolla una serie de indicadores y los presenta en forma de cartografía digital. En concreto, evalúa y mapea los siguientes ES: regulación de la calidad del aire (tomando como indicador la concentración de NO₂ y la velocidad de deposición por espacios verdes urbanos); calidad del hábitat (tomando como indicador la presencia de especies de aves); control de la escorrentía superficial; regulación climática global (tomando como indicador el secuestro de CO₂); polinización; producción de madera; oportunidades recreativas; control de la erosión del suelo e índice de retención de agua.

En el estudio presente se propone un método de operacionalización para la cuantificación de varios servicios ecosistémicos mediante técnicas de análisis espacial utilizando softwares de Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographical Information System*): Quantum GIS y ArcGis.

El método propuesto es aplicado a la ciudad de Barcelona por proximidad y facilidad para obtener los catálogos de datos de fuentes abiertas.

Las SPUs analizadas en este estudio hacen referencia a 1) árboles viarios, 2) parques y jardines urbanos y 3) bosques urbanos por su importancia en la zona de estudio. Otras SPUs como 4) campos de cultivo, 5) humedales y 7) cursos de agua se han descartado por ser escasos o prácticamente inexistentes en la zona de estudio (aunque algunas de ellas se encuentren en zonas limítrofes de la ciudad de Barcelona, como pequeños tramos de los ríos Besós i Llobregat a los márgenes de la ciudad). Finalmente, el 6) mar y las playas de Barcelona tampoco se han tenido en cuenta en este estudio por la dificultad de encontrar indicadores biofísicos capaces de medir los ES suministrados por estas SPUs.

Los ES evaluados en este estudio hacen referencia principalmente a servicios de regulación (regulación micro-climática, secuestro y almacenaje de carbono) y a un servicio cultural (apreciación/percepción de los espacios verdes).

Finalmente, los ES mencionados serán mapeados y cuantificados a partir de fuentes de datos abiertas con tal de reducir los recursos necesarios para desarrollar los indicadores y sin necesidad de tomar datos en campo, como en el extendido modelo iTree Eco (antes conocido como UFORE –Urban Forests Effects) en el que es necesario el muestreo y toma de datos en campo que, tras ser introducidas en la base de datos, realiza estimaciones de distintos ES suministrados por los árboles (tanto con unidades biofísicas como monetarias).

Teniendo en cuenta estas limitaciones de tiempo y recursos, hay que ser conscientes de que los resultados obtenidos en este estudio hacen referencia a estimaciones en las que en algunos casos se han utilizado datos procedentes de otros estudios (ratios de stock y secuestro de carbono por unidad de superficie, obtenidas bajo distintos climas, duración de la estación de crecimiento, zonas de estudio, etc.)

Por este motivo, tras el apartado en el que se describen los métodos seguidos, así como los materiales y datos utilizados, se presentarán los resultados obtenidos y, posteriormente, se analizarán y compararán con otras investigaciones existentes en la misma zona de estudio para determinar la viabilidad y precisión de los métodos propuestos.

2. Definición de objetivos

Mediante el estudio presente se pretende, principalmente:

- **Mapear y cuantificar** distintas categorías de Servicios Ecosistémicos dentro de la ciudad de Barcelona: de regulación, de aprovisionamiento, de soporte y culturales.

De forma complementaria al objetivo principal del trabajo, se pretende:

- Utilizar **indicadores biofísicos** cuyas unidades de medida estén directamente relacionadas con el servicio que se quiere cuantificar.
- Analizar la contribución a los ES de las Unidades de Suministro de Servicios (**SPUs**) más importantes de Barcelona: arbolado viario, parques y jardines urbanos, y parque forestal.
- Analizar la distribución de ES por **barrios y/o distritos**.
- Analizar la distribución de ES por categorías de **usos del suelo**.
- Analizar la **relación entre los indicadores** obtenidos.
- **Comparar** y contrastar los resultados obtenidos en este estudio con los obtenidos en otros estudios realizados en Barcelona.
- Proponer un método **aplicable** a otras ciudades/casos de estudio.

3. Estado del arte

En este apartado se realiza una revisión de la bibliografía existente referente a:

- a) **Servicios Ecosistémicos** (ES, *Ecosystem Services*)
- b) **Servicios Ecosistémicos Urbanos** (UES, *Urban Ecosystem Services*)
- c) **Mapeo de Servicios Ecosistémicos**

Adicionalmente, se analizan los estudios existentes sobre los ES de Barcelona a distintas escalas:

- i. **Ciudad** de Barcelona
- ii. **Área Metropolitana** de Barcelona (AMB)
- iii. **Región Metropolitana** de Barcelona (RMB)
- iv. **Provincia** de Barcelona

La búsqueda inicial de artículos académicos se centró en los siguientes términos y operadores booleanos: 'urban' OR 'cities' AND 'ecosystem services' OR 'environmental services' OR 'ecological services' OR 'green infrastructure' AND 'mapping' OR 'valuation' OR 'quantification', usados a la vez o combinados entre ellos.

De esta búsqueda inicial se extrajeron tres artículos de revisión de literatura existente ('reviews'), cada uno referente a los temas mencionados anteriormente (Tabla 3.1) a partir de los cuales se extrajeron los artículos sobre la cuantificación o mapeo de ES concretos.

Tabla 3.1. Artículos de revisión de literatura existente ('reviews')

Tema	Artículo	Autores
Servicios Ecosistémicos	<i>'A quantitative review of Ecosystem Service studies: approaches, shortcomings and the road ahead'</i>	Seppelt et al. (2011)
Servicios Ecosistémicos Urbanos	<i>'A quantitative review of Urban Ecosystem Service assessments: concepts, models and implementation'</i>	Haase et al. (2014)
Mapeo de Servicios Ecosistémicos	<i>'Methods for mapping Ecosystem Service supply: a review'</i>	Martínez-Harms & Balvanera (2012)

Según Seppelt et al. (2011) dos tercios de los estudios realizados sobre ES (a cualquier escala) usaron tablas de consulta ('look-up tables') para mapear los ES sobre cubiertas o usos del suelo. La mayoría de estudios (61%) no tuvieron en cuenta a los actores involucrados para la cuantificación de ES. Menos del 40% de estudios derivó sus resultados de datos primarios a partir de observaciones o medidas en campo, mientras que dos tercios basaron sus resultados en datos secundarios (principalmente no validados).

En cuanto a los UES, según Haase et al. (2014) el 50% de los UES evaluados eran servicios de regulación, el 20% eran servicios de soporte, el 15% eran servicios culturales y el 11% eran servicios de aprovisionamiento. La mayoría de estudios (60%) se centraban en un único servicio. Los UES más comunes eran la regulación micro-climática y de la calidad del aire (15,8%), el secuestro y almacenaje de carbono (11,8%), la salud mental y física (9,3%) y el hábitat para las especies (7,5%). En cuanto a las SPU analizadas, la más común fueron los bosques urbanos (18,8%), seguida de la infraestructura verde (11,7%), lagos y cursos de agua (8,5%) y parques urbanos (4,8%). En cuanto a los modelos utilizados para cuantificar el suministro/demanda de UES, el 12,5% utilizó modelos basados en software SIG, mientras que el 11,7% utilizó indicadores biofísicos y el 10,2% valoraciones cualitativas. En cuanto a la valoración de UES, el 72% de estudios utilizó exclusivamente indicadores no monetarios, mientras que el 35% utilizó tanto indicadores monetarios como no monetarios.

Finalmente, en cuanto al mapeo de ES, según Martínez-Harms & Balvanera (2012) los ES más mapeados han sido el almacenaje de carbono, el secuestro de carbono, la producción de comida y las oportunidades recreativas. Los servicios de regulación fueron los más mapeados, seguidos de los de aprovisionamiento, culturales y, finalmente, de soporte. El mapeo a escala regional fue el más utilizado tanto para servicios culturales, de aprovisionamiento, de regulación y de soporte, seguido de la escala nacional y local.

Tanto en Haase et al. (2014) como en Martínez-Harms & Balvanera (2012) se aprecia cómo el número de estudios sobre ES creció sustancialmente a partir de 2005, a raíz de la publicación del Millennium Ecosystem Assessment (MA, 2005).

Todos estos artículos citan a Costanza et al. (1997), MA (2005) y The Economics of Ecosystems and Biodiversity (TEEB, 2011) para la definición y clasificación de los ES. En concreto, TEEB (2011) propuso por primera vez en su *'Manual for cities'* un listado con los 18 ES más importantes en entornos urbanos. A partir de este listado se construye la siguiente Tabla 3.2, en la que se incluye un indicador, unidad de medida y datos de entrada para la cuantificación de cada ES.

Sólo se incluyen aquellos ES relevantes para el caso de estudio o aquellos para los que se han encontrado métodos para su cuantificación en la literatura (de los 18 ES descritos por TEEB (2011), se presentan indicadores para 13 de ellos). Tampoco se han tenido en cuenta aquellos métodos en los que se utilizan herramientas o aplicaciones que requieren muestreo/toma de datos en campo (iTree –UFORE, ESTIMAP, CITY-Green, InVest, GUMBO, etc.)

Finalmente, se realiza una revisión de los estudios existentes sobre la cuantificación y/o mapeo de los ES suministrados por Barcelona tanto a escala urbana, como metropolitana (AMB y RMB) y regional (provincia) (Tabla 3.3). Estos estudios son los que se utilizarán en el apartado 6. *Discusión de resultados* para contrastar y comparar los resultados obtenidos en el estudio actual.

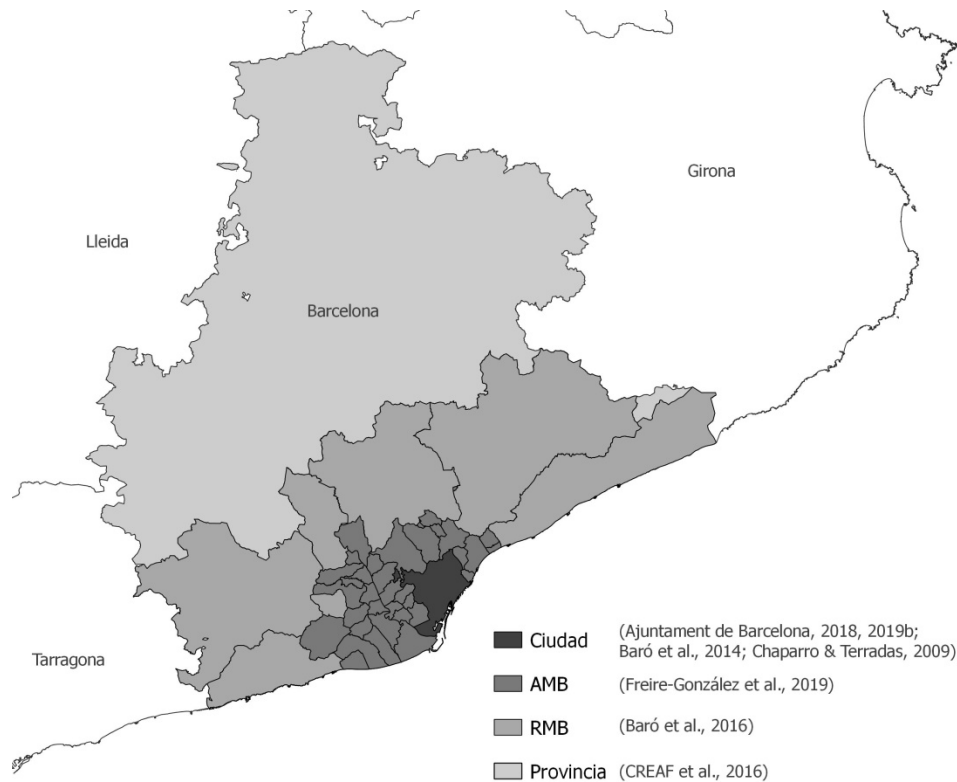


Figura 3.1. Estudios existentes sobre ES de Barcelona a distintas escalas: ciudad, área metropolitana (AMB), región metropolitana (RMB) y provincia (Fuente: Elaboración propia)

Tabla 3.2. Listado de UES del informe 'Manual for cities' (TEEB, 2011) y métodos propuestos por distintos autores para su cuantificación y/o mapeo (Fuente: Elaboración propia)

	Servicio Ecosistémico	Indicador [unidad]	Datos de entrada	Fuente
Servicios de regulación	Regulación micro-climática	GCI = <i>Green space Cool Island effect</i> [°C] $GCI = \Delta T = T_{urbana} - T_{parque}$	LST = <i>Land Surface Temperature</i> (imágenes Landsat o ASTER)	Cao, Onishi, Chen, & Imura (2010); Du et al. (2017)
		LST = <i>Land Surface Temperature</i> [K]	Imágenes de Landsat TM/ETM+ (Banda 6)	Chen, Yao, Sun, & Chen (2014); Kong, Yin, Wang, Cavan, & James (2014); Lin, Yu, Chang, Wu, & Zhang (2015)
		Sombra [% canopia]	NDVI/LiDAR	Zardo, Geneletti, Pérez-Soba, & van Eupen (2017)
		ETA = Evapotranspiración [mm/día] $ETA = ETA_{árboles} * \%canopia + ETA_{suelo} * (1 - \%canopia)$	Cubiertas del suelo	
		Tamaño GUI = <i>Green Urban Infrastructure</i> [Booleano GUI >2ha; GUI <2ha]	Usos/cubiertas del suelo	
		Enfriamiento de la vegetación [°C]: $LEH + CDD * \% canopia$	LEH = <i>Latent Enthalpy Hours</i> CDD = <i>Cooling Degree Days</i> NDVI/LiDAR	McPhearson, Kremer, & Hamstead (2013)
	Regulación de la calidad del aire	Velocidad de deposición en seco del contaminante [mm/s]	Velocidad del viento a 10m de altura	Baró et al. (2016); Baró et al. (2014); Nowak, Crane, & Stevens (2006)
		Concentraciones del contaminante [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Modelo LUR = <i>Land Use Regression</i> (concentraciones anuales por estación, cubiertas del suelo, DEM, velocidad del aire, temperaturas y precipitaciones anuales, mapa viario, cubierta vegetal)	
		Superficie de vegetación [m^2] *ratio de absorción de contaminantes [$\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$] = [$\text{g}/\text{año}$]	LiDAR/Usos/Cubiertas del suelo	McPhearson et al. (2013)
	Secuestro de carbono	Superficie de vegetación alta [m^2] *ratio de secuestro de carbono [$\text{kg C}/\text{m}^2 \cdot \text{año}$] = [$\text{kg C}/\text{año}$]	LiDAR → CHM = <i>Canopy Height Model</i>	McPhearson et al. (2013)
	Stock de carbono	Categorías de vegetación [árboles, leñosas, herbáceas]	LiDAR → CHM = <i>Canopy Height Model</i>	Davies et al. (2011); McPhearson et al. (2013); Strohbach & Haase (2012)
		Superficie de vegetación [m^2] *ratio de stock de carbono [$\text{kg C}/\text{m}^2$]	CHM	

	Control de la escorrentía de lluvia	Permeabilidad del suelo [l/m^2]	Imágenes de Satélite (Landsat, ASTER, etc.)	Ahmad, Zhang, & Nichols (2011); Elhakim (2016); ZhiMing, QiMing, Abduwasit, & Dongdong (2007)
		$P_e = \frac{(P - 0,2 * S)^2}{P - 0,8 * S}$ $S = \frac{2.540}{CN} - 25,4$ $CN = \text{Curve Number (para cada tipo de suelo)}$	Cobertura del suelo	Tratalos et al. (2007)
	Tratamiento de aguas residuales	% de retención de contaminantes en humedales [%]	-	Bolund & Hunhammar (1999)
	Regulación del ruido	Reducción del ruido [dB]	Mapa acústico Usos del suelo (vegetación entre fuente de ruido y fachadas)	Bolund & Hunhammar (1999)
	Polinización	Proximidad a lugares de anidamiento [m]	-	Martínez-Harms & Balvanera (2012)
Servicios culturales	Entretenimiento y salud mental y física	Potencial recreacional [0-5]	Índice de naturalidad de hábitats Figuras de protección natural Fuentes de agua	Baró et al. (2016)
		Viajes esperados [nº viajes/ha]	Densidad de población Potencial recreacional	
	Apreciación estética e inspiración	$NDGB = NDVI * \frac{CHM - BHM}{CHM + BHM}$ NDGB = <i>Normalized Difference Green-Building volume</i> [0-1]	LiDAR → CHM + BHM NDVI	Laforteza & Giannico (2017)
	Belleza del paisaje	Precios del mercado inmobiliario [€/m ²]	-	Hernández-Morcillo, Plieninger, & Bieling (2013)
Servicios de soporte	Hábitat para las especies	Prioridad ecológica [% vegetación, agua, suelo]	Cobertura/Usos del suelo	McPhearson et al. (2013)
		Conectividad/proximidad a espacios verdes [m]		
		Compacidad/similitud a un círculo [0-1]		
		Tamaño [m ²]		
Aprovisio-namiento	Producción de alimentos	Huertos urbanos	Geolocalización de huertos urbanos de Barcelona	McPhearson, Kremer, & Hamstead (2013)
		Tamaño de los huertos urbanos	Usos del suelo/Fotografías aéreas	

Tabla 3.3. Características principales de los estudios realizados sobre ES de Barcelona a distintas escalas (Fuente: Elaboración propia)

	Escala	SPUs	Servicios Ecosistémicos	Valoración biofísica/monetaria	Mapeo
<i>'Pla del Verd i de la Biodiversitat de Barcelona 2020'</i> (Ajuntament de Barcelona, 2019c)	Ciudad	-Espacios naturales -Parques fluviales -Litoral -Bosques -Parques -Jardines -Huertos -Estanques -Plazas -Arbolado viario -Verde viario -Cubiertas verdes -Techos verdes	N/A	Sin dimensión [1-10]	X
<i>'Caracterització dels Serveis Ecosistèmics i Valoració del Servei de Provisió d'Aliments'</i> (Freire-González et al., 2019)	Regional (AMB)	-Parques y reservas naturales -Parques urbanos -Parque agrario -Playas -Humedales	-Provisión de recursos -Suministro de agua -Recursos medicinales -Ecoturismo y ocio -Inspiración -Regulación clima -Regulación agua -Purificación agua - Calidad aire -Regulación erosión -Control de eventos extremos -Mitigación incendios -Control biológico -Polinización -Salud humana -Mantenimiento biodiversidad	Sin dimensión [1-5] y monetaria	✓
<i>'Serveis Socioambientals dels espais verds de Barcelona'</i> (Ajuntament de Barcelona, 2018)	Ciudad	-Parques históricos -Parques y jardines -Plazas verdes -Interiores de manzana	-Regulación térmica -Retención carbono -Mejora calidad aire -Permeabilidad -Funcionalidad ecosistema -Paseo -Juegos al aire libre -Picnic -Correr -Bici - Actividades deportivas -Salud mental -Salud física -Envejecimiento activo -Alergias -Inspiración -Reflexión, descanso -Historia -Paisaje -Vinculación con la naturaleza -Eventos -Encuentro y relación -Cohesión social -Educación ambiental -Esponjamiento -Paisaje urbano -Ordenación peri-urbana -Visita turística -Valoración de fincas -Valoración actividades económicas	Sin dimensión [1-10]	X
<i>'Serveis Ecològics del Verd Urbà a Barcelona'</i> (Chaparro & Terradas, 2009)	Ciudad	-Parque forestal -Parques y jardines urbanos -Arbolado viario	-Calidad del aire -Emisiones biogénicas -Secuestro y almacenaje de carbono -Regulación micro-climática -Reducción del ruido	Indicadores biofísicos	X

	Escala	SPUs	Servicios Ecosistémicos	Valoración biofísica/monetaria	Mapeo
<i>'Mapping ES capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona Metropolitan Region'</i> (Baró et al., 2016)	Regional (RMB)	-Cuerpos de agua -Pastos y prados -Bosques -Matorrales -Terreno agrícola -Parques urbanos -Otras coberturas naturales del suelo	-Purificación del aire -Ocio al aire libre	Indicadores biofísicos	✓
<i>'Contribution of ES to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona'</i> (Baró et al., 2014)	Ciudad	-Bosques urbanos	-Purificación del aire -Regulación del clima (secuestro de carbono)	Indicadores biofísicos	✗
<i>'Cartografia dels Serveis Ecosistèmics de Barcelona'</i> (CREAF et al., 2016)	Regional (Provincia)	N/A	-Abastecimiento de alimentos -Abastecimiento de biomasa forestal -Almacenaje de carbono -Secuestro de carbono -Control de la erosión -Oportunidades recreativas -Hábitat para las especies	Indicadores biofísicos	✓

En primer lugar, en el *'Pla del Verd i de la Biodiversitat de Barcelona 2020'* (Ajuntament de Barcelona, 2019c) se realiza un diagnóstico del estado actual de la infraestructura verde de la ciudad de Barcelona, se presenta un plan de corredores biológicos para conectar los espacios naturales más importantes (Collserola, Montjuïc, el litoral y los ríos Llobregat y Besós) y se especifica el plan de acción a seguir para conseguirlo a medio plazo. En la diagnosis del estado actual, se realiza una valoración cuantitativa de los espacios naturales abiertos, parques fluviales, el litoral, los bosques, parques, jardines urbanos, huertos urbanos, estanques, plazas, arbolado viario, verde viario y techos y paredes verdes (jardines verticales). Esta valoración cuantitativa se realiza a partir de varios indicadores: superficie; calidad del suelo; permeabilidad; presencia de agua; riqueza de especies y hábitats; relación de especies autóctonas/alóctonas; densidad; estratificación; salud de fauna y vegetación; singularidad; confort acústico y climático; calidad del aire, olfativa, sonora, cromática y visual; variabilidad estacional; proximidad; accesibilidad; movilidad pacificada; diversidad de usos; capacidad de socialización; identidad; interés histórico, artístico y educativo. A estos indicadores se les asigna un valor entre 0 y 10, por lo que no es posible saber el valor del indicador biofísico al que hacen referencia.

En el informe *'Caracterització dels Serveis Ecosistèmics i Valoració del Servei de Provisió d'Aliments'* llevado a cabo por la Dirección de Servicios Ambientales del AMB (Freire-González et al., 2019) se realiza un estudio detallado de las cubiertas de suelo existentes en distintas SPUs del AMB: parques y reservas naturales (Garraf, Collserola, Serralada de Marina, Muntanyes d'Ordal, etc.), parque agrario del Baix Llobregat, reservas del Delta del Llobregat, playas metropolitanas y parques urbanos. Los indicadores utilizados para la evaluación de estas SPUs son asignados con un valor entre 1 y 5 y, posteriormente, se realiza la valoración económica de los mismos. Se presentan mapas para cada ES evaluado.

En el informe *'Serveis Socioambientals dels espais verds de Barcelona'* (Ajuntament de Barcelona, 2018) se presenta un método para la evaluación de ES, mediante una matriz de relaciones en la que a cada servicio socioambiental se le asigna un peso para la evaluación de distintos indicadores morfológicos (superficie, edad, compacidad, longitud) y biofísicos (cobertura verde, cobertura arbórea, arbolado caducifolio o perenne, madurez del arbolado, vegetación autóctona, superficie de césped, suelo permeable, presencia de agua, arbustos periféricos, diversidad de sombra-sol, arbolado alergógeno, proximidad a zonas naturales, áreas forestales naturalizadas, proximidad a Collserola, distancia al mar, conectividad con parques). Una vez evaluados, se realiza un ranking de los mejores espacios verdes para cada ES, ya sean parques históricos, otros parques y jardines, plazas verdes o interiores de manzana.

Investigadores/as del CREAM (Centre de Recerca Ecològica i d'Aplicacions Forestals) realizaron el informe *'Serveis Ecològics del Verd Urbà a Barcelona'* (Chaparro & Terradas, 2009) donde se cuantifican ciertos aspectos relativos a la vegetación existente en Barcelona (distribución de árboles según su diámetro (DBH, *Diametre at Breast Height*), número de ejemplares de cada especie, índice del área de la hoja (LAI, *Leaf Area Index*), biomasa, etc.) así como los servicios que generan en cuanto a regulación de la calidad del aire, secuestro y almacenaje de carbono, regulación micro-climática y regulación del ruido. La valoración se hace mediante indicadores biofísicos en términos absolutos de toda la ciudad así como por categorías de usos del suelo.

Adicionalmente, el CREAM junto con el ICTA (*Institut de Ciència i Tecnologia Ambientals*) y la DIBA (*Diputació de Barcelona*) desarrollaron una serie de cartografías digitales para mapear y cuantificar el suministro de ES en la provincia de Barcelona (CREAF et al., 2016).

Finalmente, Baró et al. (2016) proponen un método para el mapeo del suministro de los ES purificación del aire (referente al NO₂) y ocio al aire libre en la Región Metropolitana de Barcelona (RMB). Por otro lado, Baró et al. (2014) cuantifican el suministro de los ES purificación del aire y secuestro de carbono a escala urbana mediante indicadores biofísicos, pero sin llegar a mapearlos.

4. Materiales y métodos

4.1. Contexto

El método propuesto en los siguientes apartados es aplicado a la ciudad de Barcelona, por proximidad y facilidad para obtener datos de fuentes abiertas. A continuación se describen las principales características de la zona de estudio que serán utilizadas posteriormente para el análisis de resultados: divisiones administrativas, infraestructura verde, usos y cubiertas del suelo, etc.

La ciudad de Barcelona se encuentra situada en el noreste de España, en la Comunidad Autónoma de Catalunya, de la que es capital. También es capital de la provincia con el mismo nombre y de la comarca del Barcelonés. A su alrededor se constituye el Área Metropolitana de Barcelona (AMB), con un total de 36 municipios adheridos, y con más extensión, la Región Metropolitana de Barcelona (RMB), formada por los 164 municipios de las comarcas del Alt Penedès, Baix Llobregat, Barcelonés, Garraf, Maresme, Vallès Occidental y Vallès Oriental.

Se trata de la segunda mayor ciudad de España, tanto en número de habitantes –1.620.809 habitantes a 1 de enero de 2017 (Ajuntament de Barcelona, 2019d)–, como en superficie –101,2 km² (AMB, 2019), siendo una de las ciudades con mayor densidad de población de Europa (16.015 hab./km²). Esta compacidad se debe a los límites físicos que impiden la expansión urbana: el municipio está encajado en el que se conoce como Llano de Barcelona, limitado por el río Besòs, al norte, el río Llobregat y la montaña de Montjuïc al sur, la sierra de Collserola al oeste, y el mar Mediterráneo al este. Probablemente por este motivo los espacios verdes urbanos son escasos, representando tan sólo el 8% de su superficie (Figura 4.1).

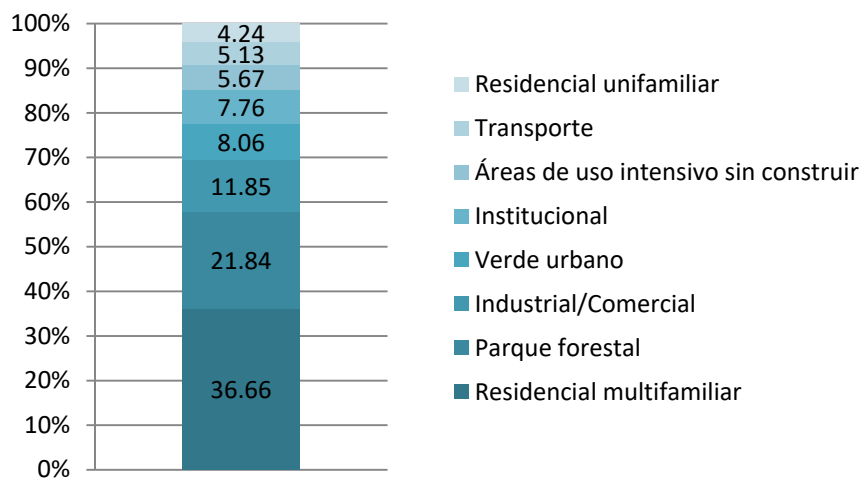


Figura 4.1. Extensión de los distintos usos del suelo de Barcelona (en % y km²)
(Fuente: Chaparro & Terradas (2009))

Después del suelo residencial multifamiliar, que representa el 36% del suelo de la ciudad, el parque forestal, compuesto por parte del Parque Natural de Collserola, es la categoría más extensa, con un 21% de la superficie urbana, mientras que el verde urbano, formado por los espacios verdes privados y por parques y jardines urbanos, representa tan sólo el 8% de la superficie de la ciudad, lo que supone 7,58 m²/hab., una ratio muy reducida en comparación con otras ciudades Europeas. Sin embargo, esta reducida área de verde urbano se ve compensada en cierta medida por la gran cantidad de árboles viarios plantados en las calles de Barcelona, que según el inventario vigente en el momento de la redacción de este documento era de 203.520 ejemplares (Ajuntament de Barcelona, 2019a), una ratio por habitante mayor que en otras ciudades Europeas.

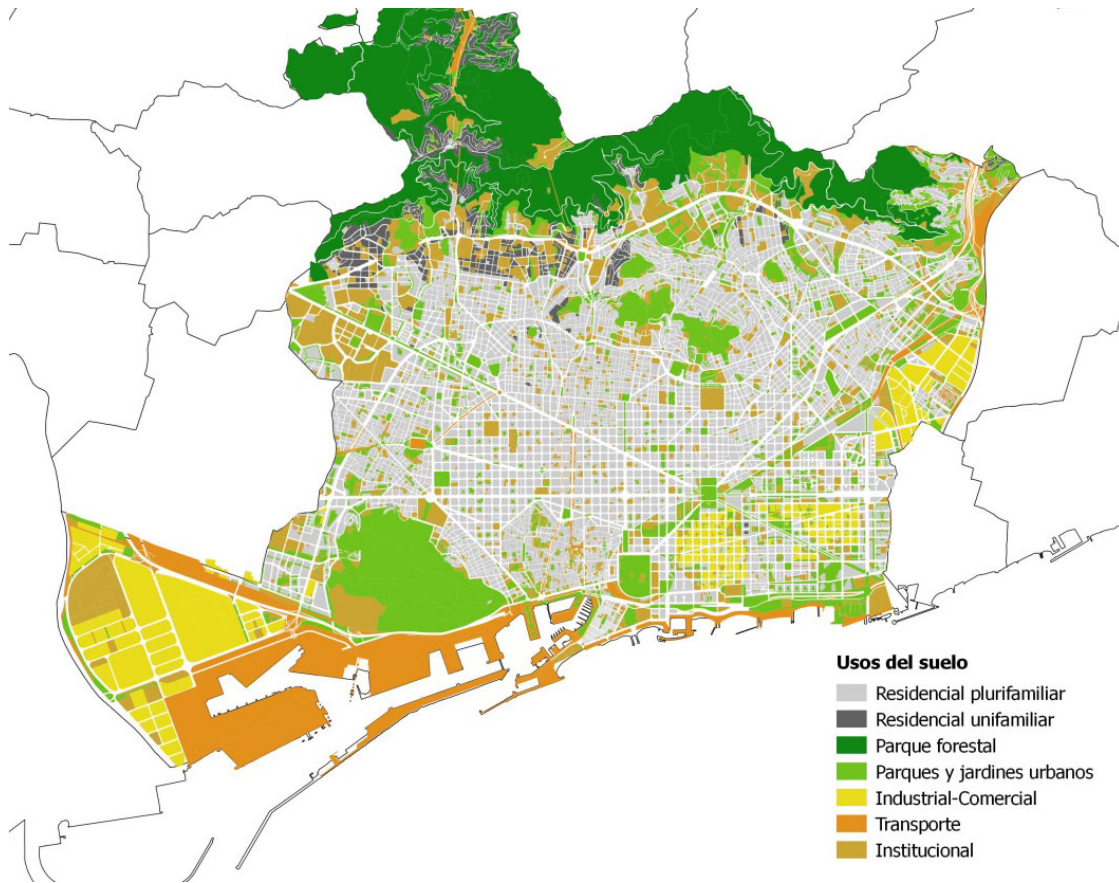


Figura 4.2. Clasificación agrupada de usos del suelo de Barcelona
 (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en CartoBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019f))

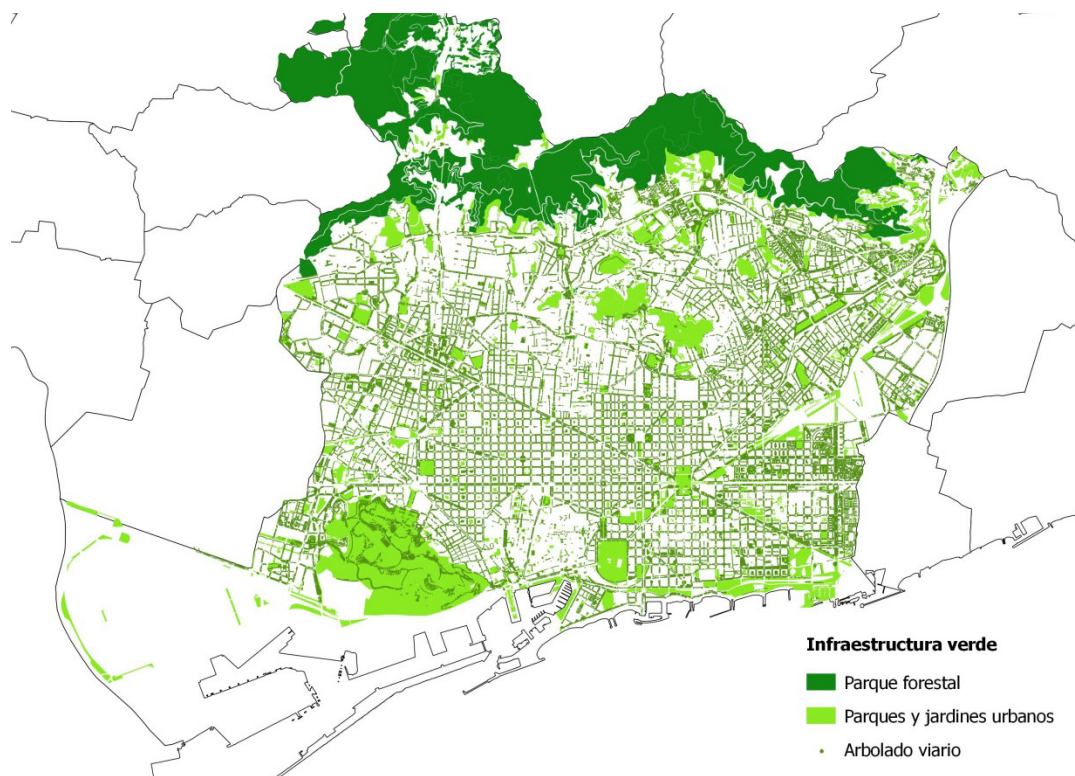


Figura 4.3. Infraestructura verde de Barcelona: parque forestal, parques y jardines urbanos, y arbolado viario
 (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en CartoBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019f) y OpenDataBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019a))

En cuanto a las coberturas del suelo de la ciudad de Barcelona, un 31,5% está ocupado por edificios, un 17,6% por asfalto y un 14% por cemento, lo que representa un 63,1% de suelo impermeable en toda la ciudad (64,78 km²). El 36,9% restante es suelo permeable y está formado por un 19,2% de vegetación herbácea, un 13,7% de tierra, un 2,8% de césped y un 0,3% de agua (Chaparro & Terradas, 2009) (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Cubiertas del suelo de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009)

Permeabilidad	Porcentaje	Cubierta del suelo	Porcentaje
Superficie impermeable	63,1%	Edificios	31,5%
		Asfalto	17,6%
		Cemento	14%
Superficie permeable	36,9%	Vegetación herbácea	19,2%
		Tierra	13,7%
		Césped	2,8%
		Agua	0,3%

Administrativamente la ciudad se divide en 10 distritos y éstos, a su vez, se dividen en un total de 73 barrios. A continuación se muestran los precios medios de alquiler por barrios, para posteriormente determinar si existe alguna relación entre éstos y el suministro de ES (Figura 4.4).

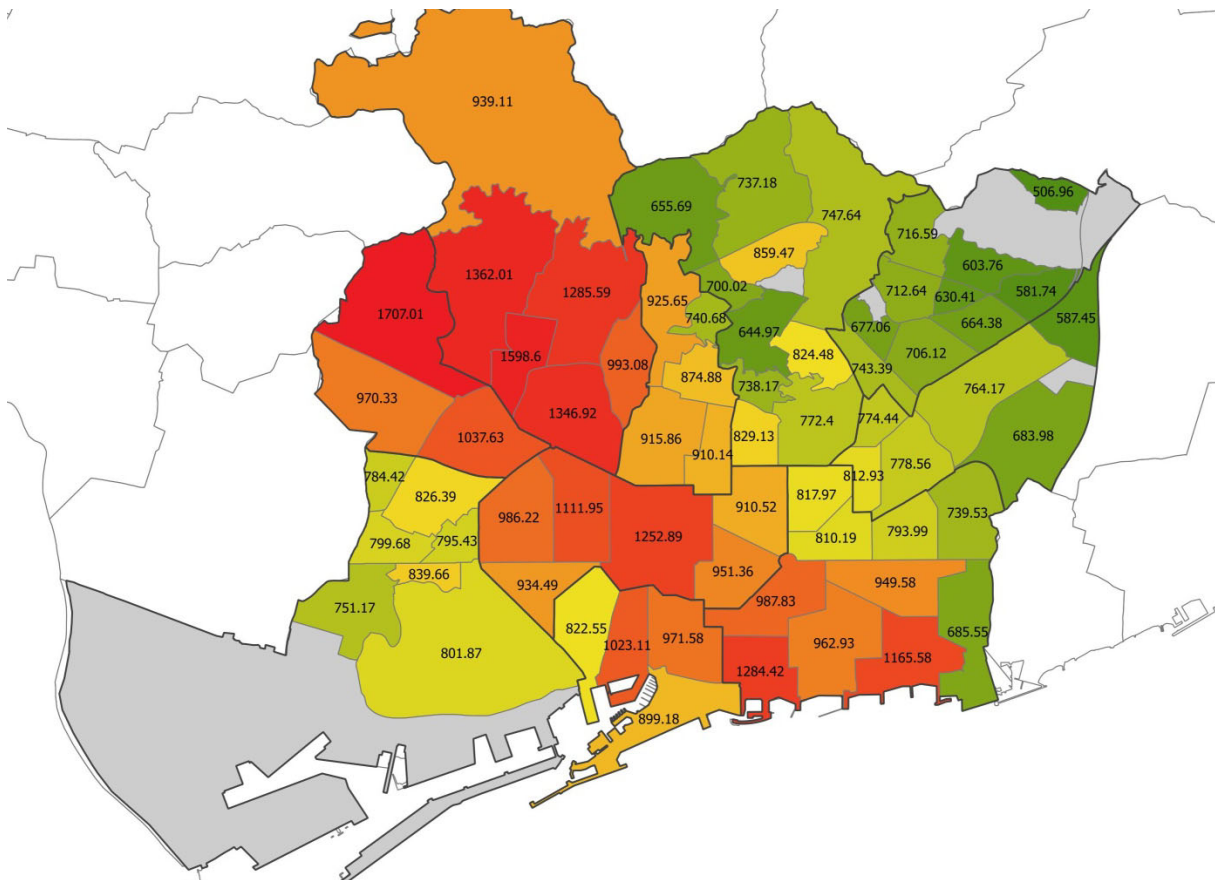


Figura 4.4. Precio medio del alquiler por barrios, año 2018 (€) (Fuente: Ajuntament de Barcelona (2019b))

En cuanto a la calidad del aire de la ciudad de Barcelona, los principales contaminantes presentes en el aire son el dióxido de nitrógeno (NO_2) y las partículas contaminantes de menos de 10 micras de diámetro (PM_{10}). Aun así, también se evalúan los niveles de distintos contaminantes: partículas inferiores a 2,5 micras ($\text{PM}_{2.5}$), ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV) y, aunque no sea tóxico, el dióxido de carbono (CO_2) ya que es un gas de efecto invernadero y afecta directamente al cambio climático (Ajuntament de Barcelona, 2019e).

Barcelona ha sobrepasado en varias ocasiones en los últimos años los valores límite de concentración media anual de NO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ establecidos por la UE (Directiva 2008/50/CE y RD 102/2011) y por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La siguiente Tabla 4.2 muestra los valores límite establecidos por la UE y por la OMS para los principales contaminantes atmosféricos y los periodos de tiempo en que se miden, así como los valores medidos en la ciudad de Barcelona para el año 2017 según el informe de la Agencia de Salud Pública de Barcelona (ASPB, 2018).

Tabla 4.2. Valores límite de contaminantes atmosféricos según la OMS y la UE, y valores medios de Barcelona para el año 2017 (Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ASPB (2018))

Contaminante	Periodo de tiempo (máx. superaciones)*	Límite ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		Nº de superaciones
		OMS	UE	Estaciones de fondo	Estaciones de tráfico	
NO_2	VLa	40	40	37	55	-
	VLh (<18)	200	200	-	-	4 (de 18)
PM_{10}	VLa	20	40	24	27	-
	VLd (<35)	50	50	-	-	24 (de 35)
$\text{PM}_{2.5}$	VLa	10	25	14	17	-
O_3	VL8h (<25)	100	120	-	-	4 (de 25)
CO	VLh	10	10	-	-	0
	VL8h	30	-	-	-	0
SO_2	VLd (<3)	20	125	-	-	0 (de 3)
	VLh (<24)	-	350	-	-	0 (de 24)

*Donde:

VLa = Valor Límite anual

VLd = Valor Límite diario

VLh = Valor Límite horario

VL8h = Valor Límite 8-horario

4.2. Desarrollo de indicadores

4.2.1. Regulación micro-climática.

Siguiendo la definición de la intensidad de la Isla de Calor Urbano (UHI, *Urban Heat Island*) como la diferencia de temperatura entre el centro de una ciudad y sus alrededores, se define la intensidad de la Isla de Frío de zonas Verdes (GCI, *Green space Cool Island*) como la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior de las zonas verdes, siguiendo el método propuesto por Cao, Onishi, Chen, & Imura (2010) de acuerdo a la ecuación [1]:

$$GCI = \Delta T = T_u - T_v \quad [1]$$

Donde:

GCI = *Green space Cool Island effect* = Efecto isla de frío de zonas verdes (en °C)

T_v = Temperatura media dentro de la zona verde (SPU), ya sea arbolado viario, parque forestal o parques y jardines urbanos

T_u = Temperatura media del área urbana alrededor de la zona verde (50 m alrededor del arbolado viario, 200 m alrededor de los parques y jardines urbanos y 500 m alrededor de parques forestales)

Aunque normalmente el GCI se mide mediante observaciones de temperatura en campo dentro del área del parque así como en sus alrededores, en este estudio la intensidad de GCI se obtiene de la diferencia en la Temperatura de la Superficie Terrestre (LST, *Land Surface Temperature*) obtenida por medio de sensores remotos, debido a la dificultad que presenta la medición en campo, como se ha realizado en numerosos estudios sobre la capacidad de enfriamiento de la vegetación, la mitigación del efecto UHI mediante zonas verdes, etc. (Cao et al., 2010; Chen et al., 2014; Du et al., 2017; Kong et al., 2014; Lin et al., 2015).

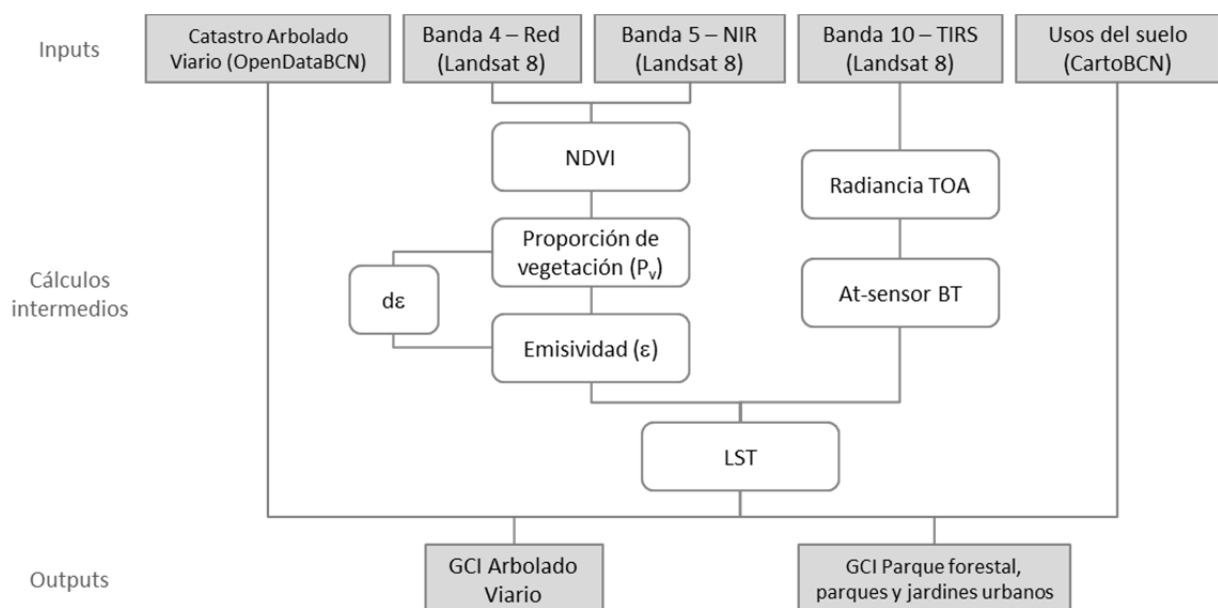


Figura 4.5. Proceso seguido para la obtención del indicador de regulación micro-climática

Para el cálculo de LST, se han utilizado las imágenes ráster obtenidas por el satélite Landsat 8, el inventario del arbolado viario de Barcelona procedentes de OpenDataBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019a) y el archivo vectorial con los usos del suelo obtenido en CartoBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019f). La Figura 4.5 muestra el diagrama de flujo con el proceso seguido desde la introducción de los datos de entrada hasta la obtención del indicador.

El Landsat 8 es un satélite de observación terrestre operado por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, *United States Geological Survey*) que fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y puesto en órbita con una resolución temporal de 16 días (revisa un mismo punto de la superficie terrestre cada 16 días) e incluye dos instrumentos a bordo:

- 1) *Operational Land Imager* (OLI): registra 9 bandas espectrales en la región visible (VIS), infrarroja cercana (NIR) e infrarroja de onda corta (SWIR).
- 2) *Thermal Infrared Sensor* (TIRS): registra dos bandas espectrales en la región de onda larga (LWIR).

Las imágenes del Landsat 8 utilizadas en este apartado fueron registradas el 20 de agosto de 2018 con una cobertura de nubes (CC, *Cloud Cover*) inferior al 10% para minimizar las perturbaciones atmosféricas.

Tabla 4.3. Bandas espectrales del satélite Landsat 8

Sensor	Bandas Landsat 8	Longitud de onda [μm]	Resolución [m]
OLI	Banda 1 - <i>Coastal aerosol</i>	0,43 – 0,45	30
	Banda 2 - <i>Blue</i>	0,45 – 0,51	30
	Banda 3 - <i>Green</i>	0,53 – 0,59	30
	Banda 4 - <i>Red</i>	0,64 – 0,67	30
	Banda 5 - <i>Near Infrared</i> (NIR)	0,85 – 0,88	30
	Banda 6 - <i>Short-wave Infrared 1</i> (SWIR 1)	1,57 – 1,65	30
	Banda 7 - <i>Short-wave Infrared 2</i> (SWIR 2)	2,11 – 2,29	30
	Banda 8 - <i>Panchromatic</i>	0,50 – 0,68	15
	Banda 9 - <i>Cirrus</i>	1,36 – 1,38	30
TIRS	Banda 10 - <i>Thermal Infrared 1</i> (TIRS 1)	10,60 – 11,19	100 (remuestreado a 30)
	Banda 11 - <i>Thermal Infrared 2</i> (TIRS 2)	11,50 – 12,51	100 (remuestreado a 30)

En primer lugar, se ha utilizado la Banda térmica 10 (TIRS 1, *Thermal Infrared Sensor 1*) en formato ráster (.tif) para su conversión a radiancia (L) en el sensor (*At-sensor radiance* o *Top-of-atmosphere – TOA– radiance*) mediante la fórmula [2] (United States Geological Survey, USGS, 2013):

$$TOA(L) = M_L Q_{cal} + A_L \quad [2]$$

Donde:

TOA (L) = *Top-of-atmosphere radiance* = Radiancia en el sensor

Q_{cal} = Banda térmica 10 (TIRS 1)

M_L = Factor de reescalado multiplicativo específico de la banda, obtenido de los metadatos de la banda en cuestión (Tabla 4.4.)

A_L = Factor de reescalado aditivo específico de la banda, obtenido de los metadatos de la banda en cuestión (Tabla 4.4.)

Tabla 4.4. Metadatos de la Banda térmica 10 (TIRS 1) del Landsat 8

Factor de reescalado	M_L	0,000342
	A_L	0,1
Constante térmica	K_1	774,8853
	K_2	1321,0789

Una vez obtenido un nuevo archivo ráster con la radiancia TOA, estos datos deben ser convertidos a Temperatura en el sensor (BT, *At-sensor Brightness Temperature*) mediante las constantes térmicas K_1 y K_2 proporcionadas en los metadatos del propio archivo (Tabla 4.4.) siguiendo la ecuación [3] (USGS, 2013):

$$BT = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{TOA(L)} + 1\right)} - 273,15 \quad [3]$$

Donde:

BT = *At-sensor Brightness Temperature* = Temperatura en el sensor

TOA (L) = *Top-of-atmosphere radiance* = Radiancia en el sensor, obtenida en [2]

K_1 = Constante de conversión térmica 1, obtenida en los metadatos de la Banda 10

K_2 = Constante de conversión térmica 2, obtenida en los metadatos de la Banda 10

Con tal de obtener la temperatura en grados Celsius en lugar de Kelvin, se añade el cero absoluto a la ecuación [3] (aproximadamente -273.15 °C).

Por otro lado, para la estimación de la emisividad superficial (ϵ), necesaria para la obtención de la temperatura de la superficie terrestre (LST), se ha seguido el método propuesto por Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini (2004) que utiliza los valores del índice NDVI. Otros autores proponen el uso de la clasificación de cubiertas del suelo para la asignación de ratios de emisividad para cada clase (Mallick, Singh, Shashtri, Rahman, & Mukherjee, 2012; Weng, Lu, & Schubring, 2004).

Por lo tanto, las Bandas 4 y 5 se han utilizado para la obtención del índice NDVI de acuerdo a la fórmula [4], donde Red (rojo) y NIR (infrarrojo cercano) hacen referencia a las Bandas 4 y 5 del Landsat 8, respectivamente.

Posteriormente, se ha calculado la proporción de vegetación (P_v) siguiendo la fórmula [5], donde $NDVI_{\min}$ y $NDVI_{\max}$ hacen referencia a los valores medios del índice NDVI para la vegetación y el suelo, respectivamente, con valores de 0,2 y 0,5 (Avdan & Jovanovska, 2016).

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad [4]$$

$$P_v = \left(\frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \right)^2 \quad [5]$$

A continuación se ha obtenido la emisividad superficial (ε), necesaria para la recuperación de LST, mediante la fórmula [6]:

$$\varepsilon = \varepsilon_v P_v + \varepsilon_s (1 - P_v) + d\varepsilon \quad [6]$$

Donde:

ε = *Surface Emissivity* = Emisividad superficial

P_v = Proporción de vegetación, obtenida en [5]

ε_v = Emisividad de la vegetación = 0,99

ε_s = Emisividad del suelo = 0,97

$d\varepsilon$ = Término que incluye el efecto de la distribución geométrica de las superficies naturales. Una aproximación a este valor se obtiene de la siguiente expresión [7] propuesta por Sobrino, Jiménez-Muñoz, & Paolini (2004):

$$d\varepsilon = (1 - \varepsilon_s)(1 - P_v)F\varepsilon_v \quad [7]$$

Donde:

F = Factor de forma, asumiendo distintas distribuciones geométricas, se aproxima a = 0,55

P_v = Proporción de vegetación, obtenida en [5]

Finalmente, invirtiendo la Ley de Planck, se puede obtener la temperatura de la superficie terrestre (LST) mediante la siguiente expresión [8]:

$$LST = \frac{BT}{1 + \left[\left(\lambda \frac{BT}{\rho} \right) \ln \varepsilon \right]} \quad [8]$$

Donde:

LST = *Land Surface Temperature* = Temperatura de la superficie terrestre (°C)

λ = Longitud de onda de la Banda 10 (TIRS 1) = 10,8 μm

ε = *Surface emissivity* = Emisividad superficial obtenida en [6]

$\rho = h \frac{c}{s} = 14.388 \mu\text{m K}$

Donde:

h = Constante de Planck = $6,626 \cdot 10^{-34}$ J s

c = Velocidad de la luz = $2,998 \cdot 10^8$ m/s

s = Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

Una vez obtenida la capa ráster con los valores de la temperatura de la superficie terrestre para cada píxel, se extraen los valores medios de LST de los siguientes SPUs: parque forestal, parques y jardines urbanos, y arbolado viario, mediante la combinación con las siguientes capas vectoriales:

- Geolocalización de los árboles viarios, procedente del inventario del arbolado viario obtenido en OpenDataBCN (Figura 4.6)
- Superficie de parques forestales y de parques y jardines urbanos, procedente de la clasificación de los usos del suelo obtenida en CartoBCN (Figura 4.7)

De igual forma, se extraen los valores medios de LST del área circundante de parques forestales (500 m), parques y jardines urbanos (200 m) y árboles viarios (50 m) mediante la creación de buffers alrededor de las capas vectoriales anteriores (Figura 4.8) para poder aplicar la ecuación [1] para el cálculo del indicador de regulación micro-climática presentada al principio de este apartado.

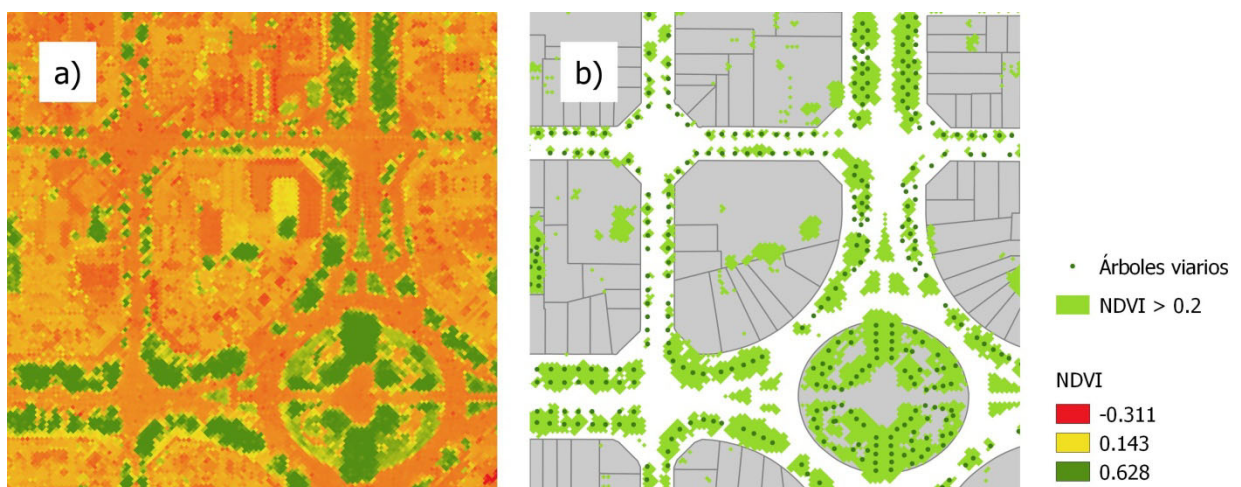


Figura 4.6. Detalle del índice NDVI (a) del cual se extraen los píxeles con valores $>0,2$ y se superponen a la geolocalización de árboles viarios (b)

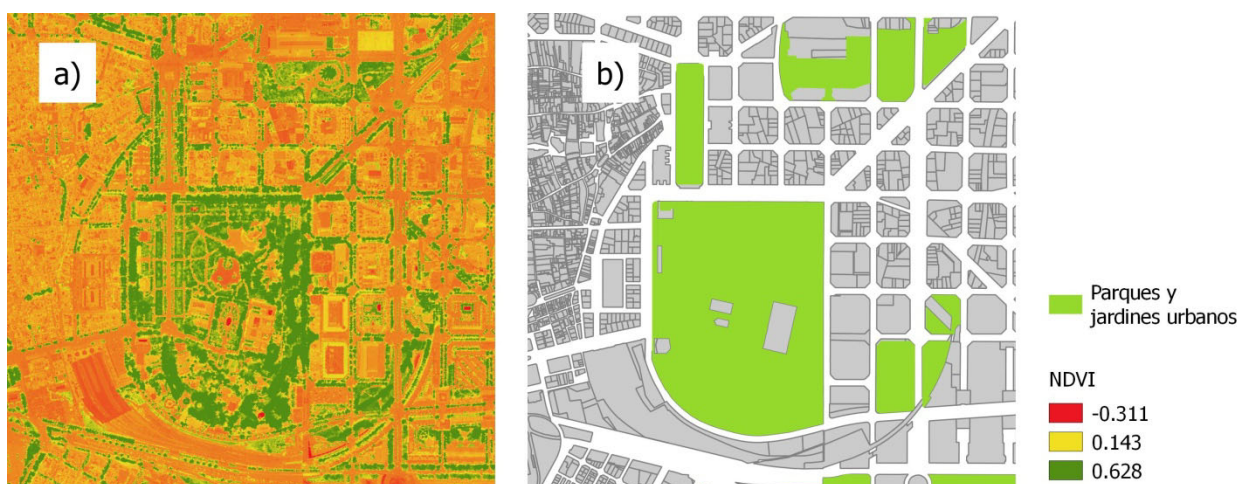


Figura 4.7. Comparación del índice NDVI en parques y jardines urbanos (a) con la clasificación de usos del suelo de parques y jardines urbanos (b)

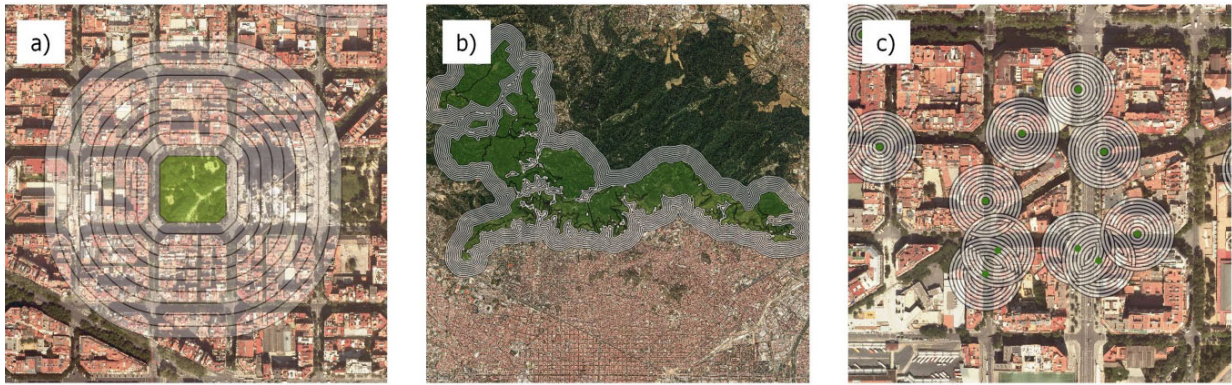


Figura 4.8. Buffers realizados alrededor de a) parques y jardines urbanos, b) parque forestal y c) árboles viarios

4.2.2. Stock de carbono.

El almacenaje de carbono en la biomasa y en el suelo se está convirtiendo en uno de los ES más importantes para la mitigación del cambio climático (Davies et al., 2011). Aunque el stock de carbono almacenado en áreas urbanas es menor que las emisiones de carbono producidas en esa misma área, no deja de tratarse de una cantidad sustancial a tener en cuenta, a veces incluso mayor en zonas residenciales que en suelo agrícola debido a la mayor proporción de vegetación leñosa alta, la cual almacena una mayor cantidad de carbono.

Aun así, hay que tener en cuenta que las estimaciones del stock de carbono llevadas a cabo en distintos lugares del mundo no se pueden extrapolar al caso de estudio actual en la ciudad de Barcelona. Por ejemplo, en América del Norte, donde se ha producido la mayor parte de estos estudios, los patrones de urbanización tienden a la dispersión de zonas residenciales peri-urbanas de baja densidad, lo que se conoce como *'urban sprawl'*, mientras que en Europa la tendencia sigue patrones de densificación de zonas urbanas existentes, hasta el punto de construir sobre jardines y patios domésticos, lo que se conoce como *'backland development'* o *'garden grabbing'*.

Por este motivo es importante estimar y mapear la distribución de los stocks de carbono dentro de las ciudades teniendo en cuenta la heterogeneidad que las caracteriza. A continuación se presenta un método para cuantificar el stock de carbono por encima de la superficie (no se cuantifica el stock de carbono del suelo) adaptando el método propuesto por Davies et al. (2011) que utiliza datos LiDAR (*Light Detection and Ranging*) para clasificar los puntos de vegetación según su altura. Los datos LiDAR, obtenidos en el Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2019), se tratan de nubes de puntos 3D obtenidos mediante un escáner láser aerotransportado (ALS, *Airborne Laser Scanner*) en los que se indican las coordenadas X e Y así como la elevación Z de dichos puntos. Además, pueden contener información adicional, como por ejemplo una clasificación de los puntos en distintas categorías (Tabla 4.5.)

En primer lugar, se realiza un Modelo de la Altura de la Canopia (CHM, *Canopy Height Model*), entendiendo aquí canopia como todos aquellos objetos que no pertenecen al suelo: vegetación, edificios, cableado y torres de transmisión, etc. Para ello, hace falta realizar primero un modelo digital de elevaciones del terreno (DEM, *Digital Elevations Model* o DTM, *Digital Terrain Model*) así como un modelo digital de la superficie (DSM, *Digital Surface Model*). El DEM o DTM se realiza tomando los puntos del suelo (clases 2 y 8), mientras que el DSM utiliza todos los puntos. A continuación, se resta el DTM al DSM para obtener el CHM siguiendo la fórmula [9]:

$$\text{CHM} = \text{DSM} - \text{DEM} \quad [9]$$

Tabla 4.5. Clasificación de los puntos LiDAR

Símbolo	Valor de la clasificación	Descripción
●	0	Nunca clasificado
●	1	No asignado
●	2	Base/suelo
●	3	Vegetación baja
●	4	Vegetación media
●	5	Vegetación alta
●	6	Edificio
●	7	Punto bajo
●	8	Clave de modelo
●	9	Agua
●	10	Ferrocarril
●	11	Superficie de la carretera
●	12	Superponer
●	13	Protector de cable (señal)
●	14	Conductor de cable (fase)
●	15	Torre de transmisión
●	16	Conector de la estructura de cables (aislante)
●	17	Plataforma del puente
●	18	Ruido alto
●	19-63	Reservado
●	64-255	Definido por el usuario

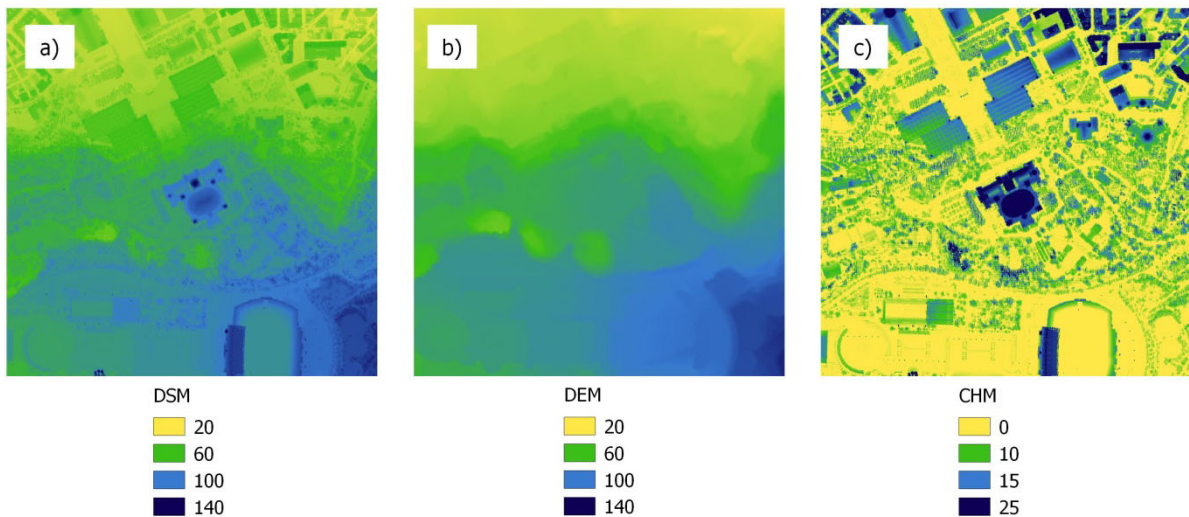


Figura 4.9. Detalle del alzado de a) DSM, b) DEM y c) CHM

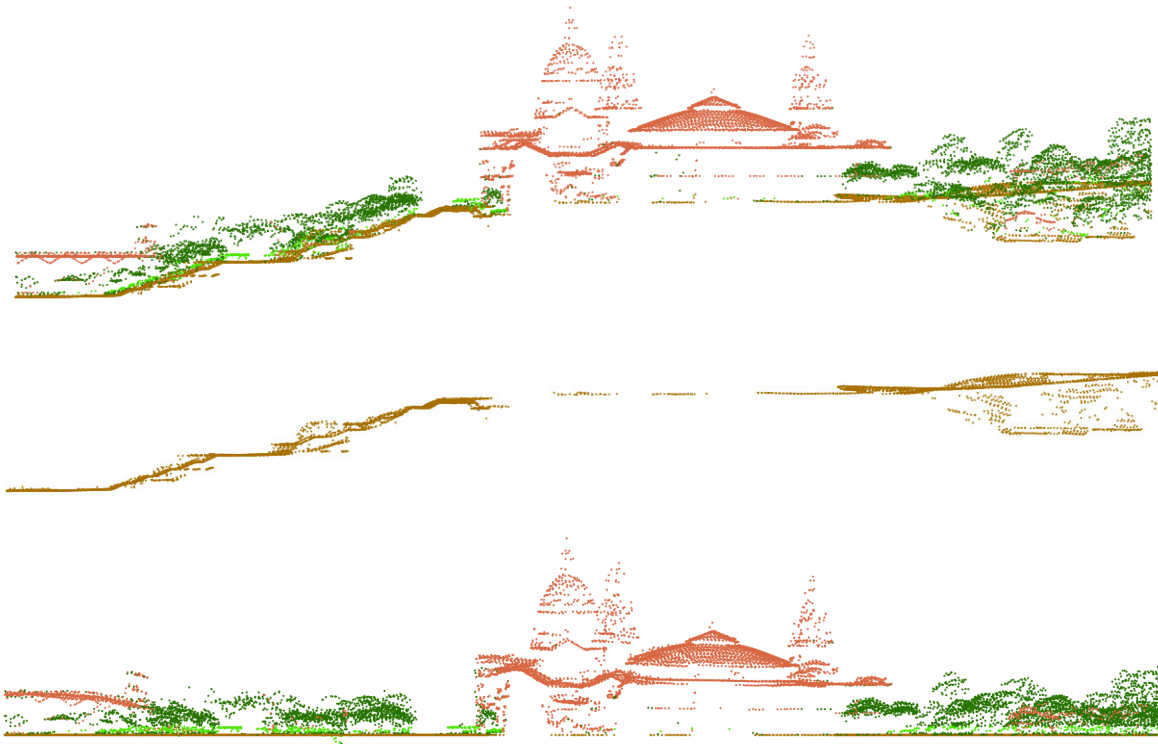


Figura 4.10. Vista 2D de perfil de a) DSM, b) DEM y c) CHM

En la Figura 4.9 se muestra un detalle del alzado del a) DSM, b) DEM y c) CHM en formato ráster. El inconveniente de utilizar este formato es que no se incluye la clasificación de puntos existente en el formato LAS nativo de los archivos LiDAR.

Por este motivo, para realizar el CHM se han utilizado los archivos LAS nativos sin necesidad de rasterizarlos. En la Figura 4.10 se puede observar una sección 2D extraída de la nube de puntos 3D. En el a) DSM se muestran todos los puntos (vegetación, edificios, suelo, etc.) con su cota real sobre el nivel del mar, en el b) DEM sólo se muestran los puntos de terreno (clases 2 y 8) con su cota real y en el c) CHM sólo se muestran los puntos de objetos (vegetación y edificios) sobre los puntos de terreno con cota igual a cero.

A continuación, se seleccionan únicamente los puntos de vegetación del archivo LAS (clases 3, 4 y 5) y se rasterizan, obteniendo así un archivo ráster con tamaño de píxel de 1x1m cuyo valor hace referencia a la altura media de todos los puntos de vegetación dentro de esa superficie.

Una vez obtenido este ráster, se reclasifican los píxeles según su valor en tres categorías distintas:

- a) Vegetación baja: herbáceas y plantas no leñosas ($\leq 1\text{m}$)
- b) Vegetación media: plantas leñosas (1-5m)
- c) Vegetación alta: árboles ($\geq 5\text{m}$)

Se obtiene un nuevo ráster en el que cada píxel tiene uno de los tres valores mencionados anteriormente. A continuación, se multiplica cada píxel ($1\text{m} \times 1\text{m} = 1\text{m}^2$) por el valor del stock de carbono por unidad de superficie obtenidos en la literatura (Tabla 4.6). En el caso de las herbáceas (vegetación $\leq 1\text{m}$) se utiliza el valor propuesto por McPhearson, Kremer, & Hamstead (2013). En el caso de las plantas leñosas (vegetación 1-5m) y árboles (vegetación $\geq 5\text{m}$) se utilizan los valores propuestos por Strohbach & Haase (2012). Puesto que los árboles tienen valores del stock de

carbono distintos en función de si son latifolios, coníferas, mixtos o vegetación de ribera, se calcula la media de estos valores ponderada por el porcentaje de árboles pertenecientes a cada clase en la ciudad de Barcelona, obtenidos del estudio realizado por Chaparro & Terradas (2009). El valor asignado a los bosques de ribera no se ha utilizado ya que en Barcelona este tipo de vegetación es casi inexistente.

Tabla 4.6. Valores del stock de carbono por cobertura del dosel arbóreo (Kg C/m²) para cada tipo de vegetación, según distintos estudios

	Árboles (vegetación alta)		Plantas leñosas (vegetación media)	Herbáceas (vegetación baja)
McPhearson et al. (2013)	7,3-9,25		-	0,18
Davies et al. (2011)	28,06-28,86		6,66-16,03	0,14-0,15
Strohbach & Haase (2012)	Bosque de ribera	9,85	2,42	-
	Latifolios (hoja ancha)	8,00		
	Coníferas	7,32		
	Bosques mixtos	7,67		

Para calcular la proporción de latifolios y coníferas, se han utilizado los árboles que conforman el 81,7% de la población total de árboles de Barcelona (un total de 22 especies) para facilitar la búsqueda manual del tipo de vegetación referente a cada especie (Tabla 4.7). Al 18,3% restante se le ha asignado el valor de los bosques mixtos.

Por lo tanto, el valor del stock de carbono utilizado para los árboles (S_a) es el siguiente [10]:

$$S_a = \frac{0,505 * 8,00 + 0,312 * 7,32 + 0,183 * 7,67}{3} = 7,72 \quad [10]$$

Una vez asignados estos valores a cada categoría de vegetación según su altura, se obtiene un archivo ráster en el que sólo los píxeles referentes a la vegetación tienen el valor del stock de carbono almacenado en esa superficie. Las zonas sin vegetación no tienen valor asociado.

Finalmente, se ha utilizado la capa vectorial con los usos del suelo obtenida en CartoBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019f) para determinar el stock de carbono relativo a las siguientes SPUs:

- a) Parque forestal
- b) Parques y jardines urbanos
- c) Arbolado viario

Tabla 4.7. Árboles más comunes de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009) y clasificación entre latifolios y coníferas (Fuente: Elaboración propia)

Especie	Nº árboles	Porcentaje	Clase
<i>Quercus ilex</i>	313.372	22,1%	Latifolio
<i>Pinus Halepensis</i>	290.525	20,5%	Conífera
<i>Platanus x acerifolia</i>	93.212	6,6%	Latifolio
<i>Pinus Pinea</i>	69.749	4,9%	Conífera
<i>Ailanthus altissima</i>	37.473	2,6%	Latifolio
<i>Cupressus macrocarpa</i>	32.594	2,3%	Conífera
<i>Celtis australis</i>	30.529	2,2%	Latifolio
<i>Rhamnus alaternus</i>	30.398	2,1%	Latifolio
<i>Ligustrum lucidum</i>	28.972	2,0%	Latifolio
<i>Cupressus sempervirens</i>	28.601	2,0%	Conífera
<i>Robinia pseudoacacia</i>	25.694	1,8%	Latifolio
<i>Arbutus unedo</i>	24.172	1,7%	Latifolio
<i>Erica arborea</i>	21.244	1,5%	Conífera
<i>Tipuana tipu</i>	20.518	1,4%	Latifolio
<i>Laurus nobilis</i>	20.408	1,4%	Latifolio
<i>Olea europaea</i>	16.614	1,2%	Latifolio
<i>Phoenix canariensis</i>	15.716	1,1%	Latifolio
<i>Quercus cerrroides</i>	14.438	1,0%	Latifolio
<i>Melia azedarach</i>	13.583	1,0%	Latifolio
<i>Ulmus pumila</i>	11.132	0,8%	Latifolio
<i>Quercus pubescens</i>	10.826	0,8%	Latifolio
<i>Populus alba</i>	10.217	0,7%	Latifolio
Total	1.159.987	81,7%	

717.274	50,5%	Latifolios
442.713	31,2%	Coníferas
259.836	18,3%	Mixtos

4.2.3. Secuestro de carbono.

Para el cálculo del carbono secuestrado anualmente por la vegetación, se sigue un procedimiento similar al del cálculo del stock de carbono presentado en el apartado anterior. Una vez clasificada la vegetación en función de su altura a partir de los datos LiDAR, se utiliza sólo la categoría relativa al dosel arbóreo, sin utilizar las categorías de herbáceas y plantas leñosas, ya que no se han encontrado valores para estas categorías en la literatura revisada (Tabla 4.8).

Nowak & Rowntree (1991) proponen distintos valores del secuestro anual de carbono por unidad de superficie del dosel arbóreo en función del tipo de población de árboles existentes. Estos tipos de población hacen referencia a la edad de los árboles, ya que los árboles jóvenes tienen mayor capacidad para absorber y acumular carbono que los árboles maduros (Chaparro & Terradas, 2009). La edad de los árboles se deriva del diámetro del tronco a 1,3m de altura (DBH, *Diameter at Breast Height*).

Tabla 4.8. Valores del secuestro anual de carbono por cobertura del dosel arbóreo (Kg C/m²·año) según distintos estudios

	Árboles (vegetación alta)	
(McPhearson et al., 2013)	0,120	
(Baró, Haase, Gómez-Baggethun, & Frantzeskaki, 2015)	0,277	
(Rowntree & Nowak, 1991)	Población Tipo 1	0,179
	Población Tipo 2	0,019
	Población Tipo 3	0,037
	Media	0,082

Para saber el tipo de población de árboles existente en Barcelona, se utiliza la distribución de la población de árboles según su DBH (Tabla 4.9) y se compara con las distribuciones propuestas por Nowak & Rowntree (1991), de donde se puede determinar que los árboles de Barcelona se tratan de una población joven de Tipo 1 (Tabla 4.10.)

Por lo tanto, se multiplica el valor del secuestro anual de carbono por unidad de superficie del dosel arbóreo por el área relativa a la cobertura del dosel arbóreo (vegetación $\geq 5\text{m}$) obtenida en el apartado anterior, obteniendo así un nuevo archivo ráster en el que sólo los píxeles referentes a la vegetación tienen el valor del secuestro anual de carbono por unidad de superficie. Las zonas sin vegetación no tienen valor asociado. También se convierte el secuestro de carbono a secuestro de CO₂ equivalente mediante el factor de conversión 1 g C = 3,67 g CO₂eq (Baró et al., 2015).

Finalmente, se ha utilizado la capa vectorial con los usos del suelo obtenida en CartoBCN (Ajuntament de Barcelona, 2019f) para determinar el secuestro de carbono/CO₂ relativo a las siguientes SPUs:

- a) Parque forestal
- b) Parques y jardines urbanos
- c) Arbolado viario

Tabla 4.9. Población de árboles (%) según diámetro (DBH = diámetro del tronco a 1,30m) de la ciudad de Barcelona (Chaparro & Terradas, 2009) y reclasificación según los diámetros utilizados por Nowak & Rowntree (1991) (Fuente: Elaboración propia)

Diámetro (DBH = diámetro del tronco a 1,3m)							
<7,7cm	7,7-15,2	15,3-22,9	23-30,5	30,6-38,1	38,2-45,7	45,7-53,3	>53,3
13,5%	34,5%	22,6%	15,5%	6,3%	3,7%	1,7%	2%
<15cm		16-30cm		31-45cm		>46cm	
48%		38,1%		10%		3,7%	

Tabla 4.10. Tipos de población de árboles según distribución de la población perteneciente a cada categoría de DBH

	Diámetro (DBH = diámetro del tronco a 1,3m)					
	<15cm	16-30cm	31-45cm	46-60cm	61-76cm	>76cm
Población Tipo 1	42%	27%	14%	10%	6%	1%
Población Tipo 2	21%	29%	26%	8%	8%	8%
Población Tipo 3	23%	15%	20%	16%	18%	8%
Población Tipo 4	29%	24%	20%	11%	11%	8%

4.2.4. Percepción de los espacios verdes.

Este indicador hace referencia al único ES cultural evaluado en este estudio. Los ES culturales son ‘los beneficios no-materiales que las personas obtienen de los ecosistemas mediante enriquecimiento espiritual, desarrollo cognitivo, reflexión y experiencias estéticas y de entretenimiento’ (MA, 2005).

En comparación con otras categorías de ES (de regulación, aprovisionamiento y soporte), los ES culturales han sido mucho menos estudiados. Esto se puede deber a la intangibilidad e inconmensurabilidad del valor de muchos ES culturales (espirituales, religiosos, etc.) y a la necesidad de involucrar a todos los actores implicados, aunque algunos métodos (preferencia revelada, voluntad de pago, precios de alquiler, etc.) se han utilizado para valorar ES culturales como el turismo o la estética del paisaje (Hernández-Morcillo et al., 2013).

Aunque la percepción de los espacios verdes no es un servicio socio-cultural en sí mismo, el indicador propuesto por Laforteza & Giannico (2017) se puede utilizar para predecir la forma en que la población percibe el suministro de ES por parte de los espacios verdes de una ciudad, estrechamente relacionado con el ES de apreciación e inspiración estética.

De acuerdo a varios autores, “cuanto mayor volumen de árboles (dosel arbóreo y biomasa) y matorrales en comparación al volumen de edificios existente en zonas verdes y a su alrededor, mayor la sensación de ‘escapar’ del contexto urbano, lo que se traduce como un efecto positivo sobre la percepción del bienestar de las personas” (Laforteza & Giannico, 2017).

El indicador desarrollado en su estudio se llama Diferencia Normalizada del Volumen Verde-Edificios (NDGB, *Normalized Difference Green-Building volume*) y considera la distribución espacial volumétrica de los espacios verdes en relación a las áreas construidas a partir de datos LiDAR. El indicador NDGB combina:

- Diferencia en los valores de reflectancia para distinguir elementos naturales (espacios verdes, superficies permeables, etc.) de elementos artificiales (edificios, carreteras, superficies impermeables, etc.) utilizando el índice NDVI [ecuación 11], ya obtenido durante el cálculo del indicador GCI en el apartado anterior.
- Diferencia en el volumen (normalizado) de la nube de puntos asociado a vegetación y edificios.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad [11]$$

Para calcular la diferencia en el volumen de la vegetación respecto de los edificios, primero se realiza un Modelo de la Altura del Dosel arbóreo (CHM, *Canopy Height Model*) y un Modelo de la Altura de los Edificios (BHM, *Building Height Model*), respectivamente, a partir de la nube de puntos 3D de los archivos LiDAR, filtrando por las clases 3, 4 y 5 para el CHM, y por la clase 6 para el BHM.

A los archivos obtenidos en formato ráster (NDVI, CHM y BHM) se les aplica una operación de promedio local en las que cada celda, de dimensiones i y j , es reemplazada por la media de los valores de las celdas inmediatamente vecinas (N), con dimensiones k y l , siendo M el número total de celdas vecinas. Además, BHM y CHM se normalizan entre 0 y 1 introduciendo en el denominador el valor máximo de las celdas vecinas N [ecuaciones 12, 13 y 14].

$$NDVI_{land}[i, j] = \frac{1}{M} \sum_{(k, l) \in N} NDVI[k, l] \quad [12]$$

$$BHM_{land}[i, j] = \frac{\frac{1}{M} \sum_{(k, l) \in N} BHM[k, l]}{\max_{(k, l) \in N} BHM[k, l]} \quad [13]$$

$$CHM_{land}[i, j] = \frac{\frac{1}{M} \sum_{(k, l) \in N} CHM[k, l]}{\max_{(k, l) \in N} CHM[k, l]} \quad [14]$$

Finalmente, el indicador NDGB se calcula multiplicando $NDVI_{land}$ por la diferencia normalizada entre CHM_{land} y BHM_{land} de acuerdo a la ecuación [15]. Este indicador también está acotado entre 0 (no hay espacios verdes) y 1 (no hay elementos artificiales):

$$NDGB = NDVI_{land} \frac{CHM_{land} - BHM_{land}}{CHM_{land} + BHM_{land}} \quad [15]$$

Al igual que en el resto de indicadores desarrollados, se combina el archivo ráster obtenido en [15] con las capas vectoriales obtenidas en CartoBcn (Ajuntament de Barcelona, 2019f) para determinar el valor de NDGB relativo a las siguientes SPUs:

- a) Parque forestal
- b) Parques y jardines urbanos
- c) Arbolado viario

5. Descripción y análisis de resultados

5.1. Regulación micro-climática

El mapa de la Figura 5.1 muestra los valores de LST para toda Barcelona (en °C). A simple vista se puede observar que las temperaturas más bajas hacen referencia al mar, seguidas del parque forestal de la Sierra de Collserola. También se pueden identificar los parques urbanos más grandes de la ciudad, como todos los que se encuentran en la montaña de Montjuïc, el Parc de la Ciutadella, el Parc del Guinardó y el Parc Güell. Se puede incluso identificar el eje de la Avenida Diagonal debido a la vegetación que tiene. En cuanto a las temperaturas más elevadas, éstas se encuentran en las zonas industriales de la Zona Franca y en los Polígonos Industriales de Monstolís y del Besós, ambos en el barrio del Bon Pastor.

Para determinar el valor del indicador GCI se extraen los valores de LST de las siguientes SPUs, así como el valor medio de LST de los buffers a su alrededor:

- Arbolado viario (buffer = 50m)
- Parques y jardines urbanos (buffer = 200m)
- Parque forestal (buffer = 500m)

Se puede observar que la SPU 'parque forestal' es la que presenta un GCI más elevado (Tabla 5.1).

Tabla 5.1. Indicador GCI de las distintas SPUs analizadas, obtenido de la diferencia entre la media de LST dentro del SPU y su área de influencia (buffer)

SPU	LST (°C)	LST _{buffer} (°C)	GCI (°C)
Árbolado viario	31,75	31,83	0,08
Parques y jardines urbanos	31,56	31,62	0,06
Parque forestal	28,17	29,14	0,97

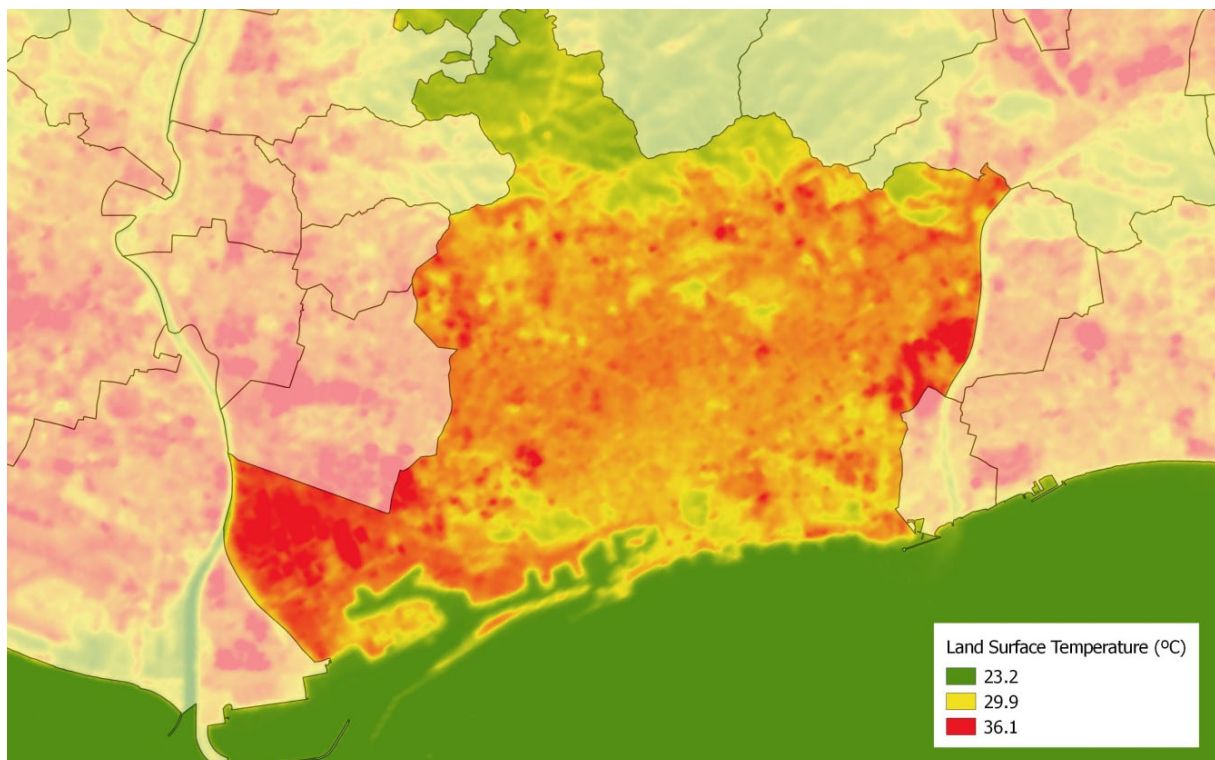


Figura 5.1. Temperatura de la superficie terrestre (LST) en °C

Además, para determinar el gradiente de temperatura alrededor de las SPUs, se extraen los valores medios de LST de los anillos concéntricos alrededor de cada SPU (10 anillos de 5m alrededor de árboles viarios, 10 anillos de 20m alrededor de parques y jardines urbanos, y 10 anillos de 50m alrededor del parque forestal) y se muestran en función de la distancia al margen del SPU en concreto. Las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4 muestran los gradientes para los SPUs del arbolado viario, parques y jardines urbanos, y parque forestal, respectivamente.

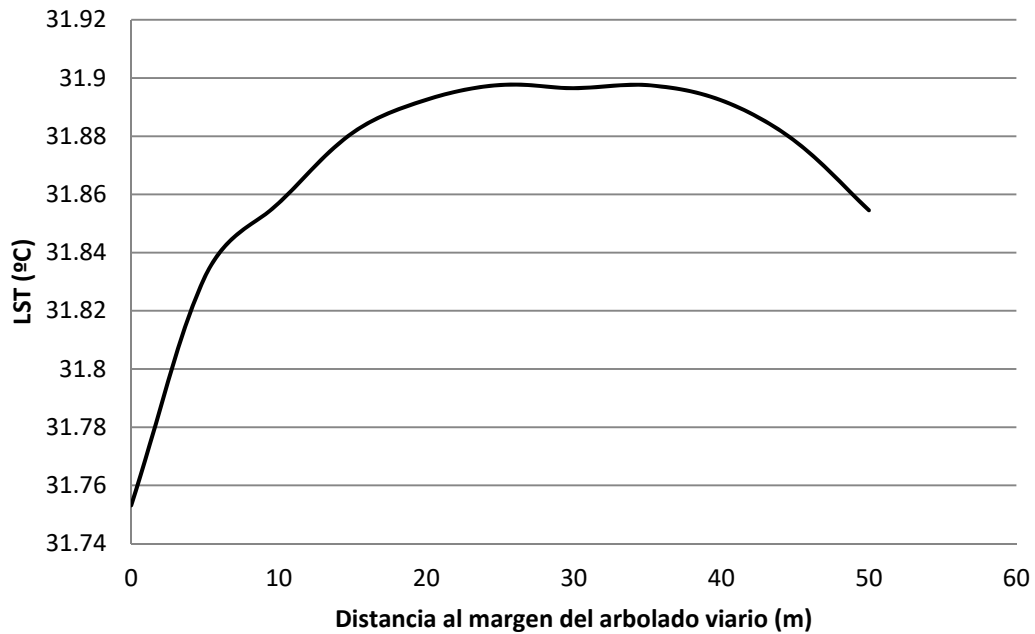


Figura 5.2. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen del arbolado viario

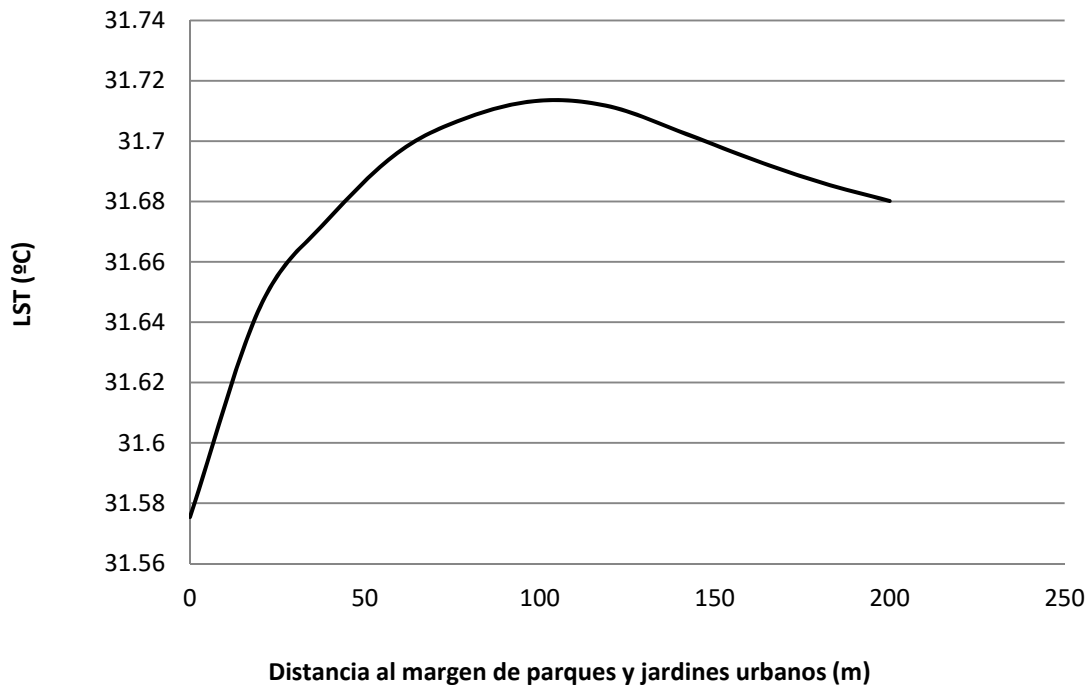


Figura 5.3. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen de parques y jardines urbanos

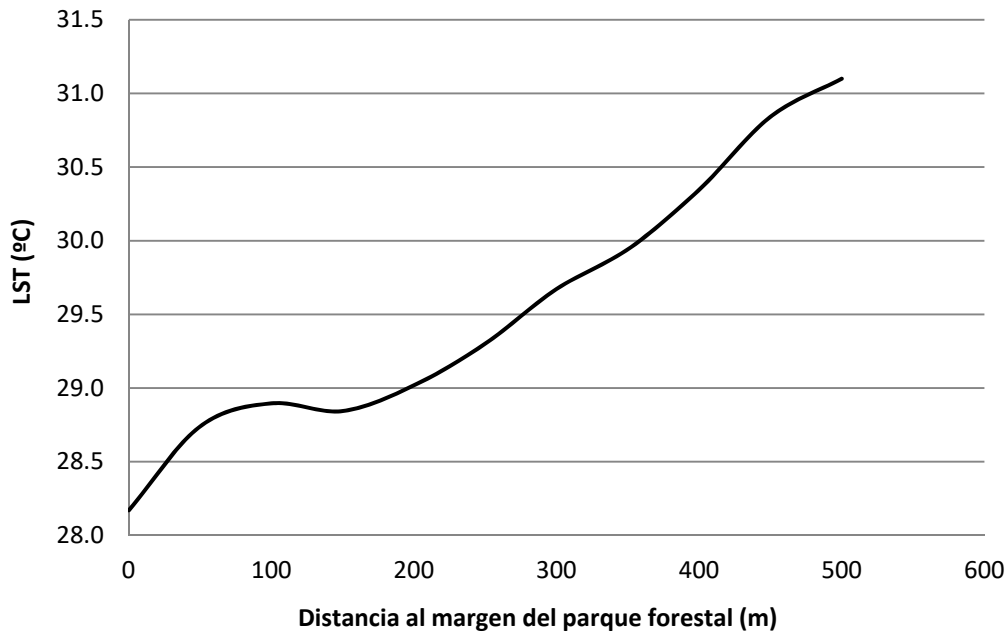


Figura 5.4. LST (°C) en función de la distancia (m) al margen del parque forestal

En el caso de los parques y jardines urbanos, se puede observar un ligero aumento de la temperatura (unos 0,14 °C) en los 100 primeros metros alrededor del parque, mientras que de los 100 a los 200 metros se vuelve a producir un pequeño descenso de la temperatura. Esto se puede deber a que los anillos concéntricos de los parques y jardines, en muchos casos, intersecan con otros parques y jardines próximos que se encuentran a menos de 200m de distancia, por lo que en muchos casos la temperatura de los anillos concéntricos se ve afectada por la temperatura de parques y jardines próximos (Figura 5.5).

En el caso del parque forestal la diferencia de temperatura es más acentuada. Mientras en el interior del parque forestal encontramos una temperatura media de 28,17 °C, la temperatura media a 500 metros de distancia llega a los 31,1 °C. Aun así, esta diferencia podría ser mucho mayor si se tuvieran en cuenta los límites físicos del Parque Natural de Collserola y no la superficie del parque forestal dentro de los límites municipales de Barcelona, puesto que el Parque Natural también ocupa superficie de otros municipios (principalmente de Sant Cugat del Vallès y Cerdanyola del Vallès al norte, pero también de varios municipios del Baix Llobregat al oeste) (Figura 5.6).

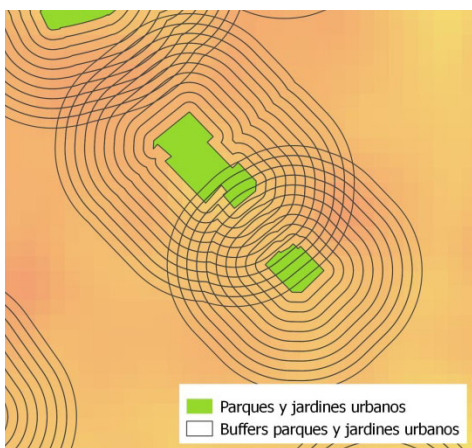


Figura 5.5. Áreas de influencia de parques y jardines urbanos (buffer = 200m) que intersecan con otros parques y jardines próximos

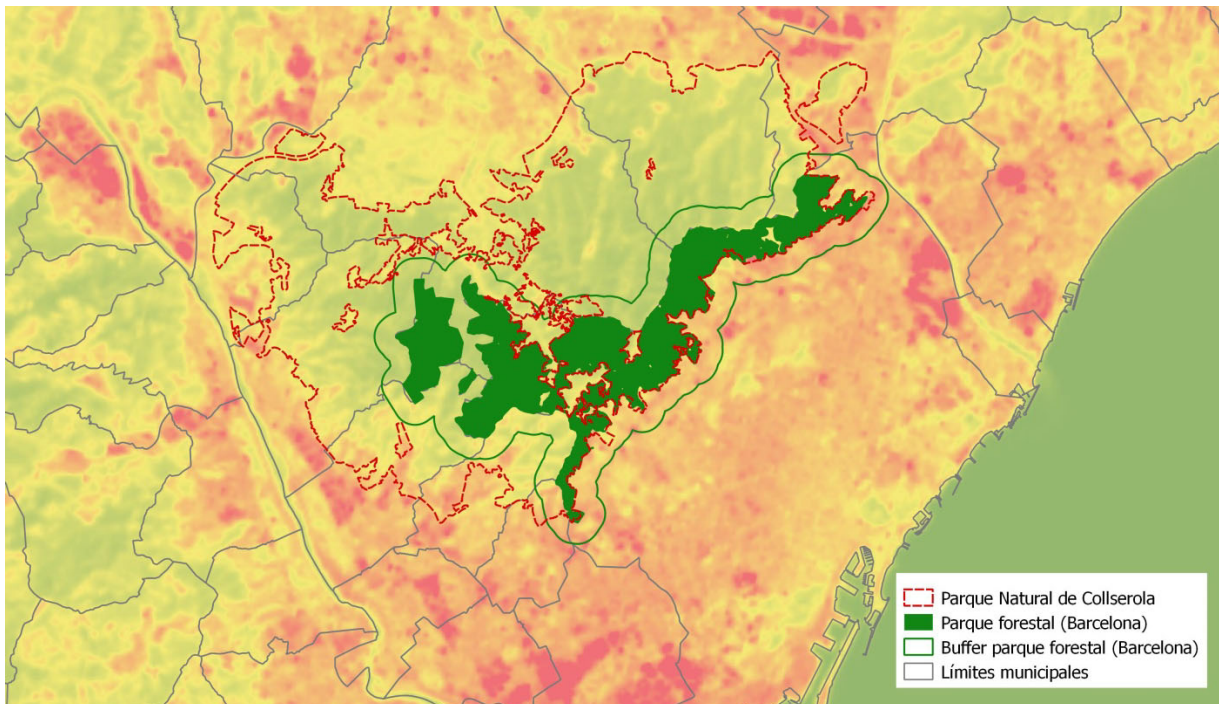


Figura 5.6. Límites del Parque Natural de Collserola y comparación con los límites del parque forestal de Barcelona y su área de influencia (buffer = 500m)

5.2. Stock de carbono

Siguiendo el método presentado en el capítulo anterior, se deriva que el total de carbono almacenado en la vegetación de Barcelona es de 173.820 toneladas de C, distribuidas espacialmente de acuerdo al mapa de la Figura 5.7. Se puede observar que la mayor proporción de carbono almacenado se encuentra en el Parque Natural de Collserola. También se identifican los mayores parques de Barcelona: los de la montaña de Montjuïc, el Parc de la Ciutadella, el Parc del Guinardó, y el Parc Güell, entre otros.

La Figura 5.8 muestra el detalle de esta distribución espacial en las SPUs de a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario. Por la aportación relativa al stock de carbono según la categoría de vegetación (alta, media o baja), se puede diferenciar que la vegetación en las calles de Barcelona está formada principalmente por árboles (vegetación >5m), siendo el Parque Natural de Collserola el lugar donde también se pueden encontrar plantas herbáceas (vegetación <1m) y leñosas (vegetación entre 1 y 5m).

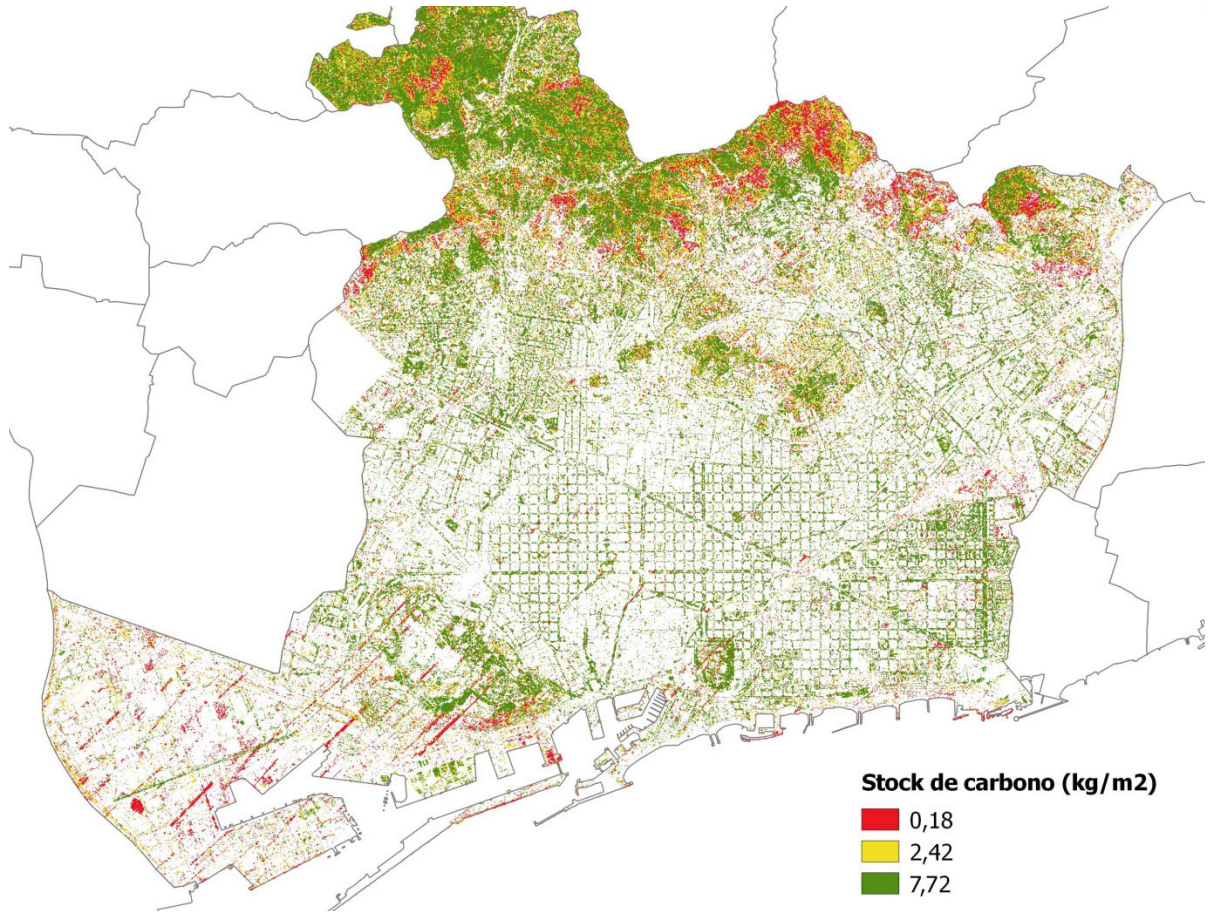


Figura 5.7. Distribución espacial del stock de carbono en la ciudad de Barcelona (kg C/m²)

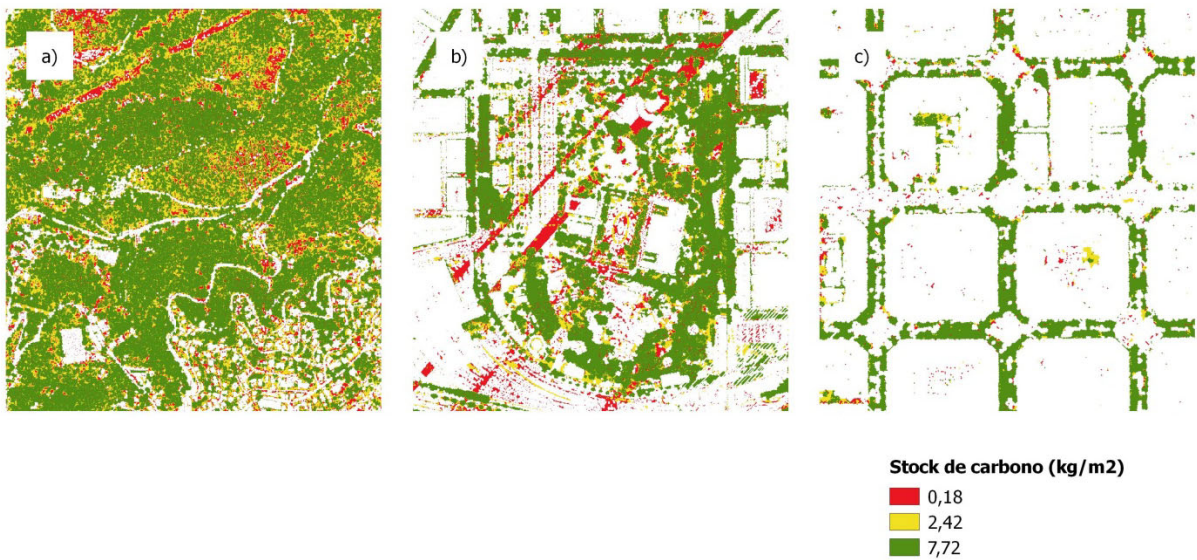


Figura 5.8. Detalle de la distribución espacial del stock de carbono según las SPUs: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

La Tabla 5.2 muestra la distribución del stock de carbono en función de la SPU analizada. Como se podía deducir del mapa de distribución del stock de carbono de la Figura 5.7, el mayor stock de carbono se encuentra almacenado en el parque forestal (Parque Natural de Collserola), aunque casi igualado por el stock de carbono almacenado por el arbolado viario. El verde privado, vegetación baja no incluida en el inventario de arbolado viario, etc. se han incluido en la categoría “otros”, con una contribución al stock de carbono similar a la de los parques y jardines urbanos.

Tabla 5.2. Stock de carbono de las SPUs analizadas (en toneladas métricas)

SPU	Stock de carbono (t C)
Árboles viarios	56.551,65
Parques y jardines urbanos	31.391,97
Parque forestal	57.279,24
Otros	28.597,43
Total Barcelona	173.820,29

5.3. Secuestro de carbono

De acuerdo al método presentado en el capítulo anterior, el carbono secuestrado anualmente por los árboles de Barcelona (vegetación >5m), tanto árboles viarios como del parque forestal y parques y jardines urbanos, representa un total de 3.526 t C/año. De forma parecida que en el caso del stock de carbono, la mayor proporción de secuestro de carbono se produce en el Parque Natural de Collserola (Figura 5.9), aunque en este caso la vegetación baja y media no influyen (Figura 5.10).

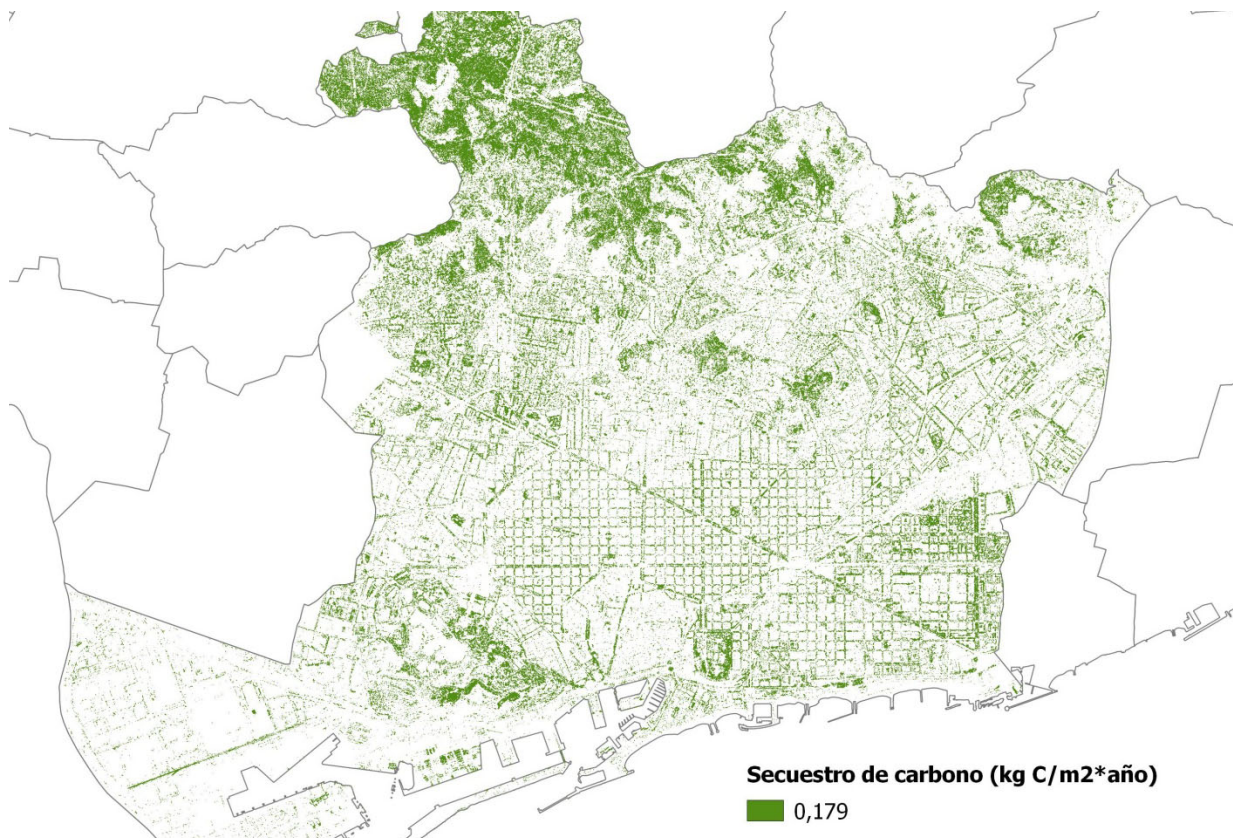


Figura 5.9. Distribución espacial del secuestro de carbono en la ciudad de Barcelona (kg C/m²*año)

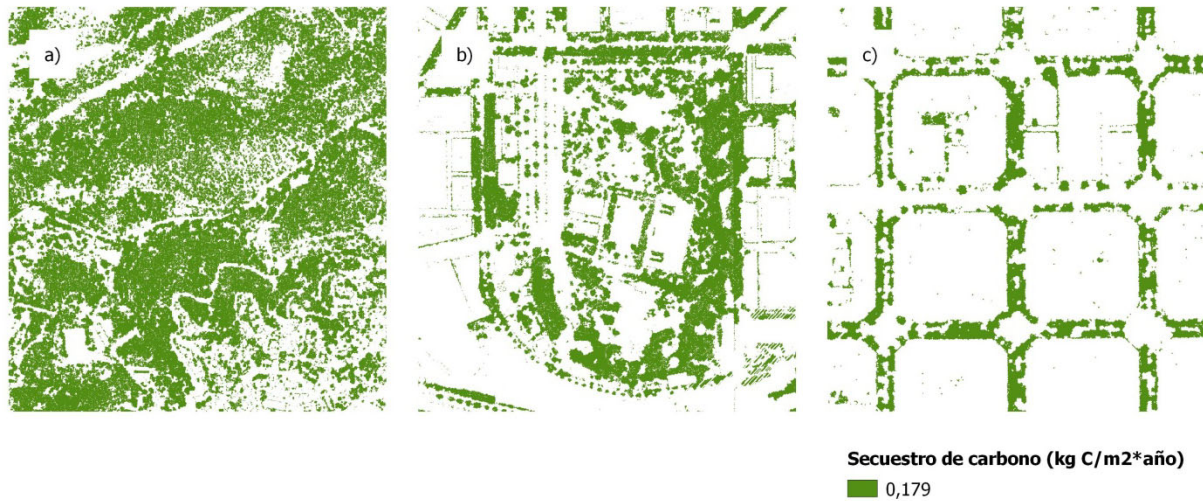


Figura 5.10. Detalle de la distribución espacial del secuestro de carbono según las SPUs: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

La Tabla 5.3 muestra la distribución del secuestro de carbono según la SPU analizada: la mayor aportación al secuestro de carbono es la producida por el arbolado viario, seguida de la del parque forestal y, en menor medida, de los parques y jardines urbanos.

Teniendo en cuenta que durante el año 2017 se produjo una emisión de 3.539.241 toneladas de CO₂ (calculado a partir de las emisiones de CO₂ por habitante durante 2017 (Departament d'Estadística i Difusió de Dades, 2018)), el secuestro de dióxido de carbono representa tan sólo el 0,37% del total de emisiones, o lo que es lo mismo, el secuestro anual de dióxido de carbono es equivalente a la cantidad de CO₂ emitida en 1,33 días.

Tabla 5.3. Secuestro de carbono de las SPUs analizadas (en t C/año y t CO₂eq/año)

SPU	Secuestro de carbono (t C/año)	Secuestro de carbono (t CO ₂ eq/año)
Árboles viarios	1.238,37	4.544,82
Parques y jardines urbanos	654,46	2.401,87
Parque forestal	1.132,50	4.156,28
Otros	501,37	1.840,03
Total Barcelona	3.526,70	12.943

5.4. Percepción de los espacios verdes

La distribución de la percepción de los espacios verdes, medida mediante la diferencia de volumen de vegetación respecto de espacios construidos ponderada por el índice de cobertura vegetal NDVI, se puede observar en el mapa de la Figura 5.11. El Parque Natural de Collserola presenta los valores de NDGB más elevados, seguido de Montjuïc y de los principales parques municipales: Parc de la Ciutadella, Parc del Guinardó, Parc Güell, Jardins del Turó del Putxet, Parc de la Creueta del Coll, Parc del Turó de la Peira, Parc de Pedralbes, etc. Las zonas residenciales de baja densidad presentan valores medios de NDGB, mientras que los valores más bajos los encontramos en los barrios más compactos (cascos antiguos). El Eixample muestra valores muy bajos en el centro de las manzanas, mientras que la presencia de árboles viarios altos supone valores de NDGB relativamente elevados en las calles (ver detalles de la Figura 5.12).

Los valores medios de NDGB en función de la SPU analizada corroboran la información que se puede extraer visualmente a partir del mapa de la Figura 5.11: la media más alta se encuentra en el parque forestal (Parque Natural de Collserola), seguida de los parques y jardines urbanos, y finalmente, el arbolado viario.

Tabla 5.4. Valor medio del índice NDGB de las SPUs analizadas

SPU	NDGB
Árboles viarios	0,148
Parques y jardines urbanos	0,173
Parque forestal	0,449
Media Barcelona	0,076

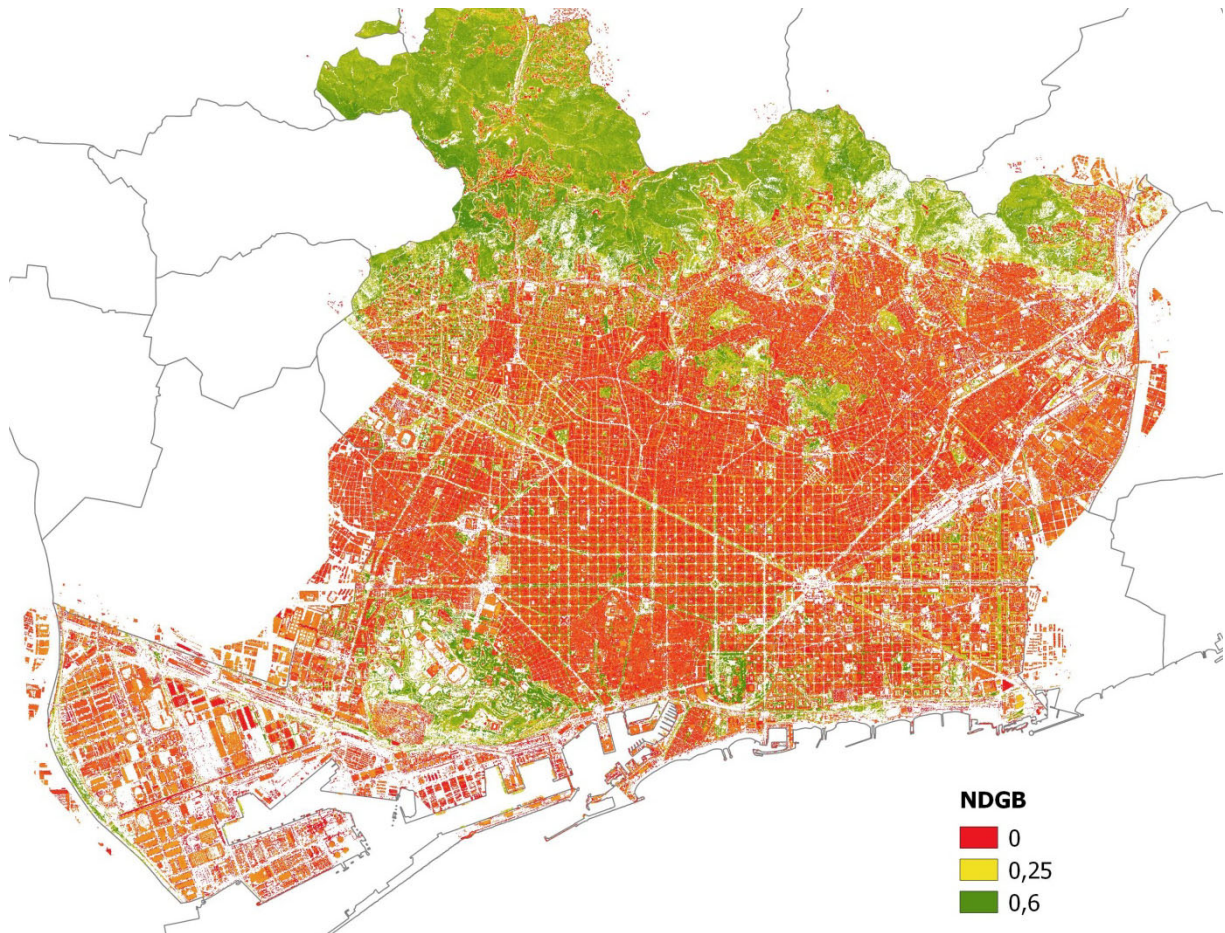


Figura 5.11. Valores del índice NDGB

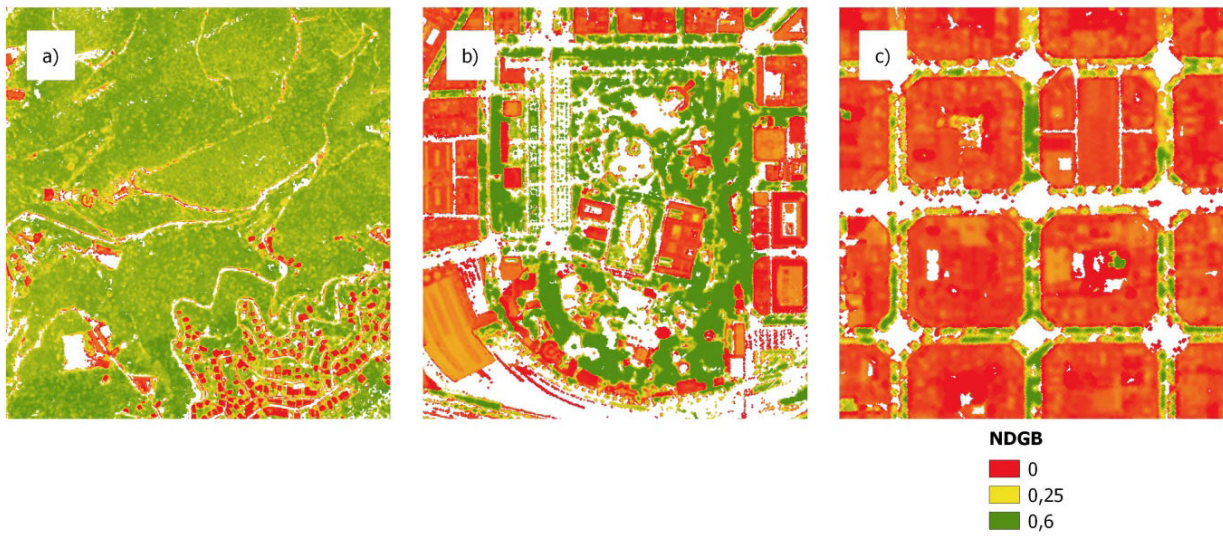


Figura 5.12. Detalle de los valores del índice NDGB en las SPU analizadas: a) parque forestal, b) parques y jardines urbanos, y c) arbolado viario

5.5. Relación entre indicadores

Finalmente, se calculan los valores (medios, en el caso de la LST y del índice NDGB, y totales en el caso del stock y el secuestro de carbono) de cada barrio, para posteriormente determinar si existe alguna relación entre ellos.

En cuanto a la LST, se puede observar que las temperaturas más elevadas hacen referencia a los barrios de la Zona Franca y del Bon Pastor, debido a las zonas industriales presentes en estos barrios, mientras que las temperaturas más reducidas las encontramos en los barrios próximos al litoral y a la Sierra de Collserola (Figura 5.13).

En el caso del stock y del secuestro de carbono (Figuras 5.14 y 5.15, respectivamente), los barrios con valores más altos son los próximos a la Sierra de Collserola, en especial Vallvidrera, Tibidabo i les Planes, por su gran extensión sobre el parque natural. En las zonas residenciales compactas, (Eixample, cascos antiguos, etc.) los valores de stock y secuestro de carbono están muy influenciados por la superficie total de los barrios, siendo los barrios más pequeños los que menos aportación al stock y secuestro de carbono suministran.

En cuanto al índice NDGB (Figura 5.16), los valores más bajos los encontramos en la Zona Franca, por la presencia reducida de vegetación, así como en los barrios más compactos, como son los cascos antiguos de la Vila de Gràcia, Sants, el Clot, el Raval, el Gòtic, etc. Los valores más altos se encuentran en los barrios próximos a la Sierra de Collserola, así como en Montjuïc y las zonas residenciales de baja densidad de Sarrià y Pedralbes.

Adicionalmente, para determinar si el suministro de ES en los distintos barrios influye en el precio de alquiler, se comparan los valores de los indicadores mencionados anteriormente con los valores medios del precio de alquiler de cada barrio presentados en el apartado 4.1. *Contexto*.

La Figura 5.17 muestra la relación entre estos indicadores. En ella se puede observar que los indicadores del stock de carbono y del secuestro de carbono tienen una relación casi proporcional, siendo la única diferencia la aportación al stock de carbono producida por la vegetación media y baja, ya que esta vegetación no influye en el cálculo del secuestro de carbono.

También se puede observar un cierto patrón de proporcionalidad entre el índice NDGB y los indicadores del stock y secuestro de carbono, donde los valores de NDGB más bajos se concentran en aquellos barrios con menor contribución al stock y secuestro de carbono.

En cuanto a la LST media de cada barrio, se observa que los valores más altos de temperatura se encuentran en aquellos barrios con menor contribución al stock y secuestro de carbono y con un índice NDGB más bajo (relación inversamente proporcional).

Finalmente, para determinar si el suministro de ES en los distintos barrios influye en el precio medio de alquiler, observamos que no hay una relación clara (directa o inversamente proporcional) respecto al resto de indicadores, aunque se puede observar que los alquileres más bajos hacen referencia a aquellos barrios con menor stock y secuestro de carbono y con valores del índice NDGB más bajos, en su mayoría.

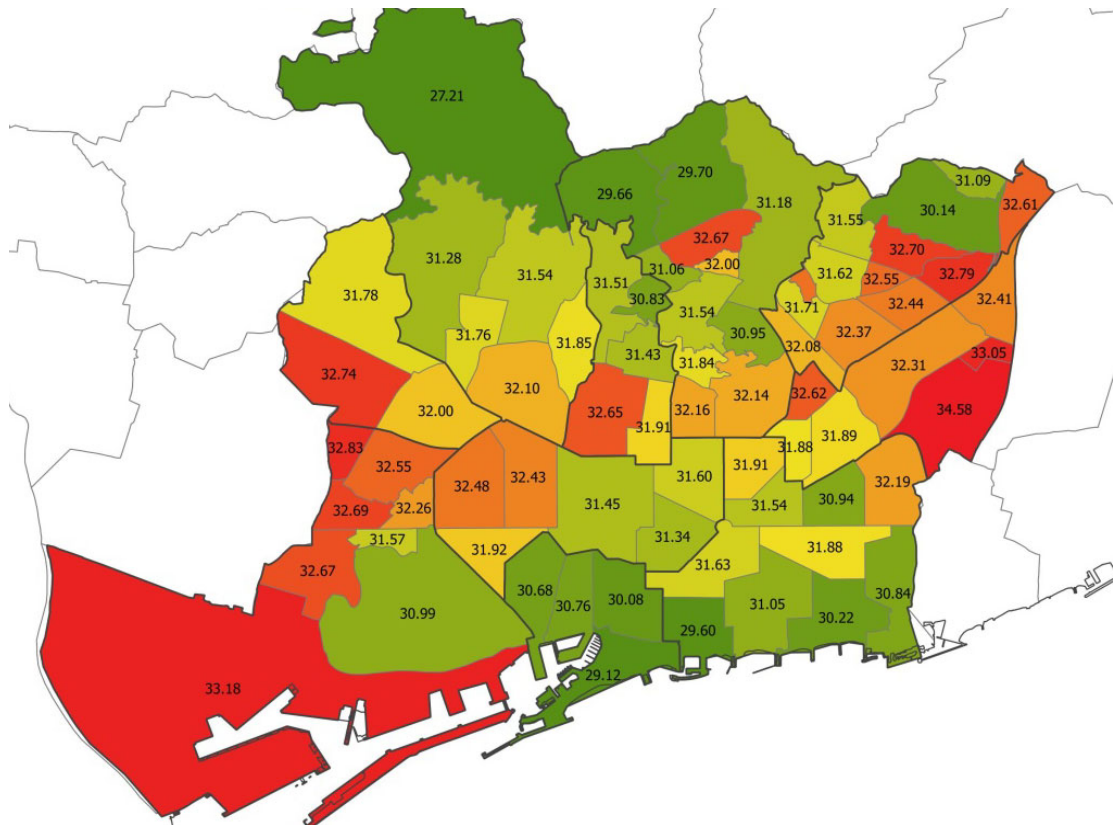


Figura 5.13. Valor medio de LST por barrios (°C)

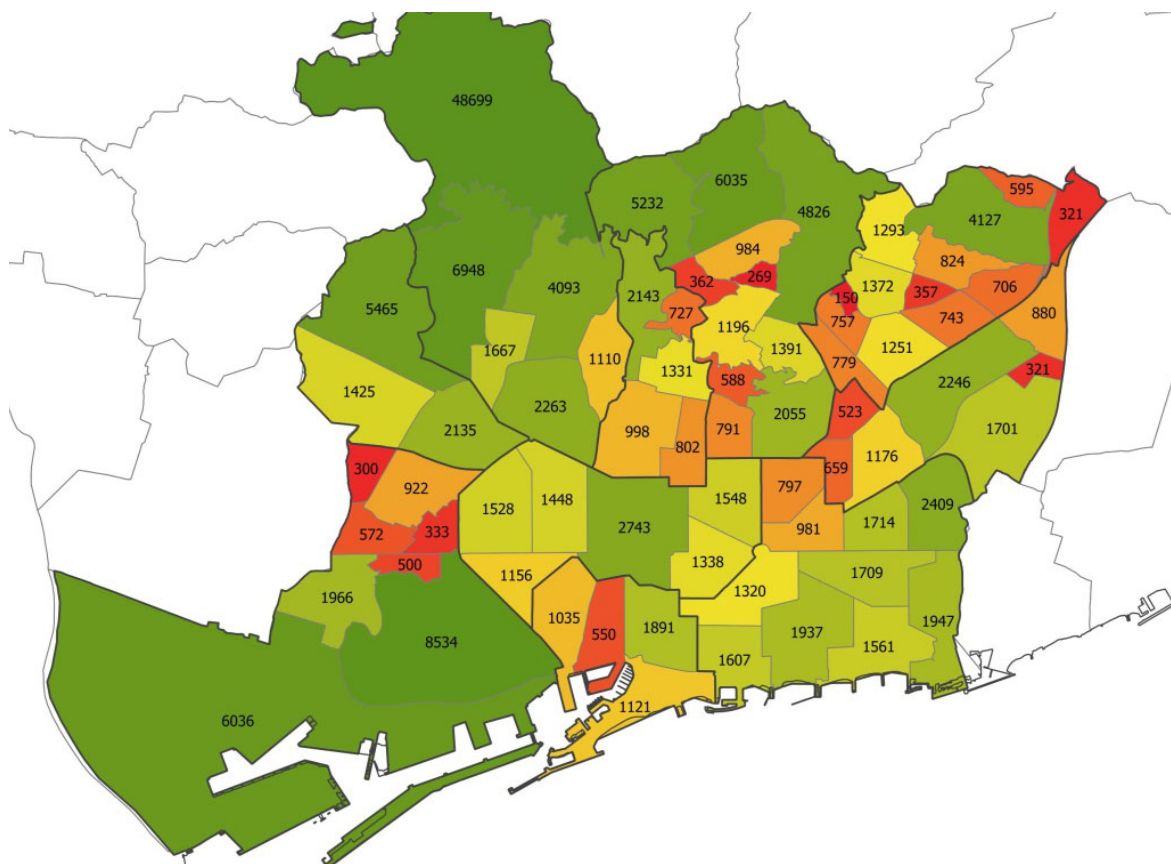


Figura 5.14. Stock de carbono por barrios (t C)

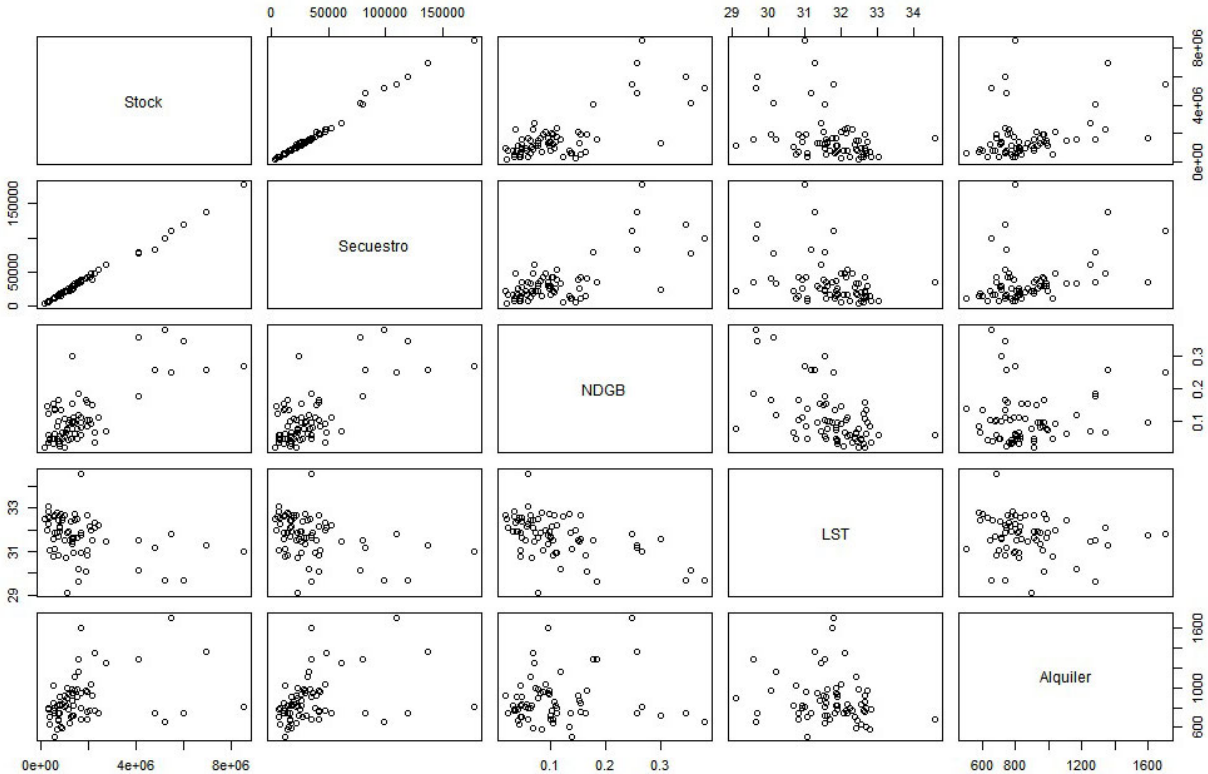


Figura 5.17. Relación entre indicadores

6. Discusión de resultados

En este apartado se realiza una comparación de los resultados obtenidos en este estudio con aquellos obtenidos en estudios similares en la misma área de estudio, presentados en la revisión bibliográfica del apartado 3. *Estado del arte*.

Sólo se han podido comparar de forma cuantitativa aquellos indicadores para los cuales existe un cálculo en la literatura existente con el mismo método de valoración y con las mismas unidades biofísicas. Se trata de los indicadores de stock y secuestro de carbono, los cuales han sido cuantificados en los estudios realizados por los investigadores/as del CREAM Chaparro & Terradas (2009). En el caso del stock de carbono, también se encuentra cuantificado y mapeado en la cartografía digital elaborada por CREAM et al. (2016) (Figura 5.18). En el caso del secuestro de carbono, también ha sido cuantificado en el estudio de Baró et al. (2014).

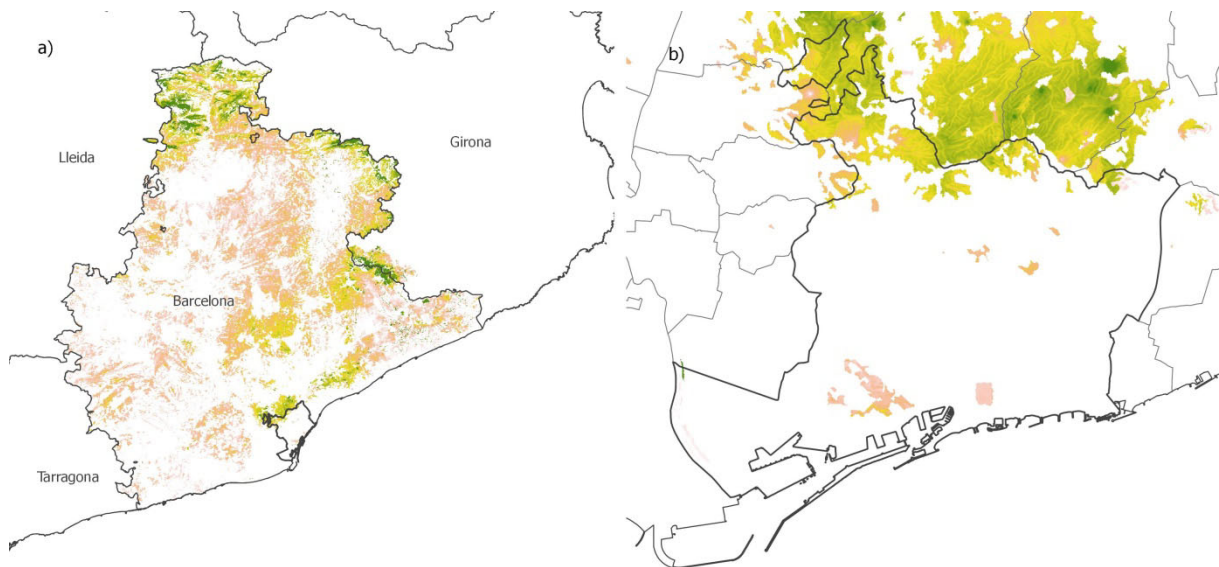


Figura 5.18. Stock de carbono almacenado en el estrato arbóreo de la provincia de Barcelona (a) según la cartografía digital elaborada por CREAM et al. (2016) y detalle de la ciudad de Barcelona (b)

La Tabla 6.1 muestra la comparación de los resultados obtenidos en el estudio actual con los obtenidos en los estudios mencionados.

De esta comparación se puede deducir que, aunque el stock de carbono obtenido en el estudio actual esté sobrevalorado respecto a otros estudios y el secuestro de carbono esté ligeramente infravalorado, las estimaciones obtenidas son bastante similares (mismo orden de magnitud, excepto en el caso de la cartografía digital elaborada por CREAM et al. (2016)) teniendo en cuenta que se trata de un cálculo desarrollado a partir de datos LiDAR, sin la necesidad de tomar datos en campo como en el estudio de Chaparro & Terradas (2009) y Baró et al. (2014), o de un Inventario Forestal Nacional como en el caso de CREAM et al. (2016). En este último caso, la contribución del parque forestal es equiparable con los otros estudios, mientras que la aportación de los parques y jardines urbanos se ve infrarrepresentada y la del arbolado viario es inexistente, debido tanto al menor nivel de

resolución del archivo (ráster de 100x100m) como a los propios métodos utilizados (Inventario Forestal Nacional).

Además, el hecho de utilizar fuentes de datos abiertas, a diferencia de los otros estudios, hace posible la aplicación del método propuesto en cualquier lugar en el que haya una cobertura adecuada de datos LiDAR e imágenes del satélite Landsat 8 (fecha necesaria, resolución mínima, condiciones meteorológicas adecuadas, etc.)

Hay que mencionar que en estos estudios, la cuantificación del ES se realiza por categorías de usos del suelo y, por lo tanto, sólo es posible comparar los resultados totales así como los del parque forestal y de los parques y jardines urbanos, no siendo posible comparar los resultados del arbolado viario.

Tabla 6.1. Comparación de los resultados de stock y secuestro de carbono obtenidos en este estudio con los obtenidos por Chaparro & Terradas (2009), CREAM et al. (2016) y Baró et al. (2014)

		Estudio actual	Chaparro & Terradas (2009)	CREAF et al. (2016)	Baró et al. (2014)
Stock de carbono (t C)	Arbolado viario	56.551,65	-	0	-
	Parques y jardines urbanos	31.391,97	26.876	7.250	-
	Parque forestal	57.279,24	42.108	46.133	-
	Total	173.820,29	113.437	53.383	-
Secuestro de carbono (t C/año)	Arbolado viario	1.238,37	-	-	-
	Parques y jardines urbanos	654,46	1.088	-	-
	Parque forestal	1.132,50	2.446	-	-
	Total	3.526,70	6.187	-	-
Secuestro de carbono (t CO ₂ eq/año)	Arbolado viario	4.544,82	-	-	-
	Parques y jardines urbanos	2.401,87	-	-	3.616
	Parque forestal	4.156,28	-	-	4.568
	Total	12.943	-	-	19.036

Adicionalmente, con tal de poder realizar una comparación cualitativa de los resultados obtenidos en este estudio con aquellos obtenidos en el informe del *Ajuntament de Barcelona* (2018), se compara el ranking de los parques y jardines urbanos con mayor suministro de los ES estudiados.

En la Tabla 6.2 se compara el ranking de los 10 parques con mayor stock de carbono obtenidos según el estudio actual con el ranking de los 10 parques con mayor retención de carbono del informe del *Ajuntament de Barcelona* (2018). Del ranking de 10 parques, sólo 5 de ellos coinciden en ambos estudios (independientemente del orden en que aparezcan). Esto se puede deber a las diferencias en la metodología utilizada para llevar a cabo la cuantificación de este servicio en ambos estudios.

En el caso del ranking de parques con mayor secuestro de carbono, también coinciden cinco parques en ambos estudios (Tabla 6.3). En este caso, el ranking utilizado del estudio de *Ajuntament de*

Barcelona (2018) hace referencia al indicador de ‘mejora de la calidad del aire’, que tiene en cuenta, entre otros factores, la madurez del arbolado, decisiva en el secuestro de carbono.

En el caso del listado de parques con valores más bajos de LST, se han comparado con el ranking de parques con mayor regulación térmica según el estudio de Ajuntament de Barcelona (2018). En este caso, tan solo 3 de los 10 parques del ranking coinciden en ambos estudios.

Finalmente, el índice NDGB se ha comparado con el ES ‘paisaje urbano’ del estudio de Ajuntament de Barcelona (2018), ya que tiene en cuenta factores como la cobertura arbórea y la densidad del tejido urbano del entorno. En este caso, tan solo 2 de los 10 parques coinciden en ambos estudios.

De la comparación en los rankings obtenidos de cada estudio se puede deducir que aunque la diferencia en la metodología utilizada es determinante para la cuantificación de estos ES, existen coincidencias en ambos estudios que justifican la necesidad de seguir desarrollando estas metodologías hasta poder obtener resultados más concisos.

Tabla 6.2. Ranking de los 10 parques con mayor stock de carbono

Estudio actual	Ajuntament de Barcelona (2018)
Jardins de Laribal	Parc del Laberint d’Horta
Parc de la Ciutadella	Parc Güell
Castell de Montjuïc	Parc del Guinardó
Jardí Botànic Històric	Parc del Castell de l’Oreneta
Mirador del Poble Sec	Mirador del Poble Sec
Jardins de Petra Kelly	Jardins de Laribal
Parc del Guinardó	Parc del Turó de la Peira
Jardins del Mirador de l’Alcalde	Parc de la Font del Racó
Parc del Castell de l’Oreneta	Jardins del Turó del Putxet
Parc Güell	Parc del Mirador del Migdia

Tabla 6.3. Ranking de los 10 parques con mayor secuestro de carbono

Estudio actual	Ajuntament de Barcelona (2018)
Jardins de Laribal	Parc del Laberint d’Horta
Parc de la Ciutadella	Parc Güell
Castell de Montjuïc	Parc del Turó de la Peira
Jardí Botànic Històric	Jardins de Laribal
Jardins de Petra Kelly	Parc del Mirador del Migdia
Parc del Mirador del Poble Sec	Jardins de Joan Brossa
Parc del Guinardó	Parc del Guinardó
Jardins Joan Brossa	Parc del Castell de l’Oreneta
Parc del Castell de l’Oreneta	Jardins de Joan Maragall
Parc del Laberint d’Horta	Parc del Carmel

Tabla 6.4. Ranking de los 10 parques con valores más reducidos de LST

Estudio actual	Ajuntament de Barcelona (2018)
Parc del Fòrum	Parc del Guinardó
Jardins de Joan Brossa	Parc de la Ciutadella
Parc de la Ciutadella	Parc Güell
Parc de Diagonal Mar	Parc de Diagonal Mar
Jardins del Palau de les Heures	Jardins del Palau de Pedralbes
Parc de la Nova Icària	Parc de l'Espanya Industrial
Parc de la Primavera	Turó Parc
Parc del Mirador del Poble Sec	Parc de Joan Miró
Parc Güell	Parc de les Aigües
Jardins del Laberint d'Horta	Parc de Sant Martí

Tabla 6.5. Ranking de los 10 parques con valores más elevados del índice NDGB

Estudio actual	Ajuntament de Barcelona (2018)
Jardins de Laribal	Parc de la Ciutadella
Castell de Montjuïc	Turó Parc
Parc de la Ciutadella	Parc del Guinardó
Jardí Botànic Històric	Parc Güell
Parc del Guinardó	Parc Central del Poblenou
Parc del Mirador del Poble Sec	Jardins del Palau de Pedralbes
Jardins de Petra Kelly	Jardins de la Universitat
Jardins del Mirador de l'Alcalde	Parc de Joan Miró
Parc del Mirador del Migdia	Parc del Laberint d'Horta
Parc del Castell de l'Oreneta	Parc de Sant Martí

7. Conclusiones

Mediante el estudio actual ha sido posible mapear y cuantificar mediante indicadores biofísicos algunos de los Servicios Ecosistémicos relevantes a escala urbana, aunque la mayoría de ellos han sido servicios de regulación, los cuales han sido más estudiados en la literatura existente. Aun así, ha sido posible desarrollar una aproximación a los servicios socio-culturales mediante la aplicación del índice de Diferencia Normalizada del volumen Verde-Edificios (NDGB), aunque sin tener en cuenta a los actores implicados y mediante un indicador sin dimensión.

El uso de fuentes de datos abiertas (datos LiDAR e imágenes del satélite Landsat 8) permite la aplicación de los métodos propuestos en este estudio en cualquier parte del mundo donde haya una cobertura adecuada de estos catálogos de datos (fechas necesarias, resolución mínima necesaria, condiciones meteorológicas adecuadas, etc.)

Aun así, las imágenes térmicas del satélite Landsat 8 tienen una resolución espacial de 30m, lo que puede no ser suficiente para desarrollar análisis de temperatura a escala local, sobre todo cuando se trata de SPUs de dimensiones reducidas como pequeños parques y jardines urbanos o el arbolado viario.

También ha sido posible analizar la contribución de las principales Unidades de Suministro de Servicios (SPUs) gracias a la disponibilidad de los catálogos de datos vectoriales necesarios sobre usos del suelo, inventario del arbolado viario, etc. Aun así, la disponibilidad de catálogos de datos actualizados y con una buena resolución es decisiva a la hora de proporcionar resultados fiables. No ha sido posible analizar la contribución de las distintas categorías de usos o cubiertas del suelo al suministro de los Servicios Ecosistémicos evaluados debido a los recursos informáticos limitados (requiere un largo tiempo de procesamiento).

En cuanto al stock y secuestro de carbono, sólo ha sido posible su cuantificación mediante el uso de ratios obtenidas en la literatura. Aunque mediante el método propuesto se ha intentado utilizar las ratios más adecuadas mediante la clasificación de la vegetación según su altura, mediante la ponderación de las ratios según el tipo de arbolado (coníferas, latifolios o mixtos) y mediante la aproximación a la madurez del arbolado urbano, estas ratios son específicas para cada especie vegetal, tipología climática, duración de la estación de crecimiento, etc. por lo que los resultados no son específicos de la zona de estudio.

En cuanto al secuestro de carbono, sólo se ha tenido en cuenta la retención de carbono del medio, sin tener en cuenta la devolución de carbono producida por la poda y tala de vegetación, descomposición, etc. por lo que se trata de una estimación bruta.

Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos en este estudio con la literatura existente sobre Servicios Ecosistémicos en Barcelona ha sido complicada o imposible en algunos casos por la inconmensurabilidad de los estudios existentes, en que se utilizan métodos distintos, unidades de medida distintas (unidades biofísicas, monetarias, sin dimensión, etc.), escalas distintas (escala local, regional, nacional, global, etc.)

Finalmente, se mencionan algunos aspectos a tener en cuenta para la continuación y desarrollo de los indicadores presentados en este estudio:

-Debido a que la temperatura de la superficie terrestre (LST) depende en gran medida de la estación del año y de las condiciones meteorológicas en que fueron tomadas las imágenes de satélite, es aconsejable realizar el estudio de la capacidad de enfriamiento de los espacios verdes (GCI) como mínimo en una fecha distinta para cada estación (primavera, verano, otoño e invierno).

-Para que un indicador relativo a un Servicio Ecosistémico de carácter socio-cultural sea considerado como tal, es aconsejable incluir la opinión de los actores implicados en su desarrollo.

-Es necesario realizar modelos de regresión para determinar el área de influencia de cada SPU, evitando así fijar valores concretos que pueden no coincidir con la realidad, como en el caso del arbolado viario y de los jardines y parques urbanos, donde la temperatura media se reducía una vez alcanzado una cierta distancia al margen de la SPU.

-Para determinar posibles relaciones entre indicadores, no es suficiente con mostrar estas relaciones mediante diagramas de dispersión, sino que es necesario realizar modelos de regresión entre los distintos barrios para poder corroborar posibles relaciones.

8. Bibliografia

- Agència de Salut Pública de Barcelona. (2018). *Avaluació de la qualitat de l'aire a la ciutat de Barcelona. Informe 2017*. Barcelona.
- Ahmad, A., Zhang, Y., & Nichols, S. (2011). **Review and evaluation of remote sensing methods for soil-moisture estimation**. *SPIE Reviews*, 2, 1–17. <https://doi.org/10.1117/1.3534910>
- Ajuntament de Barcelona. (2018). *Serveis Socioambientals dels espais verds de Barcelona*. Barcelona.
- Ajuntament de Barcelona. (2019a). **Arbres viaris**. Recuperado de <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/data/es/dataset/arbrat-viari>
- Ajuntament de Barcelona. (2019b). **Lloguer mitjà mensual**. Recuperado de <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/data/ca/dataset/est-mercat-immobiliari-lloguer-mitja-mensual>
- Ajuntament de Barcelona. (2019c). *Pla del verd i de la biodiversitat de Barcelona 2020*. Barcelona.
- Ajuntament de Barcelona. (2019d). **Població oficial per barris i sexe de la ciutat de Barcelona**. Recuperado de <https://opendata-ajuntament.barcelona.cat/data/ca/dataset/est-ine-sexe>
- Ajuntament de Barcelona. (2019e). **Qualitat de l'aire**. Recuperado de <https://ajuntament.barcelona.cat/qualitataire/ca/>
- Ajuntament de Barcelona. (2019f). **Usos del sòl**. Recuperado de <https://w20.bcn.cat/cartobcn/>
- Àrea Metropolitana de Barcelona. (2019). **Municipis de l'AMB**. Recuperado de <http://www.amb.cat/ca/web/area-metropolitana/municipis-metropolitans/>
- Avdan, U., & Jovanovska, G. (2016). **Algorithm for Automated Mapping of Land Surface Temperature Using LANDSAT 8 Satellite Data**. *Journal of Sensors*, 1–9.
- Baró, F., Chaparro, L., Gómez-Baggethun, E., Langemeyer, J., Nowak, D. J., & Terradas, J. (2014). **Contribution of Ecosystem Services to Air Quality and Climate Change Mitigation Policies: The Case of Urban Forests in Barcelona, Spain**. *AMBIO*, 43, 466–479. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0507-x>
- Baró, F., Haase, D., Gómez-Baggethun, E., & Frantzeskaki, N. (2015). **Mismatches between ecosystem services supply and demand in urban areas: A quantitative assessment in five European cities**. *Ecological Indicators*, 55, 146–158. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.03.013>
- Baró, F., Palomo, I., Zulian, G., Vizcaino, P., Haase, D., & Gómez-Baggethun, E. (2016). **Mapping ecosystem service capacity, flow and demand for landscape and urban planning: A case study in the Barcelona metropolitan region**. *Land Use Policy*, 57, 405–417.
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). **Ecosystem services in urban areas**. *Ecological Economics*, 29, 293–301.
- Cao, X., Onishi, A., Chen, J., & Imura, H. (2010). **Quantifying the cool island intensity of urban parks using ASTER and IKONOS data**. *Landscape and Urban Planning*, 96, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.03.008>
- Centro Nacional de Información Geográfica. (2019). **Centro de descargas del CNIG**. Recuperado de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp#>
- Chaparro, L., & Terradas, J. (2009). *Serveis Ecològics del Verd Urbà a Barcelona*. Bellaterra.
- Chen, A., Yao, X. A., Sun, R., & Chen, L. (2014). **Effect of urban green patterns on surface urban cool islands and its seasonal variations**. *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 646–654.
- Costanza, R., D'Arge, R., de Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... van den Belt, M. (1997). **The value of the world's ecosystem services and natural capital**. *Nature*, 387, 253–260.
- CREAF, ICTA, & DIBA. (2016). **SITxell anàlisi territorial**. Recuperado de <http://sitmun.diba.cat/sitmun2/visor.jsp?app=16&ter=1>
- Departament d'Estadística i Difusió de Dades (2018). *Anuari Estadístic de la Ciutat de Barcelona 2018*. Barcelona.

- Davies, Z. G., Edmondson, J. L., Heinemeyer, A., Leake, J. R., & Gaston, K. J. (2011). **Mapping an urban ecosystem service: quantifying above-ground carbon storage at a city-wide scale.** *Journal of Applied Ecology*, 48, 1125–1134. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2011.02021.x>
- Du, H., Cai, W., Xu, Y., Wang, Z., Wang, Y., & Cai, Y. (2017). **Quantifying the cool island effects of urban green spaces using remote sensing data.** *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 24–31.
- Elhakim, A. F. (2016). **Estimation of soil permeability.** *Alexandria Engineering Journal*, 55, 2631–2638. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.07.034>
- European Commission. (2012). **Our life insurance, our natural capital: an EU biodiversity strategy to 2020.**
- European Union. (2018). **Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services.** Luxembourg. <https://doi.org/10.2779/41384>
- Freire-González, J., Jofra-Sora, M., & Puig-Ventosa, I. (2019). **Caracterització dels serveis ecosistèmics i valoració del servei de provisió d'aliments.** Barcelona.
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., ... Elmqvist, T. (2014). **A Quantitative Review of Urban Ecosystem Service Assessments: Concepts, Models, and Implementation.** *AMBIO*, 43, 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>
- Hernández-Morcillo, M., Plieninger, T., & Bieling, C. (2013). **An empirical review of cultural ecosystem service indicators.** *Ecological Indicators*, 29, 434–444. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2013.01.013>
- Kong, F., Yin, H., Wang, C., Cavan, G., & James, P. (2014). **A satellite image-based analysis of factors contributing to the green-space cool island intensity on a city scale.** *Urban Forestry & Urban Greening*, 13, 846–853.
- Lafortezza, R., & Giannico, V. (2017). **Combining high-resolution images and LiDAR data to model ecosystem services perception in compact urban systems.** *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.05.014>
- Larondelle, N., Haase, D., & Kabisch, N. (2014). **Mapping the diversity of regulating ecosystem services in European cities.** *Global Environmental Change*, 26, 119–129.
- Lin, W., Yu, T., Chang, X., Wu, W., & Zhang, Y. (2015). **Calculating cooling extents of green parks using remote sensing: Method and test.** *Landscape and Urban Planning*, 134, 66–75.
- Mallick, J., Singh, C. K., Shashtri, S., Rahman, A., & Mukherjee, S. (2012). **Land surface emissivity retrieval based on moisture index from LANDSAT TM satellite data over heterogeneous surfaces of Delhi city.** *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation*, 19, 348–358. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.06.002>
- Martínez-Harms, M. J., & Balvanera, P. (2012). **Methods for mapping ecosystem service supply: a review.** *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management*, 8(1–2), 17–25. <https://doi.org/10.1080/21513732.2012.663792>
- McPhearson, T., Kremer, P., & Hamstead, Z. A. (2013). **Mapping ecosystem services in New York City: Applying a social-ecological approach in urban vacant land.** *Ecosystem Services*, 5, e11–e26. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2013.06.005>
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). **Ecosystems and human well-being: Synthesis.** Washington, D.C.
- Nowak, D. J., Crane, D. E., & Stevens, J. C. (2006). **Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States.** *Urban Forestry & Urban Greening*, 4, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2006.01.007>
- Rowntree, R. A., & Nowak, D. J. (1991). **Quantifying the role of urban forests in removing atmospheric carbon dioxide.** *Journal of Arboriculture*, 17(10), 269–275.
- Seppelt, R., Dormann, C. F., Eppink, F. V., Lautenbach, S., & Schmidt, S. (2011). **A quantitative review of ecosystem service studies: approaches, shortcomings and the road ahead.** *Journal of Applied Ecology*, 48, 630–636. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2010.01952.x>
- Sobrino, J. A., Jiménez-Muñoz, J. C., & Paolini, L. (2004). **Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5.** *Remote Sensing of Environment*, 90, 434–440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>

- Strohbach, M. W., & Haase, D. (2012). **Above-ground carbon storage by urban trees in Leipzig, Germany: Analysis of patterns in a European city.** *Landscape and Urban Planning*, 104, 95–104.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.001>
- The Economics of Ecosystems and Biodiversity. (2011). **TEEB Manual for Cities: Ecosystem Services in Urban Management.** Recuperado de www.teebweb.org
- Tratalos, J., Fuller, R. A., Warren, P. H., Davies, R. G., & Gaston, K. J. (2007). **Urban form, biodiversity potential and ecosystem services.** *Landscape and Urban Planning*, 83, 308–317.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.05.003>
- United Nations. (2019). **World Urbanization Prospects: The 2018 Revision.** New York.
- United States Geological Survey. (2013). **Landsat 8 user's handbook.** Recuperado de <http://landsat.usgs.gov/Landsat8 Using Product%0A.php>
- Weng, Q., Lu, D., & Schubring, J. (2004). **Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies.** *Remote Sensing of Environment*, 89, 467–483.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- Zardo, L., Geneletti, D., Pérez-Soba, M., & Van Eupen, M. (2017). **Estimating the cooling capacity of green infrastructures to support urban planning.** *Ecosystem Services*, 26, 225–235.
- ZhiMing, Z., QiMing, Q., Abduwasit, G., & Dongdong, W. (2007). **NIR-red spectral space based new method for soil moisture monitoring.** *Science in China Ser D: Earth Sciences*, 50(2), 283–289.
<https://doi.org/10.1007/s11430-007-2004-6>