



Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica

Laura Benegas Negri¹ , Adolfo Rojas¹ , Alberto Iraheta¹ , Jeanette Cárdenas¹

(1) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Unidad de Cuencas, Seguridad Hídrica y Suelos

* Autor de correspondencia: Laura Benegas Negri [laura.benegas@catie.ac.cr]

> Recibido el 29 de agosto de 2020- Aceptado: 26 de junio de 2021

Como citar: Benegas, L., Rojas, A., Iraheta, A., Cárdenas, J. 2021 Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica. *Ecosistemas* 30(2):2083. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2083>

Análisis del componente arbóreo y su contribución a los servicios ecosistémicos en la ciudad de Turrialba, Costa Rica

Resumen: El análisis y gestión de ecosistemas urbanos es crucial para construir resiliencia en ciudades y avanzar hacia su sostenibilidad. Uno de los componentes fundamentales de estos ecosistemas son los bosques urbanos. Para determinar los aportes y efectos de los árboles en ciudades se analizó una muestra del casco urbano de la ciudad de Turrialba en la zona central de Costa Rica, a través del modelo iTree Eco, que permite valorar los principales servicios ecosistémicos que proveen los árboles en las ciudades. Aunque en este estudio no fue posible cuantificar todos los servicios ecosistémicos que incluye el modelo, se logró analizar los elementos y contexto estructural de la zona de estudio, y el valor de los servicios ecosistémicos de secuestro y almacenamiento de carbono, así como el valor estructural de los árboles. Anualmente, en la zona estudiada, con 18 especies de árboles identificadas, se generan más de 60 000 USD solamente derivados de estos tres servicios ecosistémicos. De las especies identificadas la *Zygia longifolia*, se destacó por mayor abundancia y área foliar, *Erythrina poeppigiana* en altura y mayor almacenamiento de carbono, *Mangifera indica* en mayor secuestro de carbono y producción de oxígeno y *Veitchia sp* con el mayor valor estructural. Asimismo, se evidenció que, mantener las franjas ribereñas del río Turrialba y sus tributarios, en su paso por el casco urbano de esta ciudad, aporta la mayor cantidad de servicios ecosistémicos derivados de los árboles que todavía alberga y donde existe aún un importante potencial de incluir nuevas plantaciones.

Palabras clave: ciudades sostenibles, cuencas urbanas, corredor interurbano, planificación municipal, resiliencia

Analysis of the tree component and its contribution to ecosystem services in the city of Turrialba, Costa Rica

Abstract: The analysis of urban ecosystems is crucial for building resilience in cities and moving towards their sustainability. One of the fundamental components of these ecosystems is the urban forest. To determine the contributions and effects of trees in cities, a sample of the urban area of the city of Turrialba in central Costa Rica was analyzed using the model iTree Eco, which allows the main ecosystem services provided by trees in cities to be valued. Although in this study it was not possible to quantify all the ecosystem services included in the model, it was possible to analyze the elements and structural context of the study area, the value of carbon sequestration and storage, as well as the structural value of the trees. Annually, in the study area, with 18 tree species identified, more than 60 000 USD are generated from these three ecosystem services alone. Of the species identified, *Zygia longifolia* stood out for its greater abundance and leaf area, *Erythrina poeppigiana* in height and greater carbon storage, *Mangifera indica* in greater carbon sequestration and oxygen production, and *Veitchia sp* with the greatest structural value. Likewise, it was evident that maintaining the riverbanks of the Turrialba River and its tributaries, in its passage through the urban area of this city, provides the greatest amount of ecosystem services derived from the trees it keeps and where there is still a significant potential to include new plantations.

Keywords: interurban corridor, municipal planning, resilience, sustainable cities, urban watersheds

Introducción

El 55% de la población mundial residía en zonas urbanas en 2018, y se ha proyectado que casi el 90% de la población conjunta de América Latina y del Norte, y del Caribe, será urbana en 2050 (ONU 2018). Las decisiones de la mayoría de la población humana que vive actualmente en las ciudades afectan a la capacidad de recuperación de todo el planeta (Seto et al. 2012). De acuerdo con ONU (2015) las ciudades del mundo ocupan solo el 3% de la tierra, pero representan entre el 60% y el 80% del consumo de energía y el 75% de las emisiones de carbono (UN-Hábitat 2011; Christ 2014), y generan el 80% del PIB (McKinsey et al. 2011). Asimismo,

la rápida urbanización está ejerciendo presión sobre los suministros de agua dulce, las aguas residuales, el entorno de vida y la salud pública, debido a la coexistencia de la extrema pobreza, el desempleo, las desigualdades socioeconómicas, modelos insostenibles de consumo y producción, todo ello afectando los flujos energéticos y la sostenibilidad ambiental (UN-Hábitat 2011; MIAAMA 2012; Mella y López 2015; Reyes et al. 2018).

La capacidad del sistema urbano de mantener simultáneamente las funciones sociales y ecológicas es crucial para la resiliencia urbana (Alberti et al. 2003). Los servicios ecosistémicos- beneficios que recibe el ser humano de los ecosistemas naturales (Daily et al. 1997; MEA 2005)- proporcionan un marco importante para

vincular la infraestructura ecológica con la infraestructura social de la ciudad, y con el potencial de beneficiar a los humanos y a los ecosistemas. (McPhearson et al. 2014). Más recientemente el término Contribuciones de la Naturaleza a la Gente (NCP por sus siglas en inglés), definido como “todas las contribuciones positivas, pérdidas o perjuicios, que las personas obtienen de la naturaleza” permite captar los efectos tanto beneficiosos como perjudiciales de la naturaleza en la calidad de vida de las personas (Pascual et al. 2017).

Estas contribuciones de la naturaleza a la gente se ven afectadas por la deforestación y la degradación de los bosques, aumentando las emisiones antropogénicas de CO₂ a escala mundial, en particular para los bosques tropicales. La degradación de los bosques representó el 25% de las emisiones totales de la deforestación y la degradación de los bosques contabilizadas en 74 países en desarrollo situados en latitudes tropicales (Bustamante et al. 2016; Pearson et al. 2017). Sin embargo, se sabe menos sobre la influencia de los bosques urbanos existentes, la deforestación en áreas periurbanas, y los programas de plantación de árboles urbanos y su papel en la regulación del CO₂ a nivel local en ciudades como las de la América Latina neotropical (Clerici et al. 2016).

Los árboles urbanos prestan un servicio ecológico directo a las ciudades al reducir la superficie urbana y las temperaturas del aire mediante el sombreado y la evapotranspiración, pero los efectos indirectos de los árboles son igualmente importantes. Por ejemplo, una ciudad más fresca lleva a reducciones sustanciales en el uso de energía para el aire acondicionado (McPhearson 2011). El Servicio Forestal de los Estados Unidos determinó que los árboles de las calles de la ciudad de Nueva York proporcionan un ahorro de energía estimado en 27 millones de dólares al año mediante el sombreado de los edificios.

En la ciudad de Mérida, México, la población arbórea fija 182 100 t de carbono en madera, con un valor estructural de 648 millones de dólares (De La Concha 2016). El valor económico total de los beneficios colaterales proporcionados por los árboles urbanos públicos del MAAV (Metropolitan Area of the Aburrá Valley, Colombia), fue de 3.5 millones de dólares al año, equivalente a un promedio de 19 dólares por árbol al año (Reynolds et al. 2017).

Los árboles urbanos también capturan las precipitaciones en sus hojas y ramas y absorben el agua a través de sus raíces, actuando como dispositivos naturales de captura y retención de las aguas pluviales. La captura del agua de tormenta para evitar la carga de contaminación en los arroyos, ríos y estuarios locales es un objetivo importante de la planificación de las ciudades. Por ejemplo, los árboles de las calles de Nueva York interceptan casi 900 millones de galones de aguas pluviales al año, correspondiente a 1500 galones por árbol en promedio. El valor total de este beneficio para dicha ciudad es de más de 35 millones de dólares anuales (McPhearson 2011).

Recientemente, desde el punto de vista de la planificación de las ciudades, el concepto de soluciones basadas en la naturaleza (SbN) ha sido desarrollado para integrar el enfoque de servicios ecosistémicos dentro de las políticas y prácticas de planificación espacial, garantizando el correcto abordaje de la dimensión ecológica y los desafíos actuales de la sociedad (Albert et al. 2019; Scott et al. 2016; Dushkova y Haase 2020). Los árboles o bosques urbanos están intrínsecamente ligados al concepto de SbN en las ciudades, y, los proyectos de este tipo se están desarrollando más rápido de lo que se estudian. Por tanto, es crucial aportar a la comprensión de cómo estos proyectos influyen no sólo en las dinámicas ecológicas urbanas, sino también en la transformación de los beneficios sociales que proporciona la naturaleza en las ciudades (Ordóñez et al. 2019).

Existen varios modelos para la medición de los servicios ecosistémicos generados por la infraestructura verde en ciudades incluyendo modelos biofísicos, modelos empíricos, basados en SIG (sistemas de información geográfica), estadísticos y de encuestas; y enfoques menos aplicados como el cualitativo, estudios causales

y tablas de búsqueda (Haase et al. 2014). Por ejemplo, el modelo InVEST© (Integrated Valuation of Ecosystem Services and Tradeoffs), desarrollado por Natural Capital Project y de código abierto, permite la evaluación de la producción ecológica y la subsiguiente valoración económica, representando la información de manera geoespacial. Con este modelo se pueden valorar directamente los servicios identificados como los hábitats, la calidad estética y la recreación. Otros servicios ecosistémicos como la regulación de la calidad del aire necesitan mayor procesamiento (selección de los elementos del secuestro y almacenamiento de carbono), así como la polinización, la producción de agua, entre otros (Sharp et al. 2020). Con un enfoque de evaluación por árbol, el modelo UFORE/iTree (Urban Forest Effects) permite evaluar la estructura del bosque urbano (número de árboles, las especies, composición, tamaño de los árboles, salud) y varias funciones (eliminación de la contaminación atmosférica, almacenamiento y secuestro de carbono, entre otros) (Nowak et al. 2008; Nowak y Crane 1998).

Investigaciones existentes concuerdan en que el elemento arbóreo del entorno natural es el que está proporcionando mayores servicios del ecosistema a la sociedad. Pero hay menor claridad en cuanto a que componentes del bosque urbano son los principales responsables de la prestación de servicios específicos del ecosistema (Davies et al. 2017). i-Tree Eco permite evaluar tres servicios ecosistémicos reguladores que proveen los bosques urbanos (almacenamiento y secuestro de carbono, eliminación de la contaminación atmosférica y reducción de la escorrentía). Con estos servicios, los árboles contribuyen con la mitigación del cambio climático global, mejora en la calidad del aire urbano y reducción de los costos de tratamiento del agua y los riesgos de las inundaciones (Raum et al. 2019). Las bases científicas de análisis de iTree incluyen procesos mecánicos o relaciones empíricas (por ejemplo, ecuaciones alométricas) generados a partir de parcelas de campo, datos de contaminación atmosférica y datos meteorológicos. Se considera que i-Tree es la herramienta más utilizada en la modelización de bosques urbanos (Lin et al. 2019).

Este estudio busca cuantificar los servicios ecosistémicos o beneficios del ecosistema urbano, como insumo para la planificación urbana y la sensibilización de los ciudadanos respecto a la protección de esta infraestructura verde a partir de un área piloto en la ciudad de Turrialba, Costa Rica. Específicamente, se pretende caracterizar el componente arbóreo de la ciudad y calcular el aporte de éste en almacenamiento, secuestro de carbono, producción de oxígeno y valor estructural a través del modelo iTree Eco.

Material y métodos

A partir de la información de los bosques urbanos, obtenida por medio de encuestas en el campo, de parcelas ubicadas al azar, datos de localización, datos meteorológicos, se utilizó el modelo i-Tree Eco V6.0 para cuantificar varias medidas de los atributos estructurales de los bosques, sus principales servicios ecosistémicos y su valor económico (Nowak y Crane 2000).

De los diferentes servicios ecosistémicos que se cuantifican con iTree Eco, no se reportan aquí los de polución del aire y escorrentía evitada. El primero porque no se cuenta con datos de contaminación del aire en la ciudad de Turrialba, los cuales son insumos de entrada para los cálculos de polución del aire. En el caso de la escorrentía evitada no está claro si para la implementación del modelo fuera de los Estados Unidos, se modificaron con éxito los algoritmos de aguas pluviales para tener en cuenta las condiciones locales (Roy et al. 2012). Además, al aplicar el modelo con los datos de este estudio se constató que en los cálculos no se considera la escorrentía que se detendría por depresiones topográficas, sino únicamente se toma en cuenta la profundidad de la escorrentía. Por tanto, el modelo no refleja los fenómenos de acumulación y detención que se producen en grandes eventos de lluvia.

Zona de estudio

El casco urbano del distrito o municipalidad de Turrialba, ubicado en el cantón de Turrialba, provincia de Cartago, República de Costa Rica, fue seleccionado como zona de estudio (Fig.1). El cantón de Turrialba tiene una población estimada de 70 000 habitantes distribuidos en una superficie de 1644 km², de esta población, el municipio de Turrialba representa el 40%, corresponde a 419 has y se ubica en la subcuenca del río Turrialba, que drena a la cuenca del río Reventazón. El gradiente altitudinal de la subcuenca del río Turrialba va desde los 3300 msnm en el volcán Turrialba a 580 msnm. El clima de la zona es tropical húmedo, el mes más lluvioso es diciembre con precipitación anual promedio de 306 mm y marzo, el mes más seco con 81 mm, con una precipitación anual promedio que oscila entre 2000 y 4000 mm, y la temperatura oscila entre los 8 y los 22 grados Celsius.

Diseño de muestreo

El diseño de las parcelas de muestreo se realizó con base en los protocolos de iTree Eco, y se utilizó la distribución aleatoria de las parcelas mediante herramientas geoestadísticas de los sistemas de información geográfica (QGIS). El área total del estudio es de 12 hectáreas con 54 parcelas de muestreo, las cuales representan el 20% de toda el área, donde se midieron 41 árboles. Con la finalidad de facilitar el proceso de recolección de datos se dividió el área de estudio en cuatro sectores de 3 hectáreas cada uno: Estación de Tren (15 parcelas), Río Colorado (14 parcelas), Puente Negro (15 parcelas) y Río Turrialba (9 parcelas). En la Figura 1 se puede observar el diseño y distribución de las parcelas de muestreo dentro de cada sector del área de estudio. Se definieron las parcelas de muestreo con 11.33 m de diámetro, según protocolo de i-Tree, manual de campo V6.0 en su versión en español y con base en la experiencia en República Dominicana (Pérez et al. 2017).

Cada parcela muestreada se documentó con dos formularios: uno para registrar las características y ubicación de la parcela, y el

otro para registrar las condiciones y características de los árboles en la parcela. Se utilizó la aplicación móvil AlpineQuest 2.2.3 para Android bajo licencia de Psyberia (compatible con Google Earth, Google Maps, QGIS), para registrar las coordenadas geográficas y fotografías de referencia para localizar las parcelas. Se utilizaron instrumentos de medición (cinta métrica, brújula, hipsómetro y cinta diamétrica), fichas de campo y manuales específicamente elaborados para la zona de estudio como soporte para identificar las características, atributos y condición de los árboles.

Procesamiento de datos con iTree

Se exportaron los datos colectados con la aplicación móvil AlpineQuest 2.2.3 (coordenadas geográficas de la parcela y los registros fotográficos de los puntos de referencia, coordenadas geográficas de cada árbol) con formato KMZ. El modelo utiliza una estimación estadística (*sampling-based statistical estimation model*), que permite proyectar estadísticamente una población de árboles probable en el área de muestreo. En el presente estudio, dicha estimación corresponde a 340 árboles.

La descripción física general de la parcela se realizó mediante observación y estimación visual de: 1) Porcentaje de cobertura de árboles que corresponde al porcentaje de copa de árboles dentro de la parcela. Este porcentaje se estimó de manera visual por los integrantes del equipo de muestreo; 2) Porcentaje de cobertura de arbustos en la parcela, 3) Porcentaje de espacio a plantar, 4) Porcentaje de parcela medido, 5) Presencia de árboles, 6) Objetos de referencia (mínimo de dos objetos de referencia, la distancia del objeto al centro de la parcela y la dirección en grados desde el centro de la parcela), 7) Cobertura del suelo (distribución, en porcentaje, del tipo de cobertura de suelo), y, 8) Uso de suelo actual (tipo de uso de suelo y su respectivo porcentaje dentro de la parcela).

Por otro lado, se registraron datos de la estructura de los árboles (características del tronco y condición de la copa). Para ello se midió: 1) el DAP (Diámetro del tallo a la altura del pecho: 1.37

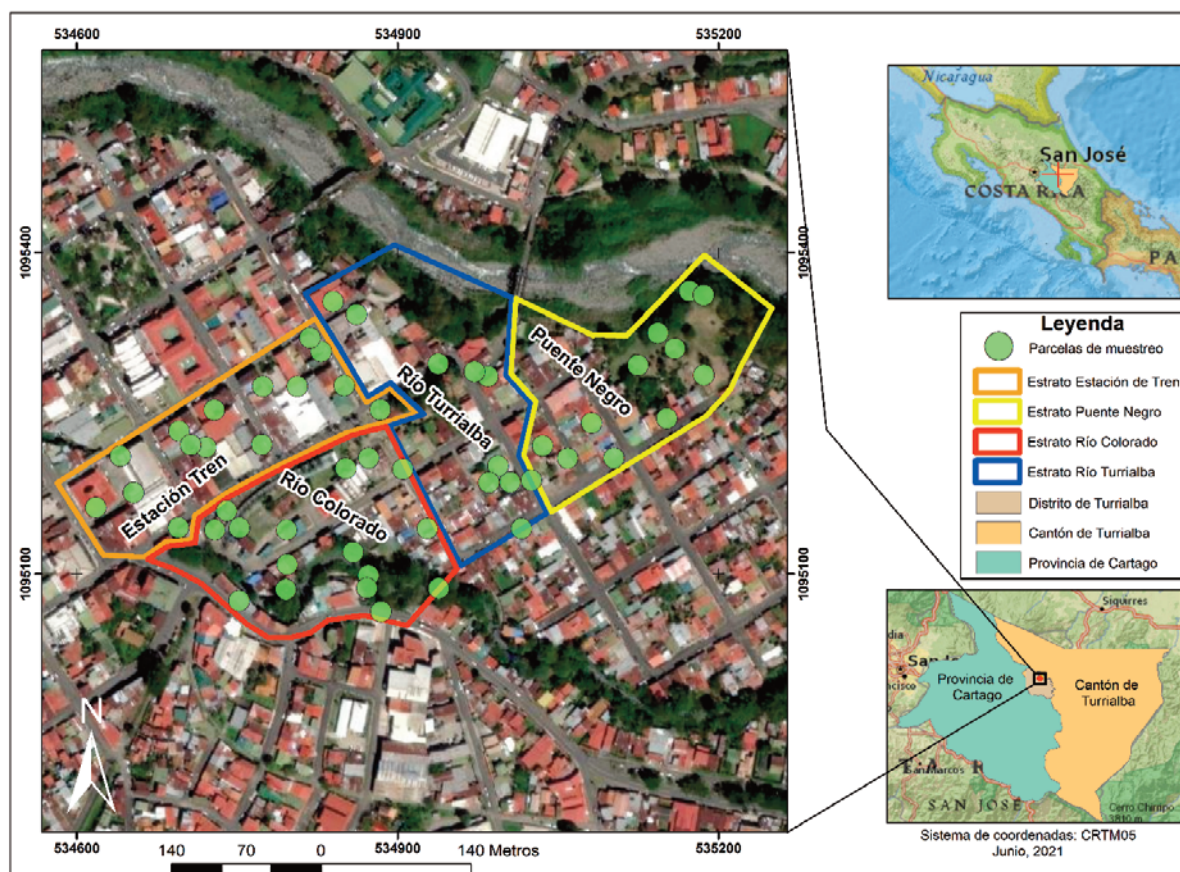


Figura 1. Ubicación geográfica del proyecto piloto y distribución de las parcelas de muestreo.

Figure 1. Location of the pilot Project and simple plots distribution

m); 2) el porcentaje de muerte regresiva según definición de Alvarado-Rosales y Saavedro-Romero (2012), donde se estima la severidad de un estrés reciente en el árbol, como porcentaje en el rango de 0 a 100% con intervalos de 5%; 3) altura total del árbol (medida en metros desde el suelo a la parte superior del árbol -vivo o muerto); 4) altura de cima viva o "copa verde"; 5) altura de la rama más baja (altura en metros desde el suelo a la base de la copa del árbol); 6) ancho de copa. El ancho de la copa fue medido en metros con dos diámetros. Un diámetro en dirección Norte-Sur y el otro en dirección Este-Oeste, o tan cerca de esas direcciones como sea posible; 7) porcentaje de copa ausente, considerado como el porcentaje del volumen de la copa que no está ocupado por ramas y hojas. El porcentaje de ausencia se estimó considerando una arquitectura de la copa ideal, valorando el porcentaje de la copa faltante en referencia a la arquitectura; y, 8) exposición a la luz solar, correspondiente a la evaluación de cuantas partes de la copa reciben la luz solar (Alvarado-Rosales y Saavedro-Romero 2012). Para esta variable, la copa se dividió en cinco partes (la punta y la circunferencia de copa dividida en cuatro partes).

Según el modelo i-tree, el valor de importancia se calcula como la suma de la abundancia proporcional o composición relativa y el área foliar proporcional o el área foliar relativa a la superficie total del ecosistema o área de estudio. Este índice se utiliza para proporcionar una medida de la dominancia relativa de las especies en una comunidad forestal. Los valores de importancia clasifican a las especies dentro de un sitio en base a tres criterios: 1) la frecuencia con que una especie se produce en todo el bosque; 2) el número total de individuos de la especie; y 3) la cantidad total de superficie forestal ocupada por la especie. Este índice permite comparar la composición de las comunidades forestales que difieren en tamaño o que fueron muestreados a diferentes intensidades y es más apropiado que el uso de los valores absolutos (Kuers 2005).

iTree Eco permite calcular varios índices de diversidad. En este estudio se reporta dos de ellos: 1) Riqueza, entendida como el número de especies presentes en cada estrato; 2) Densidad de especies (Especies/ha), correspondiente al número de especies

que están presentes por unidad de área- hectárea- de la zona muestreada.

Para la cuantificación de servicios ecosistémicos, el modelo iTree Eco utiliza dos "sub-modelos", uno que simula el proceso de intercepción de la precipitación y cuantifica escorrentía evitada (Hirabayashi, 2013) y otro modelo que simula el proceso de producción y remoción de la contaminación del aire (Hirabayashi et al. 2015).

Resultados

Características del componente arbóreo

El área de estudio presenta una superficie impermeable donde los edificios representan casi el 35% de los tipos de cobertura, mientras que el "espacio para plantar" representa casi 27% de la superficie. Separando el área de estudio en sectores de muestreo, se observa que la Estación del tren y el Puente Negro son los que presentan mayor porcentaje de superficie impermeabilizada, mientras que el sector con mayor cantidad de superficies permeables es el del río Turrialba (Fig. 2).

La especie más abundante fue Sotacaballo (*Zygia longifolia*), con un 30.2 %; seguida de Guarumo (*Cecropia obtusifolia*) con una presencia de 8.5%; el Guitite (*Acnitus* sp) y el Cas (*Psidium friedrichsthalianum*) con 8.2% y 7.4% respectivamente (Fig. 3A). La especie con mayor porcentaje de área foliar fue Sotacaballo (*Zygia longifolia*), con un 33%; seguida de Poro gigante (*Erythrina poeppigiana*) con 21.9%; (Fig. 3B). El valor de importancia más alto también fue para Sotacaballo, con casi un 63.2%; seguida de Poro gigante con un valor de 28.6% (Fig. 3C).

El 25.6% de los árboles presentaron diámetros (DAP) de 7.6 – 15.2 cm, seguido de un 25% de árboles que presentaron diámetros entre 15.2 y 30.5 cm. La especie con mayor DAP fue el Mango (*Mangifera indica*), con el 50% de individuos ubicados en el rango de 91.5 – 106.7 cm. En el sector del Puente Negro se registraron los individuos con el mayor DAP (91.5 – 106.7 cm) del área de estudio.

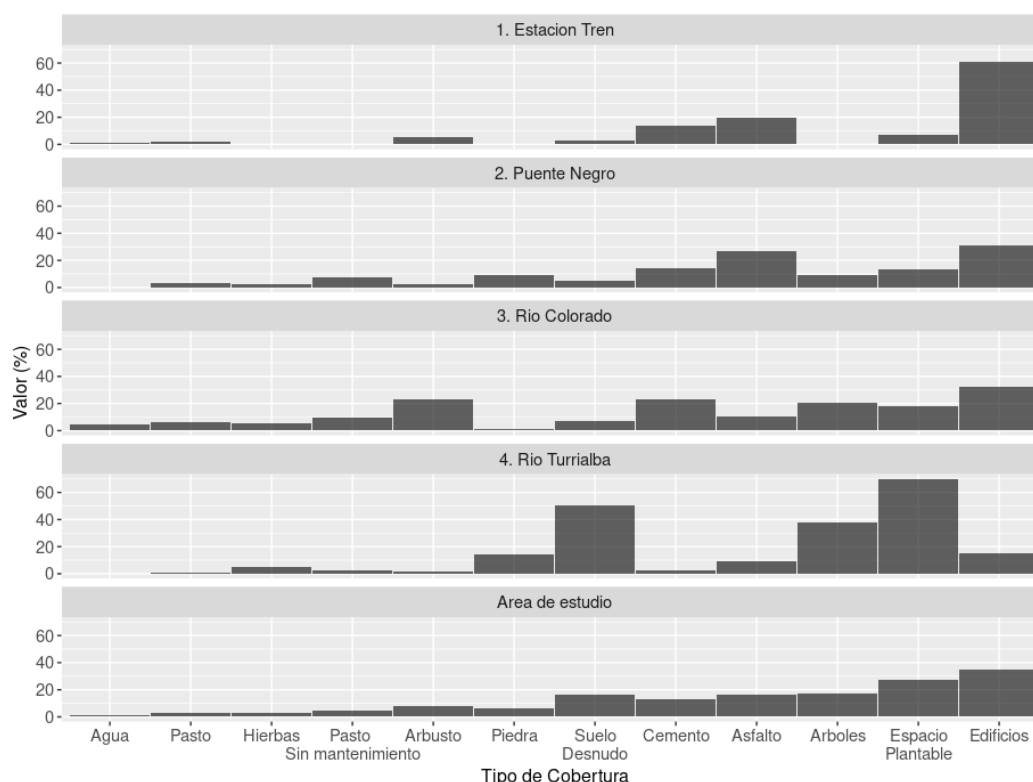


Figura 2. Composición estructural de la muestra por estrato en función del tipo de cobertura presente en el casco urbano de Turrialba, Costa Rica.

Figure 2. Structural composition of the sample by stratification according to the type of cover present in the urban area of Turrialba, Costa Rica.

El sector con mayor riqueza fue el Río Colorado, con 10 especies identificadas; seguido por el Río Turrialba con 9 especies (Fig. 4A). Estos mismos sectores también presentaron mayor densidad de especies por unidad de área (hectárea) y la mayor variedad de especies con 10 y 8 tipos de especies diferentes respectivamente, mientras que la Estación de tren y Puente Negro presentaron solamente 3 tipos de especies (Fig. 4B). En el sector del Río Turrialba la especie más abundante fue *Zygia longifolia*, con 102 individuos; seguida de *Cecropia obtusifolia* y *Erythrina poeppigiana* con 23 individuos cada una. En el sector del Río Colorado la especie más abundante fue Güitite (*Acnitus* sp), con 23 individuos; seguida de Lorito y Palma de manila (*Veitchia*) con 11 individuos cada una.

Servicios Ecosistémicos del bosque urbano

Consideramos cuatro de los servicios ecosistémicos más relevantes del ecosistema urbano de Turrialba, dado que para su cálculo se utilizan las variables medidas directamente con nuestro inventario del bosque urbano en el área de muestreo, garantizando la validez de los datos.

El carbono almacenado en la población arbórea estimada es de 138 t, lo que representa económicamente 1034 USD por año, durante todo el ciclo de vida del bosque, y el secuestro de carbono de 9.2 t/año (donde 2019 corresponde al año de las mediciones en campo) se tradujo en 69 USD.

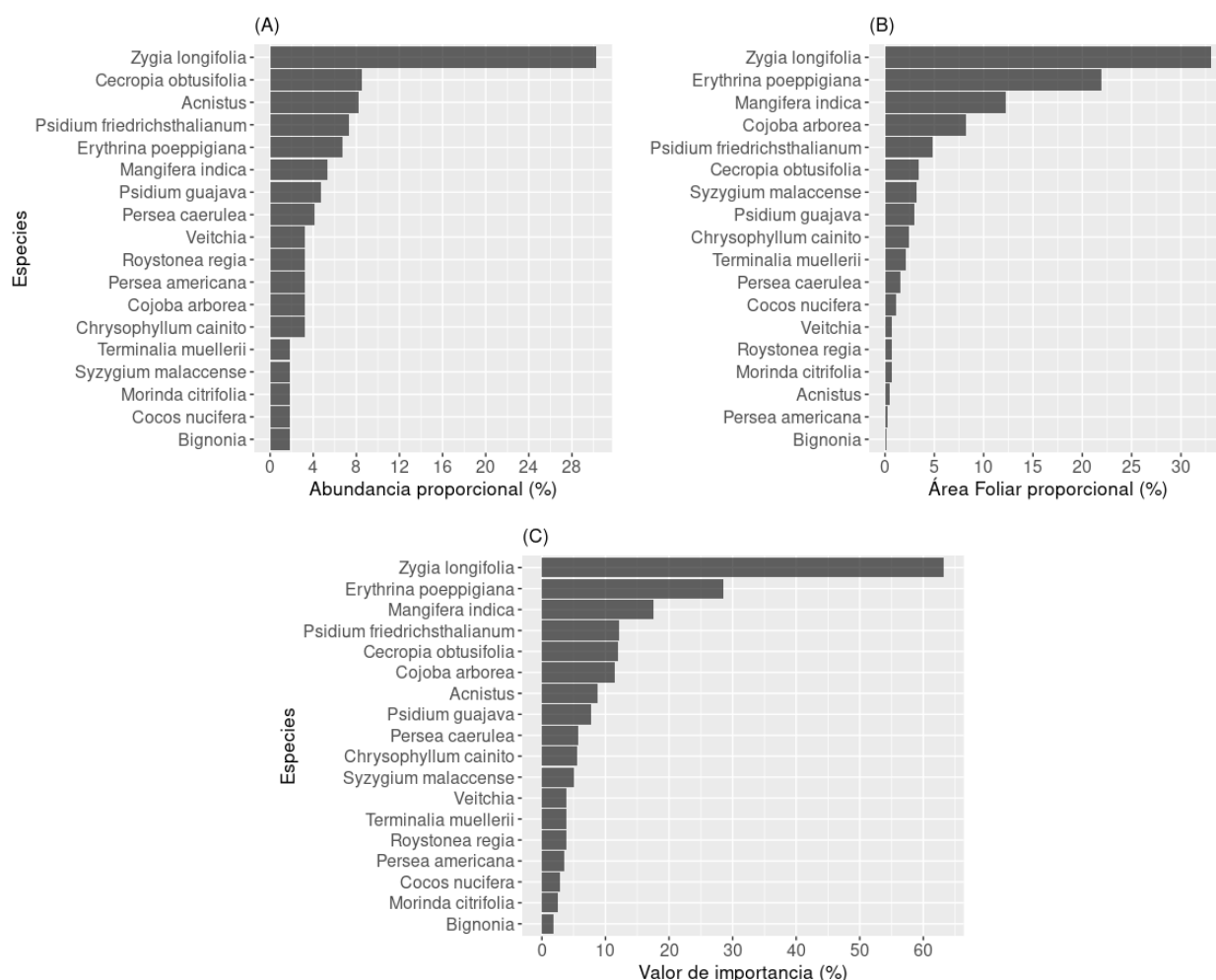


Figura 3. Características de la composición de las especies del bosque urbano: A) Abundancia proporcional, B) Área foliar proporcional y C) valor de importancia en el casco urbano de Turrialba, Costa Rica.

Figure 3. Characteristics of species composition in the urban forest: A) Proportional abundance, B) Proportional leaf area and C) Value of importance in the urban area of Turrialba, Costa Rica.

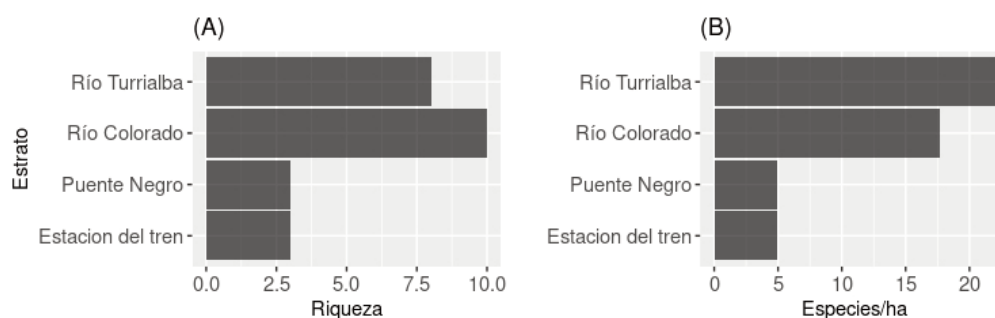


Figura 4. Índices de diversidad en la zona de estudio del casco urbano de Turrialba, Costa Rica: A) Riqueza, B) Densidad de especies.

Figure 4. Diversity indexes in the study zone of city centre of Turrialba, Costa Rica: A) Richness, B) Species density.

Las especies con mayor capacidad de secuestro de carbono son el Mango (*Mangifera indica*) con 2.14 toneladas al año, el Sotacaballo (*Zygia longifolia*) con 2.02 t/año, el Poró gigante (*Erythrina poeppigiana*) con 1.68 t/año, las cuales son las que generan mayor valor monetario; mientras que, las especies con menor capacidad de secuestro de carbono son el Caimito (*Chrysophyllum cainito*) con 0.32 t/año y la Guayaba (*Psidium guajava*) con 0.31 t/año. Por otro lado, las tres especies que más carbono almacenan son *Erythrina poeppigiana*, *Mangifera indica* y *Zygia longifolia* (Tabla 1).

La producción de oxígeno de las especies arbóreas encontradas en el área del estudio es de 25.27 t/año. Siendo la especie de Mango (*Mangifera indica*), la de mayor producción de oxígeno al año con 5.34 t (Fig. 5). Además, las especies de Palma son las que representan el mayor valor estructural, siendo la Palma de manila (*Veitchia* sp) la que tiene mayor valor estructural aportando aproximadamente ₡29 000 000 (49 190 USD). El valor estructural total en el área de estudio es de ₡35 300 000 (60 137 USD).

Discusión

Servicios ecosistémicos o beneficios del arbolado urbano para los ciudadanos

En la muestra analizada, cuya área es ocupada mayormente por superficie impermeable y edificios, aún se encuentra una superficie importante en donde se pueden plantar árboles. Esta situación además se ve asociada a los tipos de sectores analizados, donde claramente, áreas asociadas a ríos urbanos, son también las que prestan la mayor cantidad de servicios derivados del ecosistema urbano en la ciudad. Los bosques urbanos tienen

un valor estructural basado en los propios árboles (por ejemplo, el costo de tener que reemplazar un árbol con otro árbol similar); también tienen valores funcionales y el valor estructural del bosque urbano tiende a aumentar con el incremento del número y el tamaño de árboles sanos (Nowak 2002). Estos servicios ecosistémicos del bosque urbano de Turrialba, principalmente asociados a los sectores ribereños, como el río Colorado y el río Turrialba, pueden ser explicados por la mayor riqueza, diversidad de especies y densidad arbórea que poseen estos sitios. Este resultado reafirma la importancia de la protección del recurso hídrico manteniendo corredores biológicos interurbanos (Gastezzi-Arias et al. 2017).

En términos monetarios, este estudio destaca el valor estructural de los árboles en más de 60 000 USD al año, con las Palmas como especies más importantes; así como también, el almacenamiento de carbono con 1034 USD anuales. Los bosques urbanos tienen un valor estructural basado en los mismos árboles (p. ej., el costo de reemplazo). Los costos asociados al valor estructural pueden ser altos, ya que los árboles que no se mantienen a intervalos regulares pronto se convierten en un peligro debido a la madera muerta y al viento, pudiendo también causar considerables pérdidas de vidas y bienes (Ryan 1985). Existen varios métodos de análisis económico para determinar el costo de reemplazar o mantener los árboles de gran valor estructural en la ciudad, por ejemplo, el desarrollado por el *Council of Tree and Landscape Appraisers* de Norteamérica (CTLA 2018) donde se calcula el valor de reemplazo individual del árbol como un tipo de activo de capital, teniendo en cuenta la especie, la ubicación y la condición (Scott y Betters 2000). En este estudio, los árboles de palma se ubicaron en zonas de mucho tránsito peatonal y vehicular, son de gran tamaño (el 50% de los árboles de la Palma más

Tabla 1. Cantidades y valor monetario del secuestro y almacenamiento de carbono de las principales especies del bosque urbano de Turrialba, Costa Rica.
Table 1. Quantity and monetary value of carbon sequestration and storage of the main species of the urban forest of Turrialba, Costa Rica.

Especies	Secuestro de carbono (Tonelada)	Valor de secuestro de Carbono (₡)	Almacenamiento de carbono (Tonelada)	Valor almacenamiento de carbono (₡)
<i>Mangifera indica</i>	2.14	8237	36.2	138949
<i>Zygia longifolia</i>	2.35	7775	32	106232
<i>Erythrina poeppigiana</i>	1.86	7159	48.6	187061
<i>Cojoba arborea</i>	0.98	3772	12	46188
<i>Psidium friedrichsthalianum</i>	0.65	2502	5.6	21554
<i>Cecropia obtusifolia</i>	0.49	1887	6	23094
<i>Syzygium malaccense</i>	0.34	1309	3.2	12317
<i>Chrysophyllum cainito</i>	0.32	1232	1.6	6158
<i>Psidium guajava</i>	0.31	1193	1.4	5389
<i>Veitchia</i>	0	0	3.1	11932
<i>Acnistus</i> sp	0.17	654	0	0

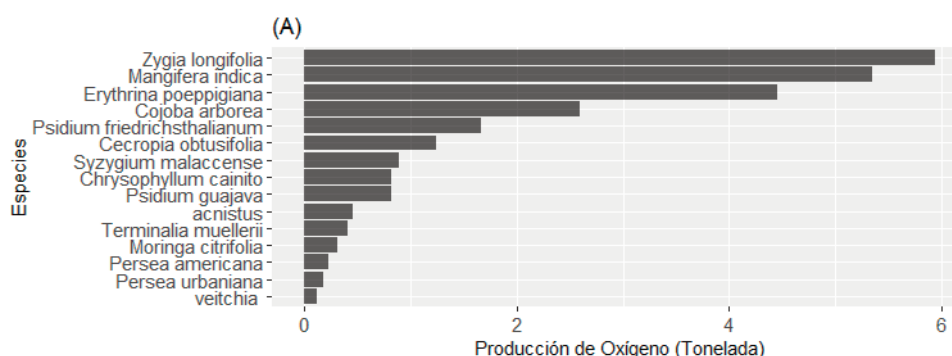


Figura 5. Servicio ecosistémico de Producción de oxígeno por especies en el área muestreada del casco urbano de Turrialba, Costa Rica.

Figure 5. Ecosystem service of Production of oxygen by species in the sampling area of the city centre of Turrialba, Costa Rica.

común: *Veitchia* tienen DAP en el rango de 46 a 61 cm y altura promedio de 18 m), y mantienen en general buena condición de salud. El valor estructural y el almacenamiento de carbono de los árboles mejora cuando se cuenta con árboles saludables, importantes en número, tamaño, área foliar, cantidad de tejido leñoso y con buen manejo (Rosenthal et al. 2008; Silk et al. 2013; Kim 2016).

En este estudio, el valor de importancia más alto fue para el Sotacaballo (*Zygia longifolia*), pero, es importante mencionar que, si un árbol está claramente mucho más representado que los demás, como el Sotacaballo en este caso, podría revelar un comportamiento de especies invasoras que desfavorecen a otras. Se ha reportado que esta especie crece de preferencia en las riberas de los ríos y es ideal para protección riberas y evitar erosión, ya que sus raíces profundas sujetan el suelo, evitando la erosión por falta de cubierta vegetal (Terán-Valdez et al. 2018; Zamora 2010). Pero al mismo tiempo, esta especie, por su buena sombra y atractivo se ha utilizado como recurso ornamental, por lo que se ha plantado en muchos parques y aceras, así como en jardines grandes (Cabezas et al. 2016), por lo tanto, es necesario establecer un buen manejo y selección de sitios para plantar esta especie, ya que el crecimiento de sus raíces en algunas ocasiones puede causar daños en aceras y otras estructuras urbanas (Mullaney et al. 2015).

La producción de oxígeno es uno de los beneficios más claramente atribuidos a los árboles urbanos, y específicamente, la cantidad neta de oxígeno producida por un árbol durante un año está directamente relacionado con la cantidad de carbono secuestrado, lo que a su vez depende de la acumulación de biomasa arbórea (Nowak et al. 2007). Las tres principales especies que contribuyen a la producción de oxígeno fueron *Mangifera indica*, *Zygia longifolia* y *Erythrina poeppigiana*. Asimismo, considerando que para la medición del carbono almacenado se toman en cuenta todos los aportes de carbono (Ej. Desechos leñosos, materia orgánica del suelo, etc) además de la vegetación viva y en pie (California Climate Action Registry 2008), este servicio ecosistémico (más de 1000 dólares al año) es más importante que el valor del secuestro de carbono.

Los valores obtenidos en los servicios ecosistémicos antes reportados se pueden comparar con algunos estudios que utilizaron el modelo iTree en América Tropical. Por ejemplo, el valor estructural cuantificado en este estudio fue un poco mayor a 60.000 USD, similar al obtenido en el Parque Central La Ceiba en Quintana Roo, México, donde para una población estimada de 1101 árboles, tres veces mayor a nuestro estudio, se cuantificó el valor estructural en 31 907 USD, explicado posiblemente porque más del 65% de los árboles encontrados en dicho estudio tenían DAP <15 cm (De la Concha et al. 2017).

Consideraciones sobre la metodología

Pocos estudios han analizado exhaustivamente el conjunto de servicios que ofrece el bosque urbano (Davies et al. 2017; Dobbs et al. 2011). De hecho, la mayoría de los estudios que tratan de cuantificar los servicios de los ecosistemas urbanos se centran en uno solo (Gómez-Baggethun y Barton 2013). Esto significa que las compensaciones y sinergias entre los servicios ecosistémicos - cuando el aumento de la prestación de un servicio puede incrementar o disminuir la prestación de otro - a menudo se ignoran (Grêt-Regamey et al. 2013), al igual que los servicios ecosistémicos adversos que proporcionan los árboles. En este estudio fue posible reportar sobre cuatro servicios ecosistémicos, dando las bases para una valoración integral de la mayoría de los beneficios de los árboles en la ciudad. Con respecto a los efectos adversos de los árboles, el modelo utilizado no analiza este factor. Sin embargo, los resultados obtenidos permiten establecer una ruta de priorización para la plantación de más árboles, para el mantenimiento de estos y para la compensación por los servicios ecosistémicos, donde es necesario incluir el análisis de los efectos negativos, así como

valorar servicios ecosistémicos generalmente ausentes de los modelos de valoración sistemáticos, por ejemplo, la percepción social sobre belleza escénica y los beneficios en la salud.

El inventario forestal -en el que se sustenta el modelo iTree Eco-, se basa en métodos estadísticos e inventarios de parcelas forestales sobre el terreno, que son de alto costo, requieren mucho tiempo y están restringidos espacialmente. Otra de las principales limitaciones de iTree Eco, al igual que la mayoría de los modelos de cuantificación de servicios ecosistémicos es que las funciones del ecosistema forestal urbano no pueden medirse fácilmente en el terreno y requieren procedimientos de modelización para cuantificar y demostrar los efectos y valores del bosque urbano (Nowak et al. 2008). Sin embargo, no se ha logrado aún sustituir los inventarios forestales tradicionales, estos se utilizan y se seguirán utilizando para generar información localizada de especies que alimentarán modelos de correlación con sensores remotos (Ortiz-Reyes et al. 2015). Avanzar en investigación que combine el trabajo de campo inicial (inventarios forestales) con las tecnologías de sensores remotos es crucial para mejorar la cuantificación de los servicios del ecosistema urbano y lograr mostrar el tipo de bosque y la distribución de las especies arbóreas a nivel regional y nacional (Hoschilo y Lewandowska 2019).

Implicaciones para la sostenibilidad, la planificación municipal y sensibilización social

Para garantizar la sostenibilidad de las ciudades, son muchos los esfuerzos que se han generado y se siguen promoviendo en Costa Rica por parte del sector público, privado, organizaciones y la ciudadanía. Por ejemplo, en el sector público se identificaron 38 políticas que tienen alguna vinculación con este tema (CEGESTI 2015).

Los resultados de este estudio aportan a dos grandes desafíos definidos a nivel país: a) el del medio ambiente como dimensión de bienestar y 2) el acuerdo universal para combatir el cambio climático e impulsar medidas e inversiones para un futuro bajo en emisiones de carbono, resiliente y sostenible”, se aporta específicamente al desarrollo de métricas que permitan disponer de un conjunto de indicadores medibles, reportable y verificable que sirva para conocer la situación actual del país, e indirectamente, contribuyan al desarrollo de capacidades humanas y la educación y sensibilización de la población para aportar con acciones concretas de prevención, mitigación y adaptación al cambio climático (MIDEPLAN 2018). Es importante destacar el valor agregado de esta investigación a la sensibilización social, particularmente, con el involucramiento de jóvenes con formación ambientalista, que, al participar en la toma de datos, además de adquirir nuevas destrezas y habilidades, se apropian de la importancia de los bosques urbanos y son agentes de réplica y escalamiento en sus comunidades.

Particularmente en Costa Rica, herramientas de gestión municipal como los planes reguladores, principal instrumento de que disponen los municipios para controlar y planificar el desarrollo urbano y rural de sus territorios (IFAM 2003), los planes de regulación costera (ICT 2017) y los planes de ordenación del territorio (MIVAH 2012) tienen el potencial de incorporar este tipo de resultados, facilitando de esta forma los mecanismos reguladores y de incentivos para el mantenimiento, restauración, enriquecimiento del bosque urbano, donde se resalta el valor que tendría el establecimiento de un corredor biológico interurbano con el río Turrialba y sus tributarios como ejes centrales de conectividad, retomando la evidencia de que estos ecosistemas son los que prestan la mayor cantidad de servicios ecosistémicos generados por los árboles.

El diseño, la planificación y la gestión de sistemas urbanos complejos requieren que estos ecosistemas sean resilientes al cambio sistémico, y que se gestionen de forma sostenible para proporcionar servicios críticos de los ecosistemas (McPhearson et al. 2014). Bajo este enfoque, los ODS (Objetivos de Desarrollo

Sostenible) y sobre todo el 11 ofrecen una hoja de ruta para lograr un desarrollo urbano más equilibrado y equitativo, contribuyendo a lograr una visión más sostenible del desarrollo urbano que brinde iguales oportunidades a todos los habitantes, promueva entornos saludables con acceso a espacios verdes, y que sea resiliente frente a desastres y riesgos climáticos.

Conclusiones

El ecosistema urbano de Turrialba actualmente provee servicios ecosistémicos clave para contribuir con la construcción de resiliencia en la ciudad, así como también, para su desarrollo sostenible. Aunque no se valoraron todos los potenciales servicios ecosistémicos que provee el arbolado urbano, los servicios clave aquí reportados estarían aportando un monto de 61 137 USD anuales, estimados a partir del área piloto analizada. Este análisis al mismo tiempo aporta métricas concretas con potencial para reportar en la medición del avance en el cumplimiento de las metas ODS de Costa Rica, particularmente, el ODS 11. Asimismo, mantener las franjas ribereñas del río Turrialba y sus tributarios, en su paso por el casco urbano de Turrialba, aporta la mayor cantidad de servicios ecosistémicos derivados de los árboles que todavía alberga y donde existe aún un importante potencial de incluir nuevas plantaciones.

Contribución de los autores

Laura Benegas Negri: Conceptualización, investigación, metodología, redacción, revisión y edición. Adolfo Rojas: Investigación, metodología, análisis formal, validación y visualización. Alberto Iraheta: Investigación, metodología, análisis formal, validación y visualización. Jeanette Cardenas: gestión de recursos, redacción-revisión

Agradecimientos

Este trabajo fue posible gracias a las alianzas de apoyo y cooperación con la Municipalidad de Turrialba, el Colegio Ambientalista de Pejibaye, el INDER (Instituto Nacional de Desarrollo Rural) y la *Technical University of Denmark- DTU, Department of Environmental Engineering*. Agradecemos el apoyo logístico de la municipalidad e INDER, y la participación en la toma de datos de campo de parte de los 11 estudiantes del colegio Ambientalista de Pejibaye, a Helena Despujols de la Universidad Técnica de Dinamarca- DTU, Jhoan Martínez y Eliobeth Cueto del CATIE, por su participación en todo el proceso de esta investigación.

Referencias

- Alberti, M., Marzluff, J.M., Shulenberger, E., Bradley, G., Ryan, C., Zumbunnen, C. 2003. Integrating humans into ecology: Opportunities and challenges for studying urban ecosystems. *BioScience* 53: 1169–1179. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2003\)053\[1169:IHIEOA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2003)053[1169:IHIEOA]2.0.CO;2)
- Albert, C., Schröter, B., Haase, D., Brilling, M., Henze, J., Herrmann, S., et al. 2019. Addressing societal challenges through nature-based solutions: How can landscape planning and governance research contribute? *Landsc. Urban Plan* 182: 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2018.10.003>
- Alvarado-Rosales, D., Saavedra-Romero, L.D. 2012. *Fase 3. Manual de campo- copa: mediciones y muestreo*. Basado en la versión 4.0. Octubre, 2007 del inventario forestal de Estados Unidos de Norte América. CONAFOR. México. 18 p.
- Bustamante, M.M.C., Roitman, I., Aide, T.M., Alencar, A., Anderson, L.O., Aragão, L., et al. 2016. Toward an integrated monitoring framework to assess the effects of tropical forest degradation and recovery on carbon stocks and biodiversity. *Global. Change. Biol* 22: 92–109. <https://doi.org/10.1111/gcb.13087>
- Cabezas, F., Morales, C., Formoso, C., Rodríguez, J.E., Matamoros, Y. (Eds.) 2016. *Taller de Priorización de Especies para la Restauración del Río Torres*. 2015. Parque Zoológico y Jardín Botánico Simón Bolívar San José, Costa Rica. Grupo de Especialistas en Conservación y Reproducción - UICN/SSC (CBSG Mesoamérica). 60 p.
- Carmona-Galindo, V., Carmona, T. 2013. *La Diversidad de los Análisis de Diversidad*. Biology Faculty Works. 28. Disponible en: http://digitalcommons.lmu.edu/bio_fac/28.
- CEGESTI (Fundación Centro de Gestión Tecnológica e Informática Industrial) 2015. *Informe Final: Mapeo nacional de políticas e iniciativas en consumo y producción sostenible*. Informe elaborado para el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente y para el Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica. 88 p. Disponible en: http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/informe_mapeo_de_iniciativas_en_pycs-version_final.pdf
- Christ, R. *ADP technical expert meeting: Urban environment*; Statement by Renate Christ. 2014. In Proceedings of the Bonn Climate Change Conference, Bonn, Germany, 10 June 2014; IPCC Secretariat: Geneva, Switzerland, p. 2.
- Clerici, N., Rubiano, K., Abd-Elrahman, A., Posada Hoestettler, J., Escobedo, F. 2016. Estimating aboveground biomass and carbon stocks in periurban andean secondary forests using very high-resolution imagery. *Forests* 7: 138. <https://doi.org/10.3390/f7070138>
- California Climate Action Registry. 2008. *Urban forest project reporting protocol*. V.1. [Consultado 22 mayo 2020]. Disponible en: <http://www.climateregistry.org/resources/docs/protocols/progress/urban-forest/urban-forestprotocol-final-082008.pdf>.
- Council of Tree and Landscape Appraisers (CTLA) 2018. *Guide for Plant Appraisal*, 10th Edition. International Society of Arboriculture, Champaign IL, Estados Unidos. ISBN 978-1-943378-02-9.
- Daily, G., Alexander, S., Ehrlich, P., Goulder, L., Lubchenco, L., Matson, P., Mooney, H., Postel, S., Schneider, S., Tilman, D., Woodwell, D. 1997. Ecosystem Services: Benefits Supplied to Human Societies by Natural Ecosystems. *Issues in Ecology* 1 (2): 1-18.
- David, J.N., 2002. Compensatory value of urban trees in the United States. *Journal of Arboriculture*, 28(40): 194-199.
- Davies, H., Doick, K., Handley, P., O'Brien, L., Wilson, J. 2017. *Delivery of ecosystem services by urban forests*. Forestry Commission Research Report. Forestry Commission, Edinburgh, Reino Unido. 37 p.
- De la Concha, H. 2016. *Inventario del arbolado urbano de la ciudad de Mérida*. Ayuntamiento de Mérida-Agrinet SA de CV. San Cristobal, México. 62 p.
- De la Concha, H., Sanchez, E., Pech, C. 2017. *Resultados del censo del arbolado de Parque La Ceiba 2017*. Playa del Carmen, Quintana Roo, México. 91 p.
- Dobbs, C., Escobedo, F.J., Zipperer, W.C. 2011. A framework for developing urban forest ecosystem services and goods indicators. *Landscape and urban planning* 99(3-4), 196-206. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.004>
- Dushkova, D., Haase, D. 2020. Not Simply Green: Nature-Based Solutions as a Concept and Practical Approach for Sustainability Studies and Planning Agendas in Cities. *Land* 9(1):19. <https://doi.org/10.3390/land9010019>
- Dwyer, J., McPherson, E., Schroeder, H., Rowntree, R. 1992. Assessing the benefits and costs of the urban forest. *Journal of Arboriculture* 18: 227–234.
- European Environmental Agency 2011. *Green infrastructure and territorial cohesion. The concept of green infrastructure and its integration into policies using monitoring systems*. European Environment Agency. Technical report No.18. Luxembourg-EEA. 142 p.
- Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V. Pérez-Gómez, G. 2017. La importancia de los ríos como corredores interurbanos. *Biocenosis*. 31 (1-2): 39-45. <https://revistas.uned.ac.cr/index.php/biocenosis/article/view/1725>
- Gómez-Baggethun, E., Barton, D.N. 2013. Classifying and valuing ecosystem services for urban planning. *Ecological economics* 86: 235–245.
- Grêt-Regamey, A., Celio, E., Klein, T.M., Hayek, U.W. 2013. Understanding ecosystem services trade-offs with interactive procedural modeling for sustainable urban planning. *Landscape and urban planning* 109(1):107–116. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.011>
- Haase, D., Larondelle, N., Andersson, E., Artmann, M., Borgström, S., Breuste, J., Gomez-Baggethun, E., Gren, Å., Hamstead, Z., Hansen, R., Kabisch, N. 2014. A quantitative review of urban ecosystem service assessments: concepts, models, and implementation. *Ambio* 43(4): 413–433. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0504-0>

- Hirabayashi, S. 2013. *i-Tree Eco precipitation interception model descriptions*. The Davey Tree Expert Company. Syracuse, NY. Estados Unidos. 21 p. Disponible en : https://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Precipitation_Interception_Model_Descriptions.pdf.
- Hirabayashi, S., Kroll, C.N., Nowak, D.J. 2015. *i-Tree Eco dry deposition model descriptions*. The Davey Tree Expert Company. Syracuse, NY. Estados Unidos. Disponible en: http://www.itreetools.org/eco/resources/iTree_Eco_Dry_Deposition_Model_Descriptions.pdf
- Hitchmough, J. 2011. Exotic plants and plantings in the sustainable, designed urban landscape. *Landscape and Urban Planning* 100 (4): 380-382. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.02.017>
- Hościło, A., Lewandowska, A., 2019. Mapping Forest Type and Tree Species on a Regional Scale Using Multi-Temporal Sentinel-2 Data. *Remote Sensing* 11(8), 929. <http://dx.doi.org/10.3390/rs11080929>
- Hoyle, H., Hitchmough, J., Jorgensen, A. 2017. Attractive, climate-adapted and sustainable? Public perception of non-native planting in the designed urban landscape. *Landscape and Urban Planning* 164: 49-63. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2017.03.009>
- Instituto Costarricense de Turismo (ICT) 2017. *Plan Nacional de Desarrollo Turístico de Costa Rica*. Dirección de Planeamiento y Desarrollo. San José, Costa Rica. 130 p.
- Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM) 2003. *Los Planes Reguladores en Costa Rica: Cantonales y Costeros*. Serie Ordenamiento Territorial, N°2. Instituto de Fomento y Asesoría Municipal (IFAM), Dirección de Gestión Municipal, Sección de Investigación y Desarrollo, San José, Costa Rica.
- iTree Report. 2017. *i-Tree Ecosystem analysis*. Ciudad Nueva Dominican Republic. Urban forest effects and values. iTree. 33 p. Disponible en: https://www.itreetools.org/documents/395/a01__iTree%20ColonialCity_eng_mar16.pdf.
- Kim, G. 2016. Assessing urban forest structure, ecosystem services, and economic benefits on vacant land. *Sustainability*, 8(7): 679. <https://doi.org/10.3390/su8070679>
- Kuers, K. 2005. *Ranking Species Contribution to Forest Community Composition: Calculation of Importance Value*. Consultado el 22 de julio del 2020. Disponible en: http://static.sewanee.edu/Forestry_Geology/watershed_web/Emanuel/ImportanceValues/ImpVal_SET.html.
- Lin, J., Kroll, C.N., Nowak, D.J., Greenfield, E.J. 2019. A review of urban forest modeling: Implications for management and future research. *Urban Forestry and Urban Greening* 43: 126366. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2019.126366>
- McCarthy, B.C., Brown, K.J. 2004. *Species diversity concepts*. Department of Environmental and Plant Biology, Ohio University. Athens, OH, Estados Unidos. Disponible en: www.plantbio.ohiou.edu/epb/instruct/ecology/LEC5.pdf.
- McKinsey Global Institute 2011. *Urban World: Mapping the economic power of cities*. McKinsey & Company. 12 p. Consultado el 22 de julio del 2020. Disponible en: <https://es.calameo.com/books/000046992858be277fe71>
- McPhearson, T. 2011. Toward a sustainable New York City: Greening through urban forest restoration. En: Slavin, M. (ed.), *The Triple Bottom Line: Sustainability Principles, Practice, and Perspective in America's Cities*, pp.181–204. Island Press. Washington, D.C., Estados Unidos.
- McPhearson, T., Hamstead, Z.A., Kremer, P. 2014. Urban Ecosystem Services for Resilience Planning and Management in New York City. *AMBIO* 43: 502–515. <https://doi.org/10.1007/s13280-014-0509-8>
- McPherson, E.G. 1998. Atmospheric carbon dioxide reduction by Sacramento's urban forest. *J Arboric* 24(4): 215–223.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC., Estados Unidos, 155 p.
- Mella, J.M., López, A. 2015. *Ciudades sostenibles: análisis y posibles estrategias*. 9 p. Disponible en: http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-50/jose_mella_y_asuncion_lopez.pdf
- Ministerio de Planificación y Política Económica (MIDEPLAN). 2018. *Política Nacional de Producción y Consumo Sostenibles 2018 – 2030*. En colaboración con el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE), Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto (MREC). San José, Costa Rica. 124 p. Disponible en: http://www.digeca.go.cr/sites/default/files/documentos/politica_nacional_de_produccion_y_consumo_sostenibles.pdf
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente 2012. *El Libro Verde de Sostenibilidad Urbana y Local en la Era de la Información*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente y la Agencia de Ecología Urbana de Barcelona. Varios Autores. Secretaría General Técnica, Centro de Publicaciones. Madrid, España. 697 p. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/medio-ambiente-urbano/Libro%20Verde%20Final_15.01.2013_tcm30-181854.pdf
- MIVAH 2012. *Política Nacional de Ordenamiento Territorial* 2012 a 2040. Ministerio de Vivienda y Asentamientos Humanos. República de Costa Rica. 40 p. Disponible en: https://www.mivah.go.cr/Documentos/politicas_directrices_planes/pnot/PNOT_2012-2040.pdf
- Mullaney, J., Lucke, T., Trueman, S.J. 2015. A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134: 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.10.013>
- Nowak, D.J., Crane, D.E., Stevens, J.C., Hoehn, R.E., Walton, J.T., Bond, J., 2008. A ground-based method of assessing urban forest structure and ecosystem services. *Aboriculture and Urban Forestry* 34 (6): 347-358.
- Nowak, D., Crane, D. 2002. Carbon storage and sequestration by urban trees in the USA. *Environmental pollution* 116(3): 381-389. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00214-7](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00214-7)
- Nowak, D., Crane, D. 1998. The Urban Forest Effects (UFORE) Model: Quantifying urban forest structure and functions. *Integrated Tools Proceedings*: 714–720.
- Nowak, D., Crane, D. 2000. The urban forest effects (UFORE) model: quantifying urban forests structure and functions. En: Hansen, M., Burk, T. (Eds). *Integrated tools for natural resources inventories in the 21st century*. General Technical Report (GTR) NC-212. US Dept. of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. St. Paul, MN. Estados Unidos.
- Nowak D.J., Dwyer J.F. 2007. Understanding the Benefits and Costs of Urban Forest Ecosystems. En: Kuser J.E. (eds) *Urban and Community Forestry in the Northeast*. Springer, Dordrecht, Países Bajos. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-4289-8_2
- ONU. 2018. *World Urbanization Prospects 2018*. Department of Economic and Social Affairs. Population Dynamics. Consultado: 10 de agosto 2019. Disponible en: <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/>
- Ordóñez, C., Grant, A., Millward, A.A., Steenberg, J. and Sabetski, V. 2019. Developing Performance Indicators for Nature-Based Solution Projects in Urban Areas: The Case of Trees in Revitalized Commercial Spaces. *Cities and the Environment (CATE)*, 12(1), p.1. Disponible en: <https://digitalcommons.lmu.edu/cate>
- Ortiz-Reyes, A.D., Valdez-Lazalde, J. R., los Santos-Posadas, D., Héctor, M., Ángeles-Pérez, G., Paz-Pellat, F., Martínez-Trinidad, T. 2015. Inventario y cartografía de variables del bosque con datos derivados de LiDAR: comparación de métodos. *Madera y bosques* 21(3): 111-128. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61743002008>
- Pascual, U., Balvanera, P., Díaz, S., Pataki, G., Roth, E., Stenseke, M., et al. 2017. Valuing nature's contributions to people: the IPBES approach, *Current Opinion in Environmental Sustainability* 26–27: 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2016.12.006>
- Pearson, T.R.H., Brown, S., Murray, L., Sidman, G. 2017. Greenhouse gas emissions from tropical forest degradation: an underestimated source. *Carbon Balance Manage* 12:3. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0072-2>
- Perez, M., Olivero, S., Meléndez-Ackerman, E. 2017. sf. *Protocolo medición de campo i-Tree Eco V6*. 12 p. Disponible en: <https://www.itreetools.org/tools>
- Raum, S., Hand, K.L., Hall, C., Edwards, D.M., O'Brien, L., Doick, K.J. 2019. Achieving impact from ecosystem assessment and valuation of urban greenspace: The case of i-Tree Eco in Great Britain. *Landscape and Urban Planning*, 190: 103590. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2019.103590>
- Reynolds, C., Escobedo, F., Clerici, N., Zea-Camaño, J. 2017. "Does "Greening" of Neotropical Cities Considerably Mitigate Carbon Dioxide Emissions? The Case of Medellín, Colombia," *Sustainability* 9(5):1-16. <https://doi.org/10.3390/su9050785>
- Reyes, S., Barbosa, O., Celis-Diez, J., De la Barrera, F. 2018. Ecosistemas Urbanos. Capítulo 5.4 Diversidad de Ecosistemas. *Biodiversidad de Chile, Patrimonios y Desafíos*. Min Ambiente. 15 p. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/326257890_Ecosistemas_Urbanos

- Rodríguez, S. 2019. *Reportaje Ojo Al Clima*. Octubre 2019. [Consultado: agosto 2020]. Disponible en: <https://ojoalclima.com/ministerio-de-ambiente-creara-nueva-categoria-de-area-protegida-para-bosques-urbanos/>
- Rosenthal, J.K., Crauderueff, R., Carter, M. 2008. *Urban Heat Island Mitigation Can Improve New York City's Environment*. Sustainable South Bronx. New York, NY, Estados Unidos.
- Roy, S., Byrne, J., Pickering, C. 2012. A systematic quantitative review of urban tree benefits, costs, and assessment methods across cities in different climatic zones. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(4): 351-363. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.06.006>
- Ryan, H.D.P. 1985. Vegetation's impact on urban infrastructure. *Journal of Arboriculture* 11(4):112–115.
- Scott, M., Lennon, M., Haase, D., Kazmierczak, A., Clabby, G., Beatley, T. 2016. Nature-based solutions for the contemporary city. *Plan. Theory Practice* 17: 267–300. <https://doi:10.1080/14649357.2016.1158907>
- Scott, J.L., Betters, D.R. 2000. Economic analysis of urban tree replacement decisions. *Journal of Arboriculture* 26(2):69–77.
- Seto, K.C., Güneralp, B., Hutyra, L.R. 2012. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *PNAS* 109: 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K., Bernhardt, J., Bierbower, W., et al. 2020. *InVEST 3.8.7. User's Guide*. The Natural Capital Project, Stanford University, University of Minnesota, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund. Disponible en: <http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/>
- Silk, J.F., Paoli, G., McGuire, K., Amaral, I., Barroso, J., Bastian, M., et al. 2013. Large trees drive forest aboveground biomass variation in moist lowland forests across the tropics. *Global ecology and biogeography* 22(12):1261-1271. <https://doi.org/10.1111/geb.12092>
- Terán-Valdez A., Duarte, N., Pérez, A., Cuesta, F., Pinto, E. 2018. Selección de especies potenciales para la restauración. En: Proaño, R., Duarte, N., Cuesta, F., Maldonado, G. (Eds.). *Guía para la restauración de bosques montanos tropicales*, módulo 3, CONDESAN. Quito, Ecuador. 40 p.
- ONU (United Nations), 2015. *Ciudades sostenibles pro qué son importantes*. 2 p. Disponible en: https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/wp-content/uploads/sites/3/2016/10/11_Spanish_Why_it_Matters.pdf.
- UN-Habitat, 2011. "Hot Cities: Battle-ground for Climate Change" United Nations. 2 p. Disponible en: https://mirror.unhabitat.org/downloads/docs/e_hot_cities.pdf.
- Zamora, N. 2010. Fabaceae. En: Hammel, B., Grayum, M., Herrera, C., Zamora, N. (eds.). *Manual de plantas de Costa Rica V. Dicotiledóneas (Clusiaceae-Gunneraceae)*. Botanical Garden Press, Saint Louis, Estados Unidos.