

Universidad Nacional Costa Rica

Facultad de Tierra y Mar

Escuela de Ciencias Ambientales (Edeca)

Trabajo final de graduación para optar por el grado de licenciatura en Ingeniería en Ciencias

Forestales con énfasis en Manejo Forestal

Valores de referencia de biomasa aérea para la vegetación arbórea urbana y periurbana, Heredia,  
Costa Rica

Elaborado por:

Bach. Wendy Bolaños Calderón

Heredia, 2022

Trabajo final de graduación bajo la modalidad de proyecto de graduación, para optar con el grado de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias Forestales con Énfasis en Manejo Forestal.

---

**M.Sc. Gustavo Hernández Sánchez**  
**Representante Decanato de Facultad**  
**de Ciencias de la Tierra y el Mar**

---

**Dr. Luis Diego Alfaro Alvarado**  
**Representante Dirección EDECA**

---

**M. Sc. Ronny Villalobos Chacón**  
**Tutor del trabajo**

---

**M. Sc. Marilyn Rojas Vargas**  
**Lectora del trabajo**

---

**Lic. Roberto Rodríguez Sánchez**  
**Lector del trabajo**

---

**Bach. Wendy Bolaños Calderón**  
**Postulante del trabajo**

## **Agradecimientos**

Para iniciar, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento a mi Comité Asesor; a mi tutor el M. Sc. Ronny Villalobos, por apoyarme desde el inicio con la construcción del trabajo, la paciencia y dedicación con mi proyecto y en especial por todo el aprendizaje y aportes en busca de mi superación.

A mis lectores, por aceptar ser parte de mi proceso, por todo el apoyo, su tiempo, predisposición y dedicación en mi tema de investigación, por sus aportes y observaciones para la mejora de mi trabajo.

Quiero hacer un agradecimiento muy especial a mi compañera y amiga incondicional, Sofía Hernández Garita, por ser mi apoyo siempre, por el tiempo y colaboración brindado en la toma de datos en campo sin obtener nada a cambio, para hacer posible este trabajo.

## **Dedicatoria**

El presente trabajo de investigación quiero dedicarlo a Dios, a mi madre, María de los Ángeles y a mi padre, Carlos, por todo su esfuerzo, apoyo y sacrificio para darme la oportunidad de estudiar una carrera universitaria. Por ser mi ejemplo de lucha diaria, por alentarme siempre a salir adelante y no dudar de mis capacidades, por todo el amor, los valores y habilidades que han desarrollado en mí. Mami y papi los amo infinitamente.

A mis hermanas y sobrina, por ser una motivación extra para lograr todos mis sueños y anhelos.

A mi novio, por siempre estar para mí, por ser mi apoyo para seguir siempre adelante y superarme, por creer en mí siempre y en este proceso y hacerme sentir orgullosa de mí misma, te amo.

Hoy tras tanto esfuerzo y dedicación quiero dar gracias a Dios y a la vida por un logro más, deseando que sea uno de muchos más que estén por venir.

## Resumen

Los árboles cumplen un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida de los habitantes en las ciudades y entre sus funciones más relevantes ayudan a la mitigación de los efectos del cambio climático actuando en la captura y almacenamiento de carbono y  $\text{CO}_2$ . En Costa Rica estudiar esta dinámica de secuestro de carbono en áreas urbanas y periurbanas se considera muy costoso, ya que existe un acceso muy limitado para la toma de datos al tratarse, en muchos casos, de áreas privadas. Por esto, el presente estudio tiene como objetivo identificar el potencial de mitigación del cambio climático de la vegetación arbórea urbana y periurbana para diseñar valores de referencia de almacenamiento de carbono como herramienta para la implementación de ciudades sostenibles. Para esto, se llevó a cabo un censo de todos los árboles urbanos y periurbanos ubicados en áreas públicas, ya sea aceras, a orillas de las calles, parques públicos y bulevares, en los distritos Mercedes, Santa Lucía y Heredia, de la provincia de Heredia. Para cada árbol se tomó el dato del diámetro a la altura de pecho (DAP 1,30 m), altura, diámetro de copa, especie y ubicación con GPS. Posteriormente, se aplicaron las fórmulas correspondientes para determinar la composición arbórea de los distritos y cuantificar la captura y almacenamiento de biomasa, carbono y  $\text{CO}_2$  para cada uno de los individuos arbóreos; donde se obtuvo un DAP promedio de 29,9 cm y se presentó una concentración de biomasa de 265,26 Mg y un reservorio de carbono de 124,67 Mg. En promedio, un árbol en las condiciones de los distritos censados tiene un reservorio de 0,15 Mg de C y 0,56 Mg de  $\text{CO}_2$ , con una cobertura de copa promedio de 4,3 m y altura promedio de 5,5 m. Adicionalmente, se ubicó la imagen satelital de cada uno de los individuos censados, para realizar el procesamiento en Qgis y obtener el área de cobertura de copa, en busca de generar una relación con el DAP y crear un cuadro de distribución por cobertura de copa de biomasa, carbono y  $\text{CO}_2$  para predecir y monitorear el almacenamiento de carbono (arriba del suelo, en el fustal) en la vegetación urbana y periurbana como herramienta para la implementación de ciudades sostenibles. Por último, se concluyó que se evidencia el potencial en los sitios en estudio para la captura y almacenamiento de  $\text{CO}_2$  en los próximos años debido a la mayor cantidad de individuos jóvenes, recalando la importancia del manejo y planificación adecuada de la arborización urbana para obtener incrementos positivos. Además, queda reflejado en los resultados del presente estudio, que la metodología aplicada para el procesamiento de las imágenes satelitales generó mejores resultados en espacios con menor densidad o en espacios más abiertos, con menor tangencia de copas. Esto resultó deficiente y limitante en sitios que presentan mayor densidad de individuos arbóreos.

## Tabla de contenido

Capítulo I. Introducción .....	1
1.1. Objetivos.....	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos. ....	3
Capítulo II. Marco teórico.....	4
2.1. Cambio climático.....	4
2.2. Ciudades sostenibles.....	4
2.3. Arbolado urbano .....	6
2.4. Captura de carbono y CO <sub>2</sub> en árboles urbanos y periurbanos .....	7
2.5. Métodos de cuantificación de biomasa.....	7
Capítulo III. Marco metodológico.....	10
3.1. Descripción del área de estudio .....	10
3.2. Fase 1 .....	10
3.2.1. Levantamiento de datos en campo.....	10
3.2.2. Edición de los datos de campo.....	11
3.3. Fase 2. Cálculo de la cobertura de copa a través de imágenes satelitales en QGis .....	12
3.4. Fase 3. Construcción del cuadro de distribución por cobertura de copa de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> .....	15
Capítulo IV. Resultados y discusión .....	16
4.1. Resultados y discusión de datos tomados en campo .....	16

4.1.1. Composición arbórea de los tres distritos censados en zona urbana y periurbana. ....	16
4.1.2. Concentración de biomasa y secuestro de carbono y CO <sub>2</sub> de árboles urbanos y periurbanos.....	19
4.2. Resultados y discusión de datos que se generaron a través del procesamiento de imágenes satelitales .....	23
4.2.1. Cobertura de copa de los árboles urbanos y periurbanos muestreados a través del procesamiento de imágenes satelitales. ....	23
4.3. Cuadro de distribución por cobertura de copa de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> para predecir y monitorear el almacenamiento de carbono (arriba del suelo) en la vegetación urbana y periurbana como herramienta para la implementación de ciudades sostenibles .....	27
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones .....	31
Referencias bibliográficas .....	32
Anexos.....	42

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Representación geográfica de árboles urbanos y periurbanos censados por distrito, en la provincia de Heredia, Costa Rica, 2020-2022.....	11
<b>Figura 2</b> Segmentación de la imagen .....	13
<b>Figura 3</b> Cuadro de atributos que brinda la herramienta Zonal Statistics para cada área segmentada .....	14
<b>Figura 4</b> Área de la copa producto del procesamiento de la imagen .....	15
<b>Figura 5</b> Número de individuos censados por clase diamétrica según distrito .....	17
<b>Figura 6</b> Número de individuos promedio según clase diamétrica .....	17
<b>Figura 7</b> Cobertura de copa promedio (m) de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica .....	20
<b>Figura 8</b> Concentración de biomasa (Mg), reservorio de carbono (Mg) y captura de CO <sub>2</sub> (Mg) de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica para diciembre de 2020 y enero de 2021 .....	21
<b>Figura 9</b> Concentración promedio de biomasa (Mg), carbono (Mg) y CO <sub>2</sub> (Mg) de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica.....	22
<b>Figura 10</b> Número de individuos y % de cobertura de copa según rango de cobertura de copa (m)	24
<b>Figura 11</b> Delimitación de copas del parque central de Heredia, Nicolás Ulloa, distrito Heredia ...	24
<b>Figura 12</b> Datos promedio de cobertura de copa (m) y diferencia promedio entre dato obtenido en campo vs. dato del procesamiento de las imágenes satelitales según rango de cobertura de copa (m) .....	26
<b>Figura 13</b> Delimitación de copas parque Santa Lucía, Barva, Heredia.....	27
<b>Figura 14</b> Diferencia promedio y E (%) de límites de confianza de áreas de cobertura de copa.....	30

## Índice de cuadros

<b>Cuadro 1</b> Datos de áreas de estudio .....	10
<b>Cuadro 2</b> Desglose de fórmulas según variable por evaluar .....	12
<b>Cuadro 3</b> Listado de las cinco especies con mayor número de individuos en el área de estudio .....	18
<b>Cuadro 4</b> Existencia de biomasa, reservorio de carbono y secuestro de CO <sub>2</sub> de los datos tomados en campo de árboles urbano y periurbanos .....	19
<b>Cuadro 5</b> Existencia de carbono, reservorio de carbono y CO <sub>2</sub> y aplicar el uso y procesamiento de imágenes satelitales en árboles urbanos y periurbanos .....	27
<b>Cuadro 6</b> Existencia promedio de biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos del procesamiento de imágenes satelitales, presentados por rango de cobertura de copa (m) .....	29

## Índice de anexos

Anexo 1. Consideraciones para la medición del DAP en campo .....	42
Anexo 2. Formulario para la toma de datos en campo .....	46
Anexo 3. Biomasa, almacenamiento de carbono y captura de CO <sub>2</sub> por especie censada, Heredia, Costa Rica 2020 .....	47
Anexo 4. Biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos tomados en campo presentado por rango de cobertura de copa .....	53
Anexo 5. Biomasa, carbono y CO <sub>2</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos del procesamiento de imágenes presentados por rango de cobertura de copa.....	54
Anexo 6. Diferencia promedio de cobertura de copa en datos tomados en campo vs. datos del procesamiento de imágenes satelitales por rangos de cobertura de copa.....	55

## Simbología y acrónimos

ACLA-P: Área de Conservación La Amistad Pacífico.

C: Carbono.

CBI: Corredores biológicos interurbanos.

CBIMA: Corredor Biológico Interurbano María Aguilar.

CH<sub>4</sub>: Metano.

CMCC: Convención Marco sobre el Cambio Climático.

CNES: Agencia Espacial Francesa.

CO<sub>2</sub>: Dióxido de carbono.

DAP: Diámetro a la altura de pecho (1,30 m).

GAM: Gran Área Metropolitana.

GEF: Fondo Mundial para el Ambiente.

GEI: Gases de efecto invernadero.

GIZ: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit.

GPS: Sistema de posicionamiento global.

IMN: Instituto Meteorológico Nacional.

Minae: Ministerio de Ambiente y Energía.

Minam: Ministerio del Ambiente, Perú.

N<sub>2</sub>O: Óxido nitroso.

ODS: Objetivos de Desarrollo Sostenible.

ONU: Organización de las Naciones Unidas.

PAUP: Población de árboles urbanos y periurbanos

PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.

SIG: Sistemas de información geográfica.

SNIT: Sistema Nacional de Información Territorial

UICN: Conservation International y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza.

WWF: Fondo Mundial para la Naturaleza.

## Capítulo I. Introducción

En el último siglo la temperatura del planeta aumentó, convirtiéndose en una problemática de suma importancia en el ámbito mundial y en tema principal en las agendas empresariales a nivel local e internacional (Molina, 2018). Entre las principales causas se destaca el incremento de los gases de efecto invernadero (GEI), de los cuales el principal es el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Olivier *et al.*, 2005). Estos son producto de la pérdida de sumideros naturales de carbono a causa de la deforestación, el crecimiento de la actividad humana, el desarrollo industrial, mayor uso de combustible fósil, así como el uso de tierras con fines económicos (agricultura y ganadería), entre otras (Challenge, 2009).

Los ecosistemas forestales, además de ser el sustento de las necesidades nutricionales, económicas y culturales de la población, producen las transformaciones del carbono por procesos biológicos y físicos y en ellos se localizan los compartimientos que disminuyen la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub> (Smith *et al.*, 2014). Los bosques urbanos son capaces de producir bienes y generar servicios ecosistémicos que mejoran el bienestar de las personas ciudadanas e incrementan la resiliencia de las ciudades ante la crisis ambiental (Dobbs *et al.*, 2018).

En Costa Rica se ha adquirido una serie de compromisos para contrarrestar las emisiones de GEI y mejorar las condiciones socioambientales. A través de la formulación e implementación de la Estrategia Nacional de Cambio Climático se propuso como meta balancear las emisiones antropogénicas, en parte, mediante las absorciones de carbono por los sumideros (Minaet, 2009). En la 22.<sup>a</sup> Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático se reconoció el papel fundamental de las ciudades para alcanzar los objetivos sostenibles establecidos en el Acuerdo de París. En esta conferencia se acordó que:

Debido a que las ciudades son la principal fuente de emisiones de carbono y contienen la mayor parte de la población humana (ONU- Hábitat, 2011), las iniciativas más importantes de mitigación y adaptación al cambio climático deberán implementarse en las zonas urbanas (Borrelli *et al.*, 2018, s. p.).

Es importante mostrarle a la ciudadanía los beneficios que generan los árboles y la competitividad de usos alternativos, debido a que contrarrestar con elementos naturales la contaminación ambiental generada en las zonas urbanas es cada vez más difícil (Nowak *et al.*, 2007). Los árboles generan servicios a la sociedad y al ecosistema y brindan beneficios en el ámbito ambiental, económico y

social, al ser espacios que se utilizan para recreación, convivencia social, entre otras actividades (Barboza, 2016).

La manera en que se divulga la información acerca del papel que cumple el arbolado urbano y de qué forma mejoran el bienestar humano tiene repercusiones en la toma de decisiones. La información recabada a través de métodos indirectos en bosques naturales tiende a sobrestimar el carbono de los bosques urbanos, por lo que generalmente requiere de ajustes (Nowak, 1994).

En la evaluación de la biomasa en áreas urbanas, generalmente, los individuos que se encuentran en propiedad privada o son de difícil acceso quedan fuera del inventario, ya que se requeriría un permiso en muchos casos legal, para ingresar a la propiedad privada, lo que hace el proceso más lento y costoso (Koch, 2013). Cordero (2018) menciona que el procedimiento tradicional (mediciones manuales mediante un recorrido terrestre del área en estudio) puede ser inflexible en términos de tiempo y exactitud de la información y está sujeta a errores por parte del ser humano.

La teledetección para la toma de datos es una herramienta que permite tomar información de áreas terrestres inaccesibles o de difícil acceso, inventariar una cobertura total de área en un plazo menor, reducir la intensidad del muestreo y con esto sus costos (Koch, 2013). Por medio de las imágenes satelitales resulta más accesible tomar el dato del diámetro de copa. Un estudio realizado en Perú por Malleux (1970), sobre la relación del diámetro a la altura de pecho con el diámetro de copa en un bosque húmedo subtropical, concluyó que esto es posible mediante el uso de fotografías aéreas. Además, permite la estimación del potencial volumétrico del bosque mediante esa relación entre los diámetros. Por su parte, en Costa Rica, Rodríguez (2014) llevó a cabo el inventario de emisiones-absorciones de gases de efecto invernadero en el sector forestal y uso del suelo del cantón de Belén, utilizando teledetección (Rodríguez, 2014).

Tras investigar, se identificaron algunas de las investigaciones referentes al potencial de mitigación del cambio climático de la vegetación arbórea urbana en nuestro país, las cuales se han centrado en el método tradicional (toma de datos en campo), principalmente. Barboza (2016) llevó a cabo un estudio que consistió en la selección de especies para el arbolado urbano a partir del análisis de 10 parques urbanos del cantón de Curridabat; La revista *Ambientico* en su edición de abril-mayo de 2013 publicó una serie de artículos en los que trata el arbolado urbano, su importancia, beneficios que genera en las ciudades, entre otros temas (Jiménez *et al.*, 2013). Además del análisis del potencial de reservorio de CO<sub>2</sub> en los bosques urbanos por Carbonell (2016) y la estimación del carbono almacenado en el distrito central de Heredia por Avellán (2018).

Tras lo anterior, surge la necesidad de prestar más atención a la gestión y protección adecuada de los ecosistemas urbanos, al ser zonas estratégicas para el desarrollo de los proyectos e investigaciones sustentables. El presente proyecto propone desarrollar una propuesta metodológica para monitorear la biomasa arriba del suelo (fustales, todos aquellos individuos mayores o iguales a 10 cm de DAP) en la vegetación arbórea urbana y periurbana mediante la teledetección que permita establecer valores de referencia de almacenamiento de carbono, información requerida para la toma de decisiones en cuanto al establecimiento y consolidación de ciudades sostenibles.

## **1.1. Objetivos**

**1.1.1. Objetivo general.** Identificar el potencial de mitigación del cambio climático de la vegetación arbórea urbana y periurbana a través del diseño de valores de referencia de almacenamiento de carbono como herramienta para la implementación de ciudades sostenibles.

### **1.1.2. Objetivos específicos.**

1. Determinar la composición arbórea ubicada en zonas urbanas y periurbanas a través de un inventario, para la evaluación de la biomasa arbórea arriba del suelo (fustales) por medio de variables dasométricas del árbol.
2. Cuantificar la cobertura de copa de los árboles urbanos muestreados a través del procesamiento de imágenes satelitales para la construcción de un cuadro de distribución de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>.
3. Desarrollar una herramienta de estimación de carbono en el arbolado urbano para la implementación de ciudades sostenibles.

## Capítulo II. Marco teórico

### 2.1. Cambio climático

Según Díaz (2012), la Convención Marco sobre el Cambio Climático (CMCC) en su artículo 1 define el cambio climático (CC) como: un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observado durante períodos de tiempo comparables.

Un ejemplo claro es la degradación de los ecosistemas producto de la combustión de los vehículos, la producción de energía y de la actividad humana en general que produce un gran crecimiento económico y tiene repercusiones negativas en el ámbito social y ambiental (Díaz, 2012). La composición de la atmósfera se ha visto afectada y, ahora, es capaz de atrapar mayor cantidad de luz infrarroja o calor. El aumento de la concentración de los gases con efecto invernadero (GEI), principalmente de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) y óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ), está calentando la Tierra y esto genera un aumento paulatino en la temperatura, ya que atrapan la radiación infrarroja y permanecen mucho tiempo en la atmósfera. Esto provoca que se pierda menos calor de la Tierra hacia el espacio, lo que ocasiona escasez de agua, contaminación en los océanos y extinción de flora y fauna (Fonseca, 2015; Del Águila, 2014).

El cambio climático es una realidad que genera gran preocupación en los gobiernos en el ámbito mundial. Por esto, surge la necesidad de tomar decisiones y generar cambios para mitigar sus efectos. La generación de energías limpias y la conservación y recuperación de los ecosistemas boscosos son de suma importancia para la mitigación de los efectos del CC, por lo que se debe considerar promover la formación de bosques urbanos, en busca de, además, generar un valor agregado a la ciudad en términos de paisaje y ecología (Weber, 2003).

### 2.2. Ciudades sostenibles

Según la ONU-Hábitat (2011) las ciudades ocupan solo el 3 % de la superficie terrestre. Sin embargo, en ellas se produce entre un 60 % y un 80 % del consumo de energía y el 75 % de las emisiones de carbono. Por esto, el objetivo n.º 11 de la agenda 2030 de desarrollo sostenible de las Naciones Unidas busca lograr la inclusión, seguridad, resiliencia y sostenibilidad en las ciudades y los asentamientos humanos.

En los últimos años, se han desarrollado diversas iniciativas bilaterales para tratar el cambio climático en el ámbito global, entre estas sobresale la Asociación Tierra Fresca de Japón junto con el Fondo de Transformación Ambiental del Reino Unido y la Iniciativa Internacional de Protección del Clima promulgada por Alemania. Sin embargo, las estrategias de mitigación, así como los planes de adaptación y de gestión de desastres, generalmente, olvidan incluir las zonas urbanas (ONU-Hábitat, 2011).

Por otra parte, las ONG ambientales y las organizaciones internacionales como el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF), The Nature Conservancy, Conservation International y la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN) desempeñan papeles importantes en la gobernanza de los bosques urbanos y periurbanos, en busca de ciudades sostenibles. Lo anterior al proporcionar recursos, compartir las mejores prácticas de manejo e involucrar a las comunidades como los actores más relevantes para lograr objetivos (Borelli *et al.*, 2018). Además, gobiernos locales por la sustentabilidad, el programa URBACT de la Unión Europea y el proyecto Carbon Neutral Cities Alliance para lograr ciudades sin emisiones de carbono son algunas de las redes nacionales, regionales y globales que están activas, comparten experiencias y hacen esfuerzos conjuntos para aumentar la sostenibilidad del desarrollo urbano y generar mayor consciencia sobre el papel clave que los bosques y los espacios verdes pueden desempeñar en el desarrollo de ciudades sostenibles en el mundo (Borelli *et al.*, 2018).

En Costa Rica también se han unido esfuerzos para rehabilitar y conservar los paisajes urbanos y periurbanos debido a que los corredores biológicos interurbanos (CBI) han sufrido producto de cambios incontrolados en el uso de la tierra. La expansión agropecuaria y el crecimiento no planificado de las ciudades son los principales factores que han generado la pérdida de la cobertura forestal (PNUD, 2019).

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en asociación con el Ministerio de Ambiente y Energía (Minae) y con el apoyo financiero del Fondo Mundial para el Ambiente (GEF) lanzó el Proyecto Paisajes Productivos (PPP). A través de este en el periodo 2018-2023 pretende contribuir con mitigar la reducción en la pérdida de cobertura forestal, conservar la biodiversidad, gestionar el uso sostenible de la tierra y secuestro de carbono. Esto en busca de mejorar la calidad de vida de las comunidades, para lograr un equilibrio entre las actividades productivas y la conservación de la biodiversidad en el Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA) y la Gran Área Metropolitana (GAM) (PNUD, 2019).

Por otro lado, el proyecto Mitigación de Emisiones en el Sector Transporte (MiTransporte) de la GIZ trabaja desde 2017 en la GAM de Costa Rica con el objetivo de implementar medidas de reducción de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector transporte. Esto resalta a Costa Rica como un país comprometido con la agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en busca de promover metas globales a favor de combatir el cambio climático (GIZ, 2019).

### **2.3. Arbolado urbano y periurbano**

Según Reyes, Barbosa, Celis y de la Barrer (2018), el arbolado urbano es de suma importancia en términos de cobertura y distribución espacial y se encuentra distribuido en calles, parques, plazas, y en los patios y jardines de las viviendas. Quiñónez (2010) por su parte, define arbolado urbano como el conjunto de plantas ya sea árbol, arbusto, palma o helecho arborescente, que se ubica en sitios urbanos. Mientras que los árboles periurbanos, se caracterizan por ubicarse al borde de las ciudades, donde sirven de zona de amortiguamiento para el avance de la ciudad hacia la zona boscosa (Navarro y Álvarez, 2015). El manejo de estos árboles contribuye al bienestar en general de la ciudadanía urbana y se reconoce como arborización urbana (Arias, 2013).

El área urbana o periurbana se describe como una forma generalizada de ocupación humana del espacio, asociado con un tipo de vida industrial, comercial y de prestación de servicios con una alta densidad de población humana (Méndez *et al.*, 2005). El arbolado urbano refleja la cultura de las personas ciudadanas, ya sea en parques metropolitanos, jardines privados o en bordes de carretera, por lo que es indispensable comprender el papel que cumplen e incentivar a que se implementen en mayor medida (Jiménez, 2013). Los árboles urbanos sirven de mecanismo natural para la mitigación de los efectos del CC en las ciudades, los parques urbanos, además de actuar como sumideros de carbono y almacenamiento de CO<sub>2</sub>, brindan mejor calidad de vida producto de los servicios ambientales que ofrecen.

Según estudios realizados, los árboles urbanos mejoran las condiciones climáticas, la transpiración de agua y el bloqueo de los vientos mejora la calidad del aire, lo que proporciona frescura y oxígeno. Además, funcionan como sumidero de CO<sub>2</sub> atmosférico, es decir, almacenamiento directo de carbono y disminución de la producción de CO<sub>2</sub> (Nowak, 1994).

Por otra parte, Rivas (2011) define la silvicultura urbana como una ciencia dasonómica que busca obtener bienes y servicios ecosistémicos en beneficio de los habitantes de la ciudad, mediante el desarrollo de los bosques, naturales o artificiales, en áreas urbanas. Jellicoe (1985) menciona que

el cultivo de árboles en las ciudades no es una actividad reciente, su origen se remonta a las antiguas civilizaciones de China, Asia Occidental y Grecia. Sin embargo, es hasta la actualidad que en algunos sitios los profesionales forestales y funcionarios municipales comienzan a considerarlos y a cuantificar los beneficios que pueden obtenerse.

#### **2.4. Captura de carbono y CO<sub>2</sub> en árboles urbanos y periurbanos**

Brown (1997) y Quiceno y Tangarife (2013) definen la biomasa arbórea como energía solar que se convierte en materia orgánica a través de la fotosíntesis, transformando el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) del aire y el agua del suelo en carbohidratos para formar la materia orgánica. Por lo tanto, la captura del carbono se lleva a cabo durante el desarrollo de los árboles, allí absorben dióxido de carbono para convertirlos en la composición de materias primas (glucosa y estructuras de la planta). De esta forma, el secuestro de CO<sub>2</sub> es un proceso de fijación en forma continua en cualquier sistema de uso de la tierra (Cabudivo, 2017; Arévalo *et al.*, 2003).

Según Ernst *et al.*, (2000), la capacidad de fijación y almacenamiento de carbono y CO<sub>2</sub> en forma de biomasa aérea en ecosistemas forestales varía según la composición florística, edad y la densidad de la población del estrato, la cantidad de carbono almacenado por individuo arbóreo depende de la densidad de la madera (a mayor densidad, más dureza y, por ende, mayor almacenamiento de carbono). De acuerdo con Freitas *et al.* (2006), un árbol con 15 m de altura y una densidad de la madera y tamaño promedio, puede almacenar aproximadamente 100 kg de carbono, lo que según el autor significaría que por cada 10 árboles promedio, se captura un aproximado de una tonelada de carbono.

#### **2.5. Métodos de cuantificación de biomasa**

Los estudios de biomasa aérea en ambientes urbanos se enfocan en desarrollar sistemas de manejo del arbolado urbano, dirigido hacia planes de descontaminación de forma efectiva, ya que un manejo inadecuado de la biomasa se presenta en el deterioro de la calidad de vida de las personas, lo que afecta su productividad económica (Dobbs, 2005). Para cuantificar la biomasa del arbolado existen dos métodos, el destructivo y no destructivo. La biomasa estimada por el método destructivo, consiste en cortar el árbol y determinar la biomasa pesando cada componente, el método no destructivo, por otra parte, generalmente se utiliza más porque tiene menor costo y mayor facilidad. Este método no implica cortar el árbol, se lleva a cabo una estimación de la biomasa arbórea con datos dasométricos tomados de campo o de los inventarios forestales realizados en un ecosistema, lo que

permite que un mayor número de árboles sean muestreados, mediante la aplicación de ecuaciones alométricas, según número de variables (Schlegel, 2001; Minam, 2009).

Según Minam (2015), existe una relación entre la biomasa y el carbono, por lo que puede obtenerse un valor aproximado de la cantidad de carbono almacenado. Es posible estimar biomasa a partir del volumen del árbol, en función de su densidad y un factor de expansión para determinar el peso seco total (Brown y Lugo, 1984). Los modelos para estimar la biomasa aérea total que más se utilizan se basan en diámetro a la altura del pecho (DAP), ya que esta variable es de fácil medición en el campo y tiene mayor precisión (Segura y Kanninen, 2005).

Los métodos alométricos son una forma de predecir la producción de biomasa de manera no destructiva. Sin embargo, su uso en las diferentes regiones puede ser una limitante debido a las diversas condiciones en el crecimiento de los árboles (características del sitio, de la especie, material genético, etapa de crecimiento en la que se encuentre) o por la misma intervención humana (tratamientos, podas, modificación del ambiente) (Ares *et al.*, 2002).

En Costa Rica se han realizado estudios referentes al desarrollo de modelos alométricos, uno de los más relevantes es el de Fonseca (2016) con la construcción de funciones alométricas para Costa Rica en el contexto del Proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centroamérica. En este, se evaluó la capacidad de mitigación del cambio climático de los ecosistemas boscosos y se desarrollaron capacidades técnicas en busca de incorporar al país a los mercados de carbono. En el estudio de modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata* por Fonseca *et al.* (2013), se construyeron modelos para estimar biomasa, tanto para cada componente como para el árbol completo, así como desarrollar modelos para la estimación de biomasa y carbono, tanto por hectárea como para árboles totales utilizando el método destructivo.

Además, se desarrollaron modelos alométricos para la estimación de biomasa de 10 especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica por Montero y Montagnini (2005) utilizando datos de altura total, diámetro a la altura del pecho (DAP) y biomasa seca proveniente de un raleo realizado en las plantaciones a los 8 años. Asimismo, Jiménez *et al.* (2018) determinaron el mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea Roxb.* procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. El estudio plantea la estimación de la producción de biomasa para generar y desarrollar ecuaciones alométricas para la toma de decisiones en plantaciones con manejo de rebrotes en Turrialba, Cartago, Costa Rica.

Dichos estudios se basan en la creación de modelos para bosques y plantaciones utilizando el método destructivo. Esto resalta la necesidad de implementar nuevas herramientas para la creación de modelos para la vegetación arbórea urbana, como es el caso de la teledetección, que cada vez toma más relevancia para el desarrollo de objetivos referentes a biomasa forestal.

La percepción remota o teledetección es una herramienta de gran utilidad para derivar la estructura del bosque y la biomasa aérea, lo que proporciona un medio práctico para evaluar espacialmente la biomasa forestal distribuida en el ámbito local, regional y global. Chuvieco (2000) menciona que la teledetección es una técnica para adquirir información a distancia de los diversos objetos situados sobre la superficie terrestre, a través de sensores instalados en plataformas espaciales. El sensor (activo o pasivo) a bordo de satélites, el objeto observado y el flujo energético (que permite poner a ambos en relación) son los tres elementos principales del sistema.

Existe una serie de estudios en los que se aplica el uso de SIG y la teledetección para estimar la biomasa aérea en los que se utiliza en mayor medida el método destructivo (Aguas, 2016). En el ámbito internacional, en el estudio realizado en Argentina por Gasparri *et al.* (2007), mencionan que las imágenes Landsat 7 ETM+ brindan información valiosa que, posteriormente, puede correlacionarse con datos provenientes de campo, para la creación de nuevas metodologías de monitoreo de biomasa aérea en bosques. En Finlandia, Muukkonen y Heiskanen (2007) desarrollaron un estudio para demostrar el potencial que tenían los datos del inventario nacional al correlacionarlos con datos satelitales ASTER y MODIS en la estimación de la biomasa aérea en una zona de bosques boreales en el sur de Finlandia.

En otro estudio desarrollado por Sevillano *et al.* (2009) en un área de 150 km<sup>2</sup> poblada por masas de *Pinus radiata*, se determinó el potencial de imágenes CCD-CBERS para la estimación de parámetros forestales, en especial la biomasa aérea y el carbono. Además, en México, Martínez (2014) modeló la dinámica del carbono forestal mediante el uso de imágenes de satélite en bosques del estado de Durango.

## Capítulo III. Marco metodológico

### 3.1. Descripción del área de estudio

El estudio se llevó a cabo en dos cantones de la provincia de Heredia: Heredia (distritos Mercedes y Heredia) y el cantón de Barva (distrito Santa Lucía) (ver Cuadro 1). En estos lugares sobresale el clima cálido, con una precipitación promedio anual de 1750 mm y una temperatura promedio anual de 22 °C (IMN, 2008). Según Avellán (2018), las áreas urbanas poseen suelos aptos para el aprovechamiento forestal, por lo general inceptisoles de superficiales a moderadamente profundos y de topografía plana a quebrada.

#### Cuadro 1

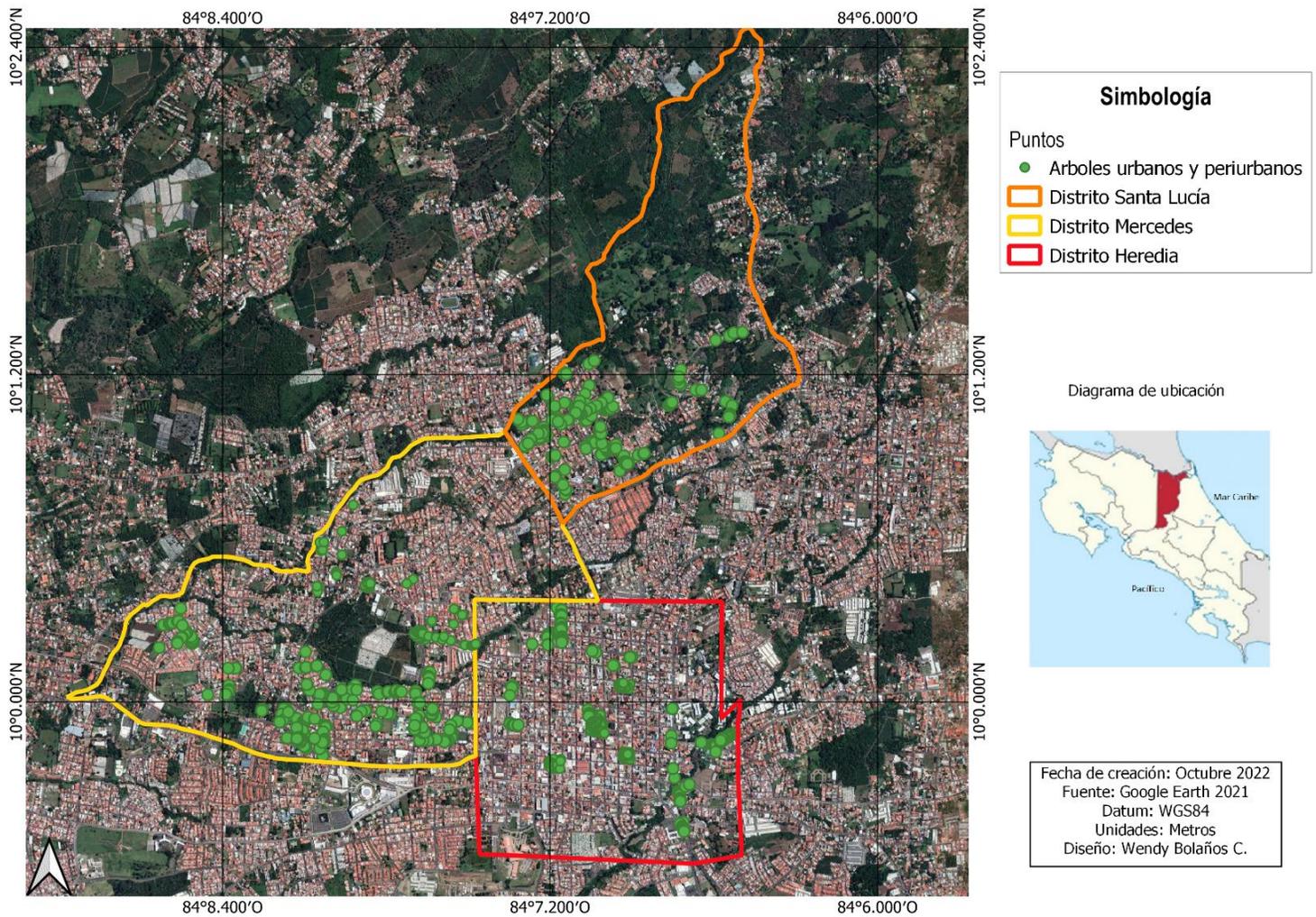
*Datos de áreas de estudio*

<b>Distrito</b>	<b>Coordenada geográfica</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Población</b>
<b>Heredia</b>	9° 59' 47" N, 84° 7' 0" W	2,83	19.215
<b>Mercedes</b>	10.0071° N, 84.1318° W	4,17	27.690
<b>Santa Lucía</b>	10° 1' 11.5" N, 84° 6' 52.99" W	2,98	7.663

### 3.2. Fase 1

#### 3.2.1. Levantamiento de datos en campo.

Se llevó a cabo un censo de la vegetación arbórea urbana y periurbana en los distritos Heredia, Mercedes y Santa Lucía, en el que se evaluaron los árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP, 1,30 m) mayor o igual a 10 cm (ver Figura 1). A cada individuo se le registró la siguiente información: el DAP con cinta diamétrica (ver Anexo 1), la altura total con clinómetro Suunto, cobertura de la copa con cinta métrica en dirección norte-sur y este-oeste, la especie o la muestra botánica y la ubicación geográfica con GPS. Toda la información de campo se registró en un formulario (ver Anexo 2).



**Figura 1**

Representación geográfica de árboles urbanos y periurbanos censados por distrito, en la provincia de Heredia, Costa Rica, 2020-2022.

**3.2.2. Edición de los datos de campo.** Consistió en el ordenamiento y acomodo de los formularios de campo, identificación botánica de muestras tomadas y la sistematización de la información en hojas de Excel para unificar todos los datos. Para esto fue necesario implementar las fórmulas correspondientes:

## Cuadro 2

Desglose de fórmulas según variable por evaluar

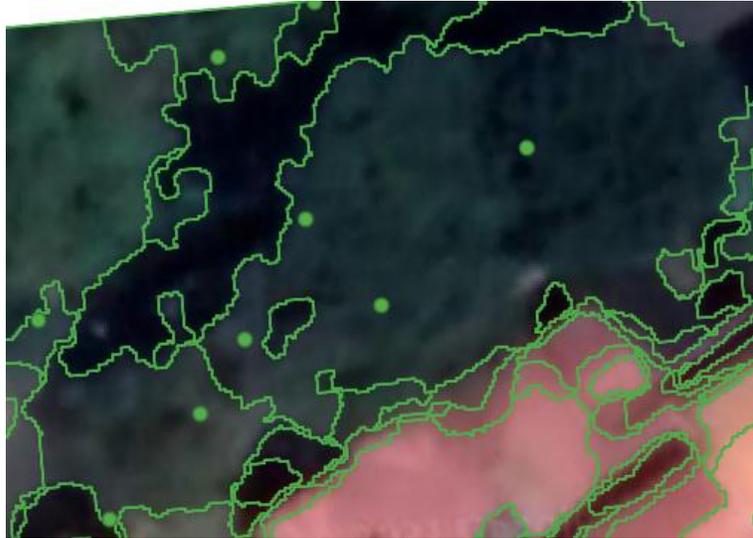
Variable a calcular	Fórmula
Área basal (m <sup>2</sup> )	Área basal (g) = (d <sup>2</sup> ) x π/4
Volumen (m <sup>3</sup> )	Volumen (V)=π/4* (dap) <sup>2</sup> *h*ff
Diámetro de copa (m)	d (copa)= (d1+d2) /2
Biomasa (Mg)	Biomasa (Bj)=Vj*ρ*FEB
Almacenamiento de carbono (Mg)	CB= (∑Bj) *FC/1000
Conversión del área en Qgis (m <sup>2</sup> ) a m	RAIZ (4* Área (Qgis) / π)
CO <sub>2</sub>	Carbono total*3,667 (peso molecular C)

**Dónde:** d = diámetro 1,3 m en metros, π= 3, 1416, V=es el volumen total de madera del individuo i, en m<sup>3</sup>, Solano (2015), dap= diámetro 1,3 m en metros h= es la altura total en metros ff= es el factor de forma 0,50, d1=diámetro de copa 1, d2= diámetro de copa 2 Bj= biomasa arriba del suelo por individuo, en kg, V= volumen de madera del individuo, en m<sup>3</sup>/árbol, p= densidad básica de la madera, FEB= factor de expansión de biomasa 1,1 (Herrera y Herrera, 2013), CB= reservorio de carbono en la biomasa, en toneladas de carbono (ton o Mg), Bj= biomasa arriba del suelo por individuo, en kg (Donegan, Sola, Cheng, Birigazzi, Gamarra, Henry, Vielledent & Chiti, 2014; Zanne et al., 2006), (Herrera & Herrera, 2013), FC= fracción de carbono de 0,47 (IPCC, 2006). Biomasa y CO<sub>2</sub> (Fonseca, 2016)

### 3.3. Fase 2. Cálculo de la cobertura de copa a través de imágenes satelitales en QGIS

Para la toma de datos a través de imágenes satelitales se utilizó como guía parte de la metodología aplicada por Cantero *et al.* (2017) en su trabajo *Herramientas de localización de árboles individuales con el módulo de procesamiento de QGIS a partir de información LiDAR y ortofotografía aérea*. Se utilizaron imágenes de SAS Planet debido a que es una herramienta que permite la descarga de mosaicos de mapas temáticos provenientes de los principales proveedores de servicios de mapas e imágenes satélite.

Se delinearón todos los elementos de la superficie de estudio con el algoritmo de Orfeo Tool Box (OTB) en QGIS, programa de código libre de la Agencia Espacial Francesa (CNES) (OTB Development Team, 2016). Además, se utilizó la herramienta *Segmentation (meanshift)*, la cual brinda una segmentación que permite tener una primera aproximación a los árboles (ver Figura 2).



**Figura 2**

Segmentación de la imagen

Posteriormente, se generó una capa vectorial *shape (output vector file)* con los segmentos en los que se dividen los elementos de la superficie, delimitando las copas separadas del terreno, así como sombras con el mínimo número de segmentos. Después, se empleó la herramienta Zonal Statistics, que otorga a la capa *shape* valores relativos a la altura a partir de datos LiDAR de la capa *raster MDHV*, asignando valores de altura máxima, mínima y media, a cada segmento de la capa *shape* del algoritmo *Segmentation (meanshift)* (ver Figura 3).

ZSCalleM101 — Features Total: 33, Filtered: 33, Selected: 0

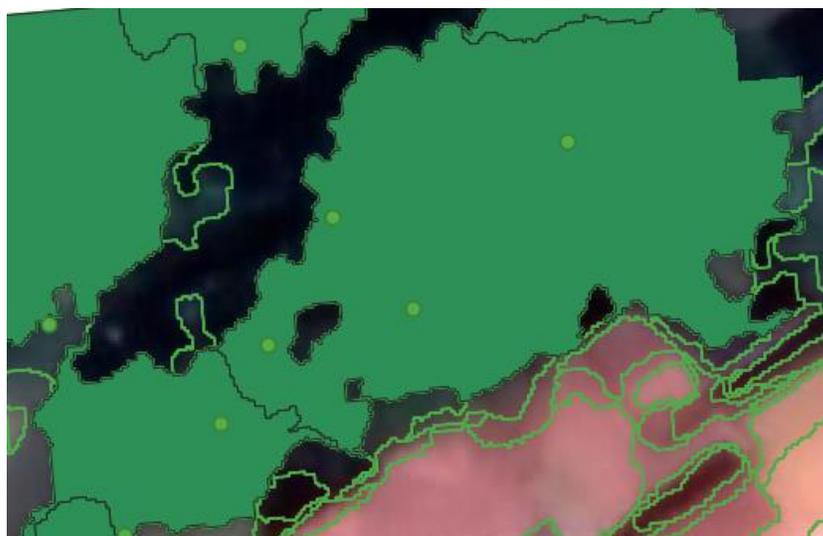
Geo	count	mean_0	stdev_0	min_0	max_0	mean_1	stdev_1	min_1	max_1	
1	1	125,0000000000...	156,3839999999...	20,52291559491...	98,0000000000...	186,0000000000...	122,7440000000...	18,54589077170...	74,0000000000...	151,0000000000...
2	10	387,0000000000...	34,44961240310...	10,51100674544...	20,0000000000...	59,0000000000...	36,92248062015...	11,02677786572...	21,0000000000...	62,0000000000...
3	11	302,0000000000...	36,04635761589...	9,272427420961...	16,0000000000...	70,0000000000...	38,94039735099...	5,963601431541...	27,0000000000...	59,0000000000...
4	12	193,0000000000...	34,26943005181...	9,600344404983...	17,0000000000...	56,0000000000...	39,33160621761...	9,647100493280...	21,0000000000...	61,0000000000...
5	13	5769,000000000...	167,8448604610...	17,49445201393...	108,0000000000...	219,0000000000...	168,1034841393...	16,45558484322...	117,0000000000...	218,0000000000...
6	14	110,0000000000...	201,1999999999...	5,701762161220...	187,0000000000...	211,0000000000...	203,2363636363...	5,681011785978...	189,0000000000...	213,0000000000...
7	15	179,0000000000...	39,86033519553...	9,513298905573...	19,0000000000...	59,0000000000...	42,73184357541...	9,567362736313...	22,0000000000...	62,0000000000...
8	16	205,0000000000...	123,3560975609...	11,00557008662...	98,0000000000...	151,0000000000...	130,3024390243...	9,384292461469...	109,0000000000...	154,0000000000...
9	17	262,0000000000...	166,5076335877...	14,50848407268...	130,0000000000...	195,0000000000...	170,0877862595...	13,21716359403...	139,0000000000...	199,0000000000...
10	18	117,0000000000...	89,00854700854...	3,940277704408...	78,0000000000...	97,0000000000...	92,02564102564...	3,826994720948...	81,0000000000...	100,0000000000...
11	19	163,0000000000...	51,34355828220...	8,169788041509...	32,0000000000...	67,0000000000...	54,95092024539...	7,821151821476...	36,0000000000...	69,0000000000...
12	2	125,0000000000...	111,0639999999...	17,76538134106...	79,0000000000...	146,0000000000...	124,0480000000...	18,10402557265...	91,0000000000...	160,0000000000...
13	20	136,0000000000...	30,80882352941...	7,739762371586...	11,0000000000...	48,0000000000...	34,5000000000...	7,460513337516...	15,0000000000...	51,0000000000...

**Figura 3**

Cuadro de atributos que brinda la herramienta Zonal Statistics para cada área segmentada

Finalmente, se filtra por altura media con la herramienta *Select by attribute*, para seleccionar segmentos cuya altura media corresponda a árboles individuales. Los restantes se eliminan con la herramienta *Save selected* para generar una capa *shape* con los segmentos de las copas.

Además, se llevó a cabo un segundo filtrado para eliminar segmentos que no eran parte de copa y se utilizó la herramienta de Geoprocesos *cortar*. De esta manera, se obtuvo la correcta localización del individuo para detectar el diámetro de la copa y se realizó el cálculo del área con la calculadora de campos (ver Figura 4).



**Figura 4**

Área de la copa producto del procesamiento de la imagen

### **3.4. Fase 3. Construcción del cuadro de distribución por cobertura de copa de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub>**

Para construir el cuadro de distribución por cobertura de copa (m), los datos se segregaron en rangos de 1,99 m de cobertura de copa, desde los 0 m hasta 49,99 m, brindando el dato promedio de cobertura de copa, DAP (cm), área de copa en Qgis (m<sup>2</sup>), biomasa, captura de carbono y CO<sub>2</sub> para cada rango (ver Cuadro 3).

Para el cálculo de cada una de las variables se establecieron datos promedio en los que se usó como referencia el valor del DAP tomado en campo, en relación con el área de copa generada en el procesamiento de la imagen satelital (Fase 2), aplicando previamente las fórmulas para el cálculo de cada variable (ver Cuadro 2). Se presenta tanto el dato del DAP promedio (cm), como la cobertura de copa promedio que se obtuvo en el procesamiento de la imagen (m<sup>2</sup>, Qgis), como insumo de referencia al utilizar o aplicar la tabla.

Posteriormente, para calcular los límites de confianza, se calculó el error (E%) de las diferencias que se generan entre datos tomados frente a los datos de imagen satelital para consultar como referencia promedio estas variables y procesar la imagen satelital sin necesidad de realizar la visita al campo.

## Capítulo IV. Resultados y discusión

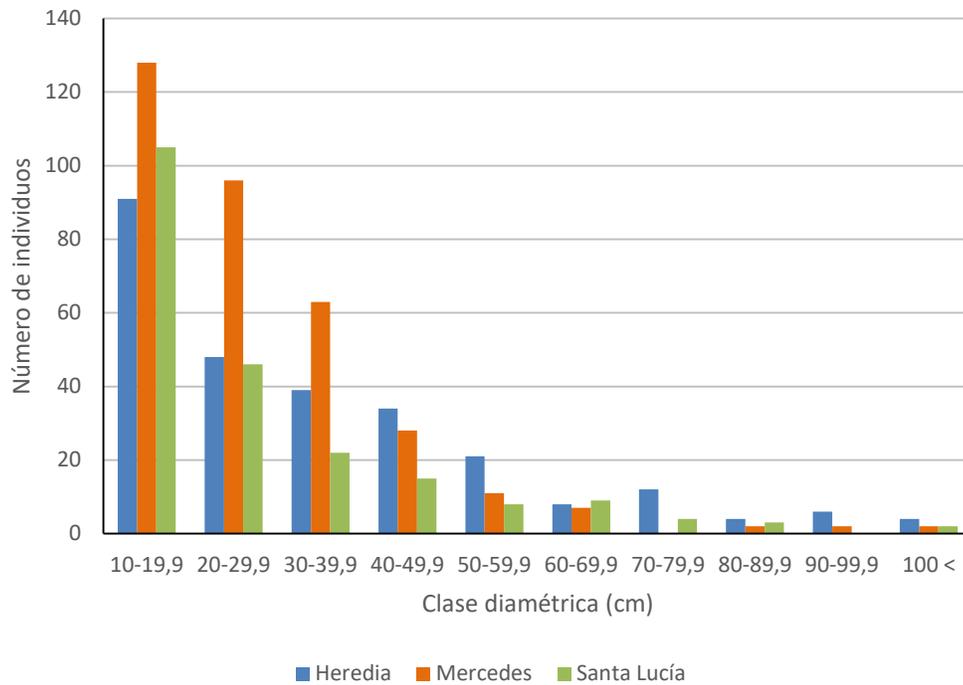
### 4.1. Resultados y discusión de datos tomados en campo

#### 4.1.1. Composición arbórea de los tres distritos censados en zona urbana y periurbana.

En los 3 distritos se censaron en total 825 árboles urbanos y periurbanos arriba de 10 cm de DAP ubicados en parques públicos, bulevar y a orillas de las calles, ya sea sobre las aceras o su borde. El mayor número de individuos se censó en orillas de las calles con 490 árboles, seguido de 310 árboles ubicados en 15 parques censados y, finalmente, 25 que se encontraron en 7 bulevares.

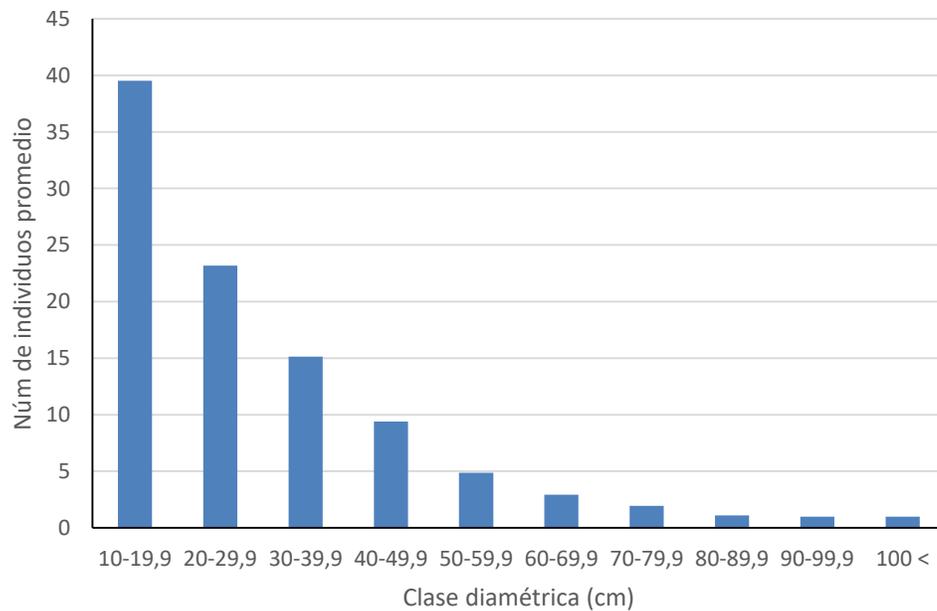
El DAP promedio fue de 29,9 cm  $\pm$  1,3 cm (4,5 %), con valor máximo de 161,5 cm el DAP. Las clases diamétricas inferiores (10-19,9 cm y 20-29,9 cm) concentraron la mayor cantidad de individuos (324 y 190 respectivamente), lo que representa un 40 % y 23 % del total de árboles muestreados (Figura 5, Figura 6). Las clases superiores a 40 cm registraron la menor cantidad de árboles urbanos y periurbanos, a partir de los 70 cm y mayor 100 cm que representan en conjunto un 5 % del número de individuos censados (ver Figura 5). La población de árboles urbanos y periurbanos (PAUP) es, principalmente, joven y puede atribuirse a resientes campañas de reforestación y al incremento de la conciencia acerca de la importancia de los árboles urbanos por parte de los gobiernos locales y las personas ciudadanas en general (Sánchez y Artavia, 2013). Lo anterior es positivo, ya que señala el potencial que hay en los distritos para la captura y almacenamiento del CO<sub>2</sub> durante lo que resta de su periodo de vida, ya que en edades jóvenes los árboles poseen mayor crecimiento, por lo tanto, capturan más CO<sub>2</sub> que uno de edad madura (Stoffberg *et al.*, 2010).

Por otra parte, el distrito de Mercedes (sitio de mayor área, con 4,17 km<sup>2</sup> (ver Cuadro 1), concentra la mayor cantidad de ejemplares censados, con un 50 %, seguido por Heredia con 30 % y, por último, Santa Lucía con 20 %. Con las herramientas del Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) del Instituto Geográfico Nacional de Costa Rica, con la capa de usos y cobertura, se estima que el distrito de Santa Lucía cuenta con aproximadamente 0,92 km<sup>2</sup> de cobertura en pastos, árboles aislados y cultivos en propiedades privadas.



**Figura 5**

Número de individuos censados por clase diamétrica según distrito.



**Figura 6**

Número de individuos promedio según clase diamétrica

### Cuadro 3

Listado de las cinco especies con mayor número de individuos en el área de estudio

Especie	Origen	Familia	Núm. de individuos	Carbono (Mg)	CO <sub>2</sub> e (Mg)	Porcentaje (%)
<i>Pinus sp</i>	Exótica	Pinaceae	112	35,85	131,45	13,6
<i>Ficus benjamina</i>	Exótica	Moraceae	64	8,28	30,36	7,9
<i>Tabebuia rosea</i>	Nativa	Bignoniaceae	52	11,23	41,17	6,3
<i>Psidium guajava</i>	Nativa	Myrtaceae	47	1,50	5,51	5,8
<i>Callistemon virminalis</i>	Exótica	Myrtaceae	46	2,88	10,58	5,7
<b>Total</b>	-	-	<b>321</b>	<b>59,8</b>	<b>219,07</b>	<b>39,3</b>

Se registró un total 87 especies arbóreas, de las cuales 26 son exóticas y 61 nativas. Presentando una PAUP de 300 árboles exóticos (36%) y 525 nativos (64%) del total de censado. Sobresale el distrito Mercedes con un 53% del total de especies exóticas, seguido por Santa Lucía con 28% y finalmente Heredia con 19%. En cuanto a las especies nativas, Heredia presentó un 41%, seguida por Mercedes con 34% y Santa Lucía con 25%.

Según resultados internacionales, al implementar los bosques urbanos como medio para la fijación de CO<sub>2</sub> se debe prestar especial atención a la selección de las especies arbóreas por utilizar. Esto no se debe solo a los servicios sociales, ambientales, estéticos y económicos que puedan brindar, sino que se debe conocer su biomasa y capacidad fijadora para estimar el papel real del sistema como sumidero de CO<sub>2</sub> (Mogas y Riera, 2004).

Generalmente, se encuentran diferentes opiniones acerca de la implementación de especies nativas o exóticas. Las especies nativas son más recomendadas debido a su mejor adaptabilidad, su tolerancia a cambios de clima y a que favorecen la conectividad de ecosistemas fragmentados y la conformación de corredores biológicos (Manual de arborización urbana, 2008). Sin embargo, por otro lado, Sánchez y Artavia (2013) indican la importancia de las especies exóticas debido a sus floraciones y follajes atractivos, la resistencia a la contaminación y a que, por lo general, son de crecimiento

rápido y poseen un porte pequeño o mediano. Además, mencionan que en arborización urbana es posible utilizar un total de entre 70 % y 80 % de especies nativas y el resto de exóticas, con el fin de favorecer la ecología del sitio.

#### 4.1.2. Concentración de biomasa y secuestro de carbono y CO<sub>2e</sub> de la PAUP.

La vegetación arbórea urbana y periurbana contribuye con disminuir la contaminación atmosférica de las ciudades, captando el CO<sub>2</sub> del aire e incorporándolo a sus tejidos vegetales. Estos organismos devuelven el CO<sub>2</sub> a la atmósfera mediante su respiración, sin embargo, los sistemas vegetales asimilan más carbono durante la fotosíntesis que durante la respiración, lo que los convierte en sumideros naturales de CO<sub>2</sub> (Carbonell, 2016; Rodríguez *et al.*, 2006).

#### Cuadro 4

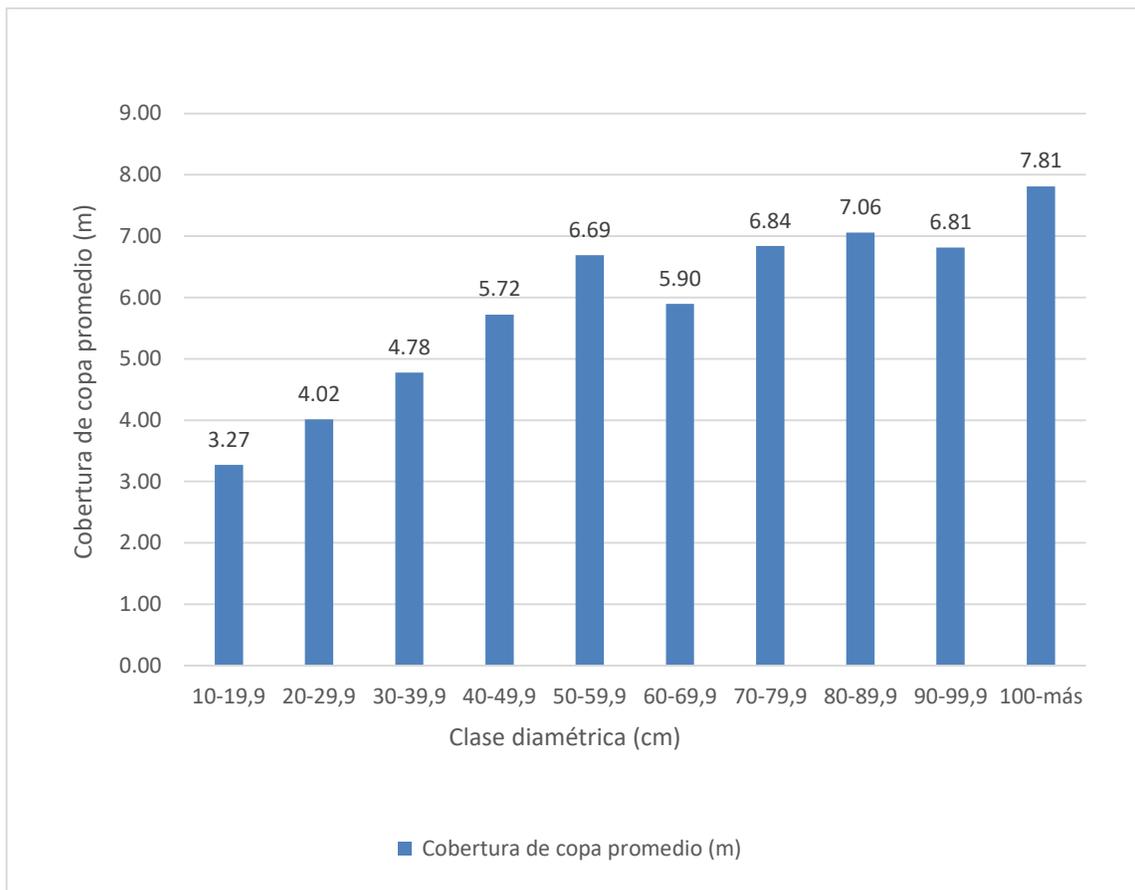
Concentración de biomasa, existencias de carbono y almacenamiento de CO<sub>2e</sub> de los datos tomados en campo de árboles urbanos y periurbanos

	<b>Biomasa</b>	<b>Carbono</b>	<b>CO<sub>2e</sub></b>
<b>Total kg</b>	265264,24	124674,19	556,18
<b>Total Mg</b>	265,26	124,67	457,18
<b>Promedio (kg)</b>	322,71	151,67	556,18
<b>Promedio (Mg)</b>	0,32	0,15	0,56

En el presente estudio se obtuvo que la clase diamétrica de 50-59,9 cm presenta la mayor cantidad de biomasa, carbono y CO<sub>2e</sub> con 38,61 Mg, 66,55 Mg de C y 18,15 Mg de CO<sub>2e</sub>, con cobertura de copa promedio de 6,69 m (Figura 7 y Figura 8). Seguida de la clase de 40-49,9 cm y la clase de 100 <, estas 3 clases diamétricas aportan en conjunto el 42 % del total del reservorio de carbono. La mayor cobertura de copa promedio se presenta en la clase diamétrica de 100-más cm con 7,81 m (ver Figura 7).

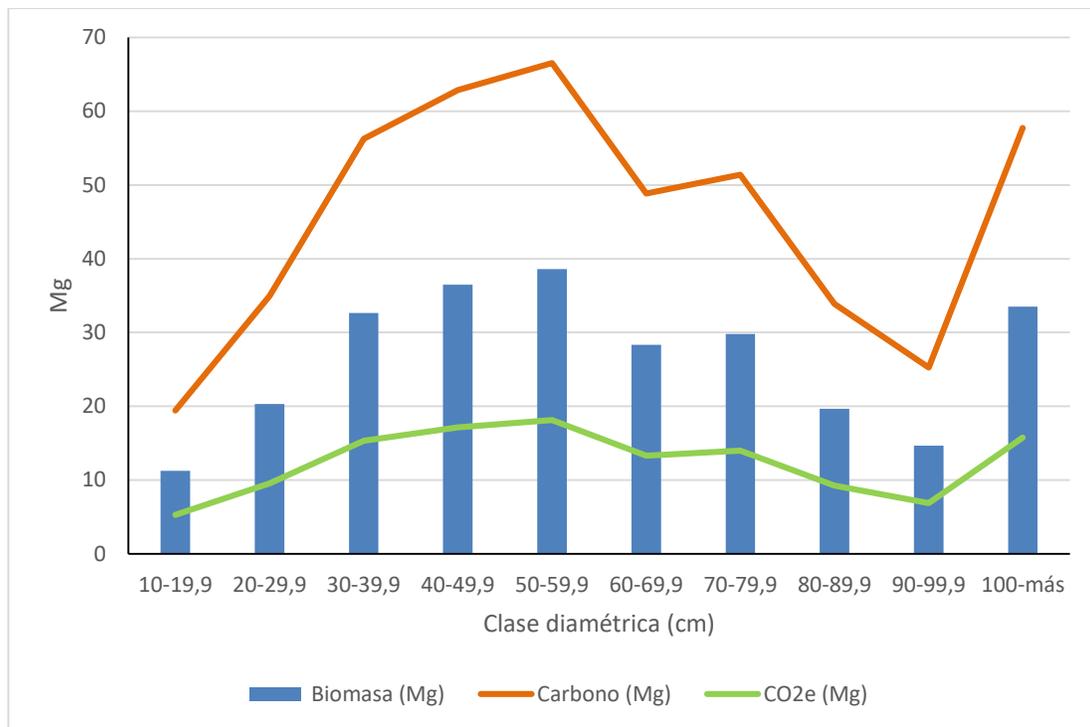
Según Maza *et al.* (2005) un árbol maduro puede almacenar 760 veces más carbono que uno joven (2,5 Mg de C aproximadamente por árbol), lo que resalta la importancia de realizar este tipo de estudios para dar a conocer el potencial de los árboles urbanos e incentivar a las personas ciudadanas a la conservación de los árboles grandes, tanto los ubicados en áreas públicas como aquellos que pueden encontrarse en los jardines de sus casas. Esto siempre y cuando no representen un riesgo, tanto

para los habitantes de las ciudades como para la infraestructura y vías públicas en general. Lo anterior lleva a destacar la relevancia del manejo y planificación adecuada del arbolado urbano.



**Figura 7**

Cobertura de copa promedio (m) de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica



**Figura 8**

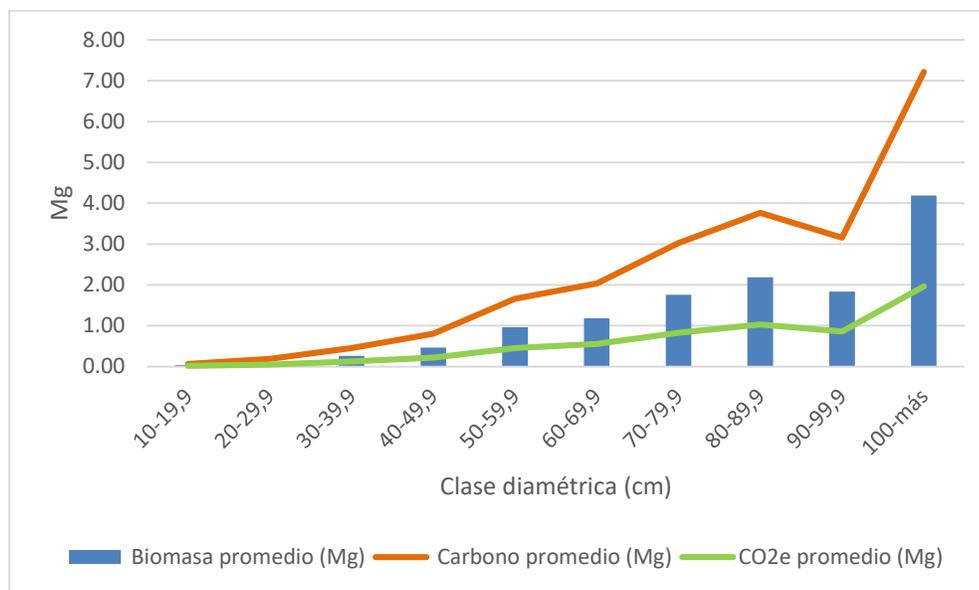
Concentración de biomasa (Mg), existencia de carbono (Mg) y almacenamiento de CO<sub>2</sub>e (Mg) de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica para diciembre de 2020 y enero de 2021

Avellán (2018) obtuvo con la biomasa arriba del suelo 61,65 Mg de C, en los 4 parques estudiados del distrito Heredia, siendo la clase diamétrica de 60-70 cm la que generó mayor existencia con 15,65 Mg de C. Seguido por la clase de 50-60 cm con 15,52 Mg de C, que aporta en conjunto un 50 % del carbono almacenado. Por otra parte, Rodríguez y Fonseca (2015) en su informe del almacenamiento de carbono en 5 distritos del cantón de San José obtuvieron un reservorio de 5825,52 Mg C, en una población de 7412 entre árboles y palmas mayores que 10 cm de DAP. Al igual que en el presente estudio, las clases diamétricas inferiores (10-20 y 20-30 cm) presentaron una mayor cantidad de individuos, almacenando un árbol en promedio 1,74 Mg CO<sub>2</sub> ( $\pm 0,21$ ) y 0,80 Mg C m<sup>2</sup> de copa ( $\pm 0,15$ ).

En cuanto a Cabudivo (2017), en su estudio en Loreto, Perú, obtuvo con 418 individuos (árboles y palmeras), un total de 119,03 Mg de biomasa, un secuestro de 217,87 Mg de CO<sub>2</sub> en el que sobresalen las especies arbóreas *Syzygium cumini*, *Syzygium malaccense* y *Terminalia catappa*. En donde la clase diamétrica >10-20, presentó la menor producción de biomasa total de 11,14 Mg, mientras que la clase diamétrica >40-50 presentó la mayor producción de biomasa con 45,07 Mg.

En el presente estudio, la clase diamétrica de 100< cm presenta la mayor concentración de biomasa promedio con 4,19 Mg, la mayor existencia de carbono promedio con 1,97 Mg y el mayor almacenamiento promedio de CO<sub>2</sub>e con 7,22 Mg. Le sigue la clase de 80-89,9 cm, con un promedio de biomasa de 2,18 Mg, 3,16 Mg de almacenamiento de carbono promedio y 1,03 Mg promedio de CO<sub>2</sub>e (ver Figura 9).

Lo anterior se relaciona a que con el tiempo los bosques acumulan carbono a través del crecimiento de los árboles. Por lo tanto, en sus primeros años de vida secuestran carbono a tasas elevadas, mientras que el secuestro en bosques maduros lleva a eventualmente mantenerse igual, es decir, alcanza un estado estacionario y cumple su papel como reservorio de carbono (Streck y Scholz, 2006).



**Figura 9**

Concentración de biomasa (Mg), existencia de carbono (Mg) y almacenamiento de CO<sub>2</sub>e (Mg) promedio de árboles urbanos y periurbanos según clase diamétrica

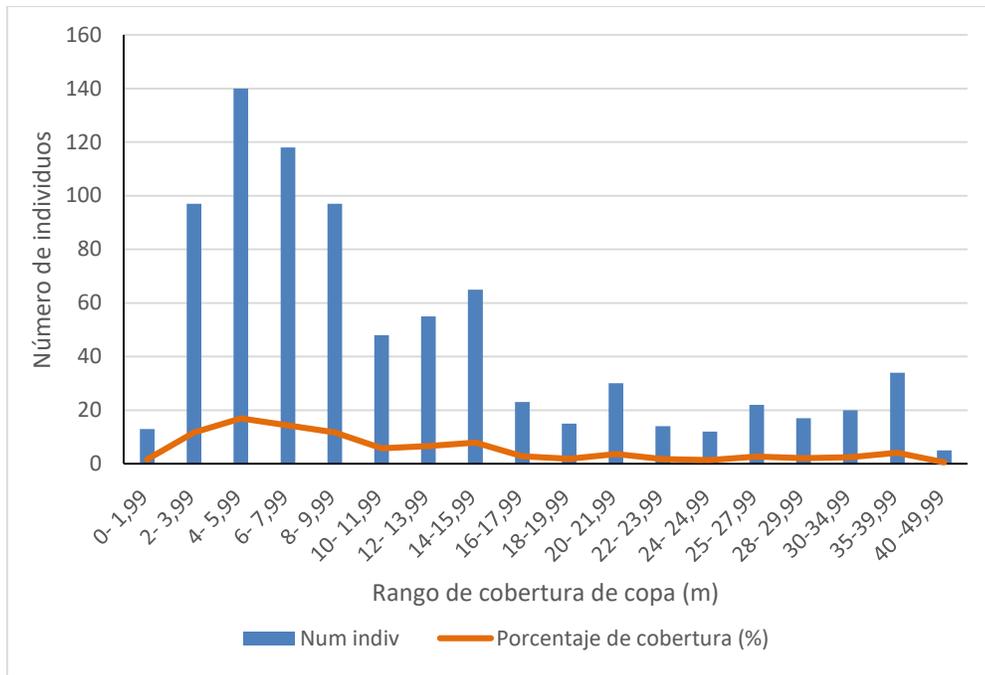
## **4.2. Resultados y discusión de datos que se generaron a través del procesamiento de imágenes satelitales**

### **4.2.1. Cobertura de copa de la PAUP a través del procesamiento de imágenes satelitales.**

El 56 % de los árboles censados se encuentran en rangos de cobertura de copa menores que 10 m, el mayor número de individuos presentó una cobertura de copa de entre 4 a 5,99 m con 140 árboles (17 %), seguido por el rango de 6 a 7,99 m con 118 (14 %), 2 a 3,99 m con 97 (12 %) y 8 a 9,99 m con 97 (12 %) individuos respectivamente. El 44 % restante se encuentra en rangos de cobertura de copa de más de 11,99 m (ver Figura 10). En el procesamiento de las imágenes satelitales si los individuos están cercanos entre sí o se presenta mayor densidad, se sobreponen las copas unas con otras, lo que provoca que se genere un dato unificado de ellas; es decir, se suman entre sí como una sola copa de mayor tamaño. Cabe destacar que este tipo de escenarios resultó ser más común en los parques censados (ver Figura 11).

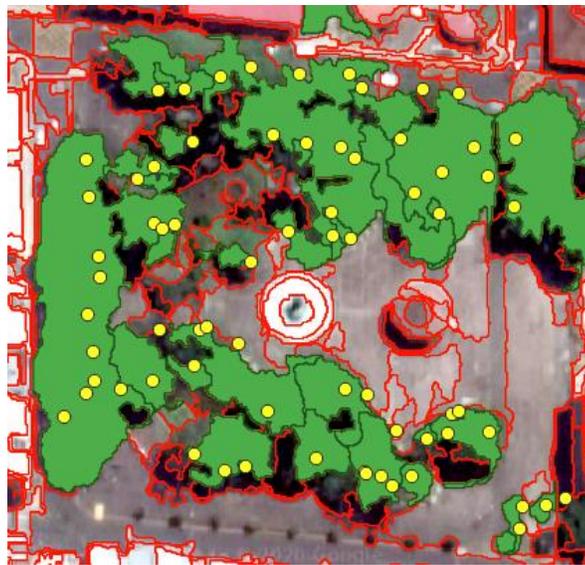
Cantero *et al.* (2017) definieron en su estudio cuatro factores que afectan los resultados en el proceso de delimitación de la copa a través de imágenes satelitales. La primera es la fracción de la cabida cubierta y la tangencia entre copas que se presentaron con más frecuencia, debido a que a mayor cabida cubierta o mayor tangencia de copa más dificultad para delimitar correctamente, ya sea por la presencia de sombras o incluso cuerpos rocosos que intervienen y hacen que se considere como una sola copa, lo que impide la segmentación como un árbol individual y, por ende, quedan agrupadas como un conjunto de copas. Lo anterior es una limitante para el proceso, ya que condiciona el buen funcionamiento de la metodología propuesta y el resto del proceso, lo que genera una segmentación deficiente en áreas con mayor densidad (Cantero *et al.*, 2017).

Los cuerpos rocosos se señalan como otro factor limitante, ya que pueden llegar a confundirse con material vegetal, por lo que pueden generar problemas en la delimitación de copas. En uno de los parques censados en el distrito Santa Lucía, por ejemplo, se observó una gran cantidad de cuerpos rocosos, sin embargo, este factor no afectó en el proceso de delimitación de la copa. Finalmente, otros de los factores son los efectos de la fotografía satelital; es decir, efectos como la luminosidad y contraste que generan cierta sombra según la hora a la que se tomó la fotografía.



**Figura 10**

Número de individuos y % de cobertura de copa según rango de cobertura de copa (m) a través de la interpretación del procesamiento de las imágenes satelitales



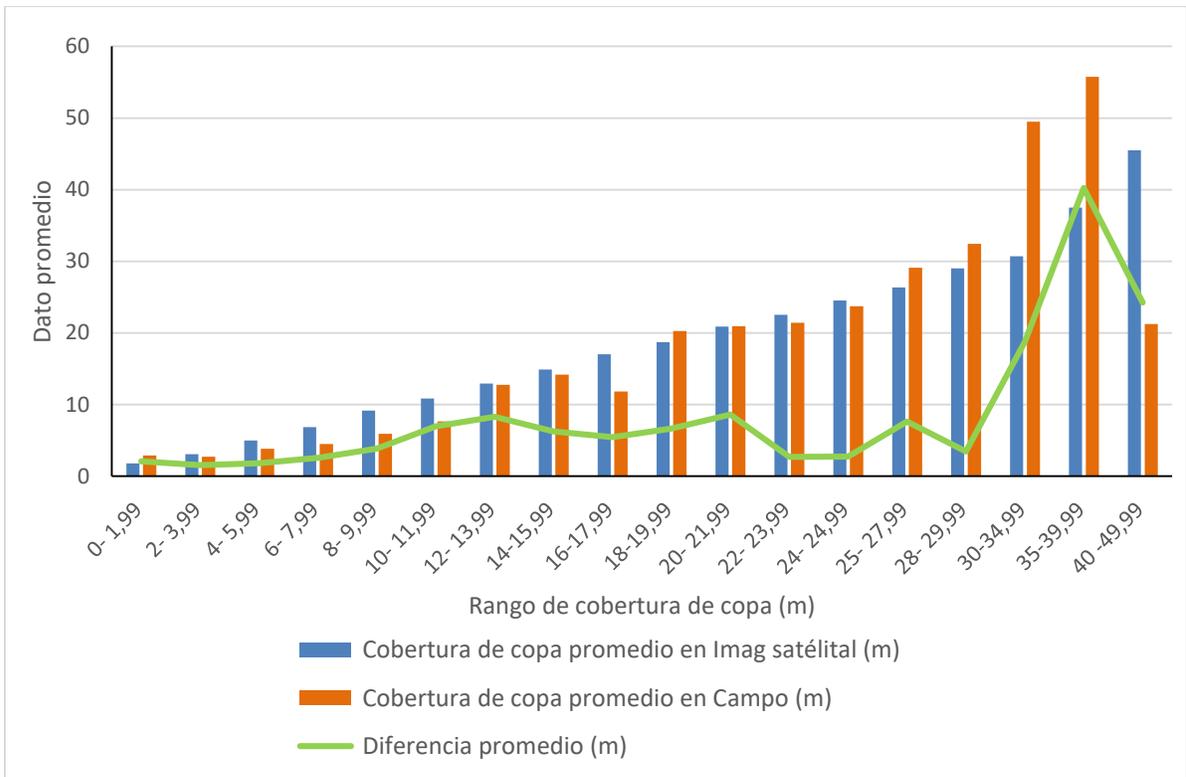
**Figura 11**

Delimitación de copas del parque central de Heredia, Nicolás Ulloa, distrito Heredia

Respecto a la cobertura de copa, a través del procesamiento de las imágenes satelitales se obtiene que un árbol en las condiciones del presente estudio presenta en promedio una cobertura de copa de  $8,11 \text{ m} \pm 0,4 \text{ m}$  (5,1%) contra  $6,69 \text{ m} \pm 0,6 \text{ m}$  (9,5%) referente al dato tomado en campo. Esto genera una diferencia promedio de  $3,59 \text{ m}$  (E=13.64 %).

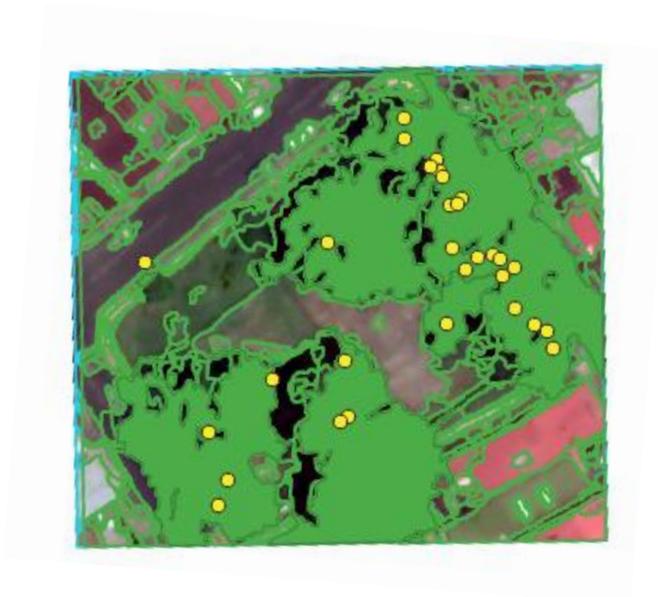
La menor diferencia promedio del dato tomado en campo contra el dato de la imagen satelital se encuentra en el rango de cobertura de copa de 2 a 3,99 m, con 1,54 m, seguido por el rango de 4 a 5,99 con una diferencia de 1,81 m y 2,10 m en el rango de 0 a 1,99 m (ver Figura 12). Sin embargo, el rango de cobertura de copa de 35 a 39,99 m presenta una diferencia promedio de 40,21 m, seguido por el rango de 40-49,99 m con 24,23 m y 18,80 m en el rango de 30 a 34,99 m (ver Figura 12).

Lo anterior se debe a que en las áreas entre 28 m y 49,9 m de cobertura de copa se presentan grupos de entre 2 a 21 individuos arbóreos unidos en una misma copa. En el caso del parque Santa Lucía, por ejemplo, se presenta en la delimitación de copas un grupo de 21 individuos arbóreos que se unieron como una sola copa en el procesamiento de la imagen. Este conjunto se encuentra dentro del rango con mayor diferencia en la comparación de los datos (35 a 39,99 m), además de otros 10 individuos en el parque Nicolás Ulloa (ver Figura 13). Seguido de un grupo de 12 individuos que unidos conforman una sola copa en otro parque del distrito de Santa Lucía, en el rango de 30 a 34,99 m de cobertura de copa (ver Figura 11).



**Figura 12**

Datos promedio de cobertura de copa (m) y diferencia promedio entre dato obtenido en campo respecto al dato del procesamiento de las imágenes satelitales según rango de cobertura de copa (m)



**Figura 13**

Delimitación de copas parque Santa Lucía, Barva, Heredia

### 4.3. Distribución por cobertura de copa, biomasa, carbono y CO<sub>2e</sub> para predecir y monitorear el almacenamiento de carbono (arriba del suelo) en la vegetación urbana y periurbana como herramienta para la implementación de ciudades sostenibles

En Costa Rica, la información referente a biomasa, reservorio de carbono y almacenamiento de CO<sub>2</sub> se basa principalmente en el método tradicional de medición en campo. La aplicación, el uso y procesamiento de imágenes satelitales y la correlación del DAP con la cobertura de copa, hace del siguiente cuadro de distribución (ver Cuadro 6) un aporte importante para este conocimiento respecto a árboles urbanos y periurbanos, todavía más cuando la mitigación al cambio climático tomó cada vez más relevancia para los gobiernos locales.

Este estudio, previamente, planteó como objetivo generar una ecuación para predecir el DAP (cm) a través del área de copa. Sin embargo, al presentar una ecuación se incluyen todas las áreas de copa, sin discriminar aquellas en las cuales el error es mayor o menor en cuanto a las diferencias de los datos tomados en campo contra los datos que se generan a través del procesamiento de las imágenes. Por el contrario, un cuadro de distribución permite brindar límites de confianza para solo referenciar aquellos datos con menor sesgo y, por ende, mayor veracidad.

Rojas (2019), elaboró la línea base de biomasa y carbono en el Corredor Biológico Interurbano María Aguilar (CBIMA) y del área de amortiguamiento del Área de Conservación La Amistad Pacífico (ACLA-P), para lo cual utilizó y procesó imágenes satelitales. Además, estableció los usos de la tierra para cada sitio y los reservorios de materia orgánica muerta, biomasa viva aérea y subterránea. Asimismo, presentó el carbono promedio por clases de área de copa desde los 0 m<sup>2</sup> hasta más de 150 m<sup>2</sup>, donde se obtuvo como resultado bajo la estimación de las existencias de carbono de árboles de asentamiento desde 73,5 hasta 699,9 kg C arb<sup>-1</sup> (0,07 a 0,69 Mg C arb<sup>-1</sup>).

#### Cuadro 5

Existencia de carbono, reservorio de carbono y CO<sub>2e</sub> al aplicar el uso y procesamiento de imágenes satelitales en árboles urbanos y periurbanos

	<b>Biomasa</b>	<b>Carbono</b>	<b>CO<sub>2e</sub></b>
<b>Total kg</b>	326951,80	121544,72	445704,49
<b>Total Mg</b>	326,95	121,54	445,70

<b>Promedio (kg)</b>	604,35	224,67	822,33
<b>Promedio (Mg)</b>	0,60	0,22	0,82

Se genera una diferencia de 3,13 Mg carbono y 11,48 Mg de CO<sub>2</sub> respecto a los datos tomados en campo como referencia para corroborar el levantamiento de información remoto (ver Cuadro 4). Respecto a la existencia promedio de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos a través del procesamiento de imágenes satelitales, se presenta para cada rango de cobertura de copa (m), el DAP (cm) promedio o la suma de los DAP (según la tangencia de copas que se genere). Además del dato que brinda el procesamiento de la imagen en el *software* Qgis (área Qgis, m<sup>2</sup>), de manera que se agilice el proceso y sea una herramienta para la implementación de ciudades sostenibles (ver Cuadro 6).

Sobresale el rango de 24-25,99 m, esto se debe a que este rango se conforma únicamente por conjuntos de copas, que van desde 2 copas sumadas como una sola, hasta 6 copas sumadas, lo que genera un DAP promedio de 174,82 cm. Le sigue el rango de 35-39,99 m en el que se presenta un caso similar con 3 conjuntos de copas, donde uno de ellos suma 21 copas como una sola, caso que se presentó en un parque censado debido a la cercanía y densidad presente. Le sigue un conjunto de 10 copas y otro de 3 copas, que brinda una suma de diámetros a la altura de pecho y genera un promedio de 563,43 cm, 13,94 Mg de biomasa, 5,50 Mg de carbono y 20,17 Mg de CO<sub>2</sub>. Este tipo de casos se presenta a partir del rango de 12-13,99 m, donde se puede observar el aumento significativo en DAP y área de Qgis.

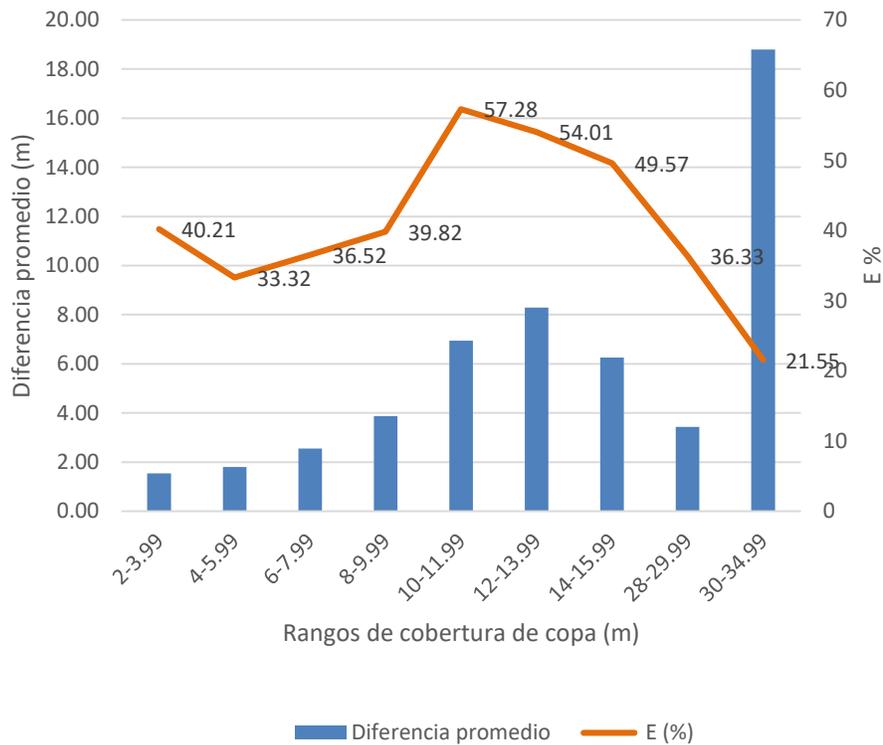
Finalmente, tras observar los valores de área de copa en el cuadro de distribución se identifica que las cifras pequeñas y medias, desde los 2 m hasta los 15,99 m, presentan menor sesgo, lo que genera errores en las diferencias de áreas (campo contra imagen satelital) entre 33 % a 57 %, por lo que se recomienda utilizarlos como referencia debido a que presentaron mayor veracidad (ver Figura 14). Además, se identificaron valores menos ajustados a la realidad en las áreas de copa mayores, desde 16 m hasta 49,99 m, con errores desde 75 % hasta 360 %. A excepción de las áreas de cobertura de copa de 28 m a 34,99 m, que presentaron sesgos menores, con errores de 21 % hasta 36 % aproximadamente (ver Figura 14).

### Cuadro 6

Existencia promedio de biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos del procesamiento de imágenes satelitales, presentados por rango de cobertura de copa (m)

Rango de Cob copa (m)	DAP (cm)	Cobertura de copa, Qgis (m <sup>2</sup> )	Cob de copa (m)	Biomasa (Mg)	Carbono (Mg)	CO <sub>2</sub> (Mg)	E (%) Dif
0-1,99	20,76	2,49	1,78	0,10	0,05	0,18	112,24
2-3,99	21,51	7,76	3,10	0,11	0,05	0,19	<b>40,21</b>
4-5,99	26,09	19,67	4,97	0,20	0,09	0,34	<b>33,32</b>
6-7,99	28,17	37,04	6,85	0,20	0,09	0,34	<b>36,52</b>
8-9,99	32,68	66,32	9,17	0,25	0,11	0,39	<b>39,82</b>
10-11,99	47,64	92,51	10,84	0,47	0,22	0,80	<b>57,28</b>
12-13,99	83,24	131,39	12,92	0,76	0,38	1,38	<b>54,01</b>
14-15,99	119,28	174,83	14,90	1,24	0,58	2,14	<b>49,57</b>
16-17,99	65,19	227,55	17,02	0,69	0,33	1,19	87,33
18-19,99	110,88	275,14	18,71	0,90	0,57	2,11	113,2
20-21,99	131,01	342,36	20,87	1,61	0,76	2,78	75,65
22-23,99	156,17	399,41	22,55	1,38	0,65	2,37	146,00
24-25,99	174,82	483,20	24,52	14,65	2,03	7,45	154,28
26-27,99	149,77	572,55	26,34	1,85	0,87	3,19	106,83
28-29,99	223,67	662,23	29,03	3,05	1,43	5,25	<b>36,33</b>
30-34,99	410,75	740,54	30,70	6,41	3,01	11,06	<b>21,55</b>
35-39,99	563,43	1107,84	37,51	13,94	5,50	20,17	92,94
40-49,99	122,80	1636,89	45,48	3,23	1,52	5,57	360,06
Error (%)				39,51	21,25	21,25	

Dónde: Cob de copa = Cobertura de copa (m), Cobertura de copa Qgis= Dato que brinda Qgis tras el procesamiento de la imagen satelital, CO<sub>2</sub>= dióxido de carbono, E (%) Dif= Error de la diferencia entre el dato de cobertura de copa tomado en campo respecto a la cobertura de copa generada a través del procesamiento de la imagen satelital.



**Figura 14**

Diferencia promedio y E (%) de límites de confianza de áreas de cobertura de copa

## Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones

El arbolado urbano y periurbano censado en los tres distritos del cantón de Heredia sobresale en términos de número de individuos las clases diamétricas menores, pero son más representativas en términos de reservorios de carbono las clases diamétricas mayores. Se evidencia el potencial en los sitios en estudio para la captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub> en los próximos años debido a la mayor cantidad de individuos jóvenes. Tras lo anterior cabe destacar la importancia del manejo y planificación adecuada de la arborización urbana para obtener incrementos positivos.

Para efectos del arbolado urbano, específicamente, para aplicar la teledetección remota, al contrario de aplicar una ecuación, el presentar los datos a través del cuadro de distribución permite brindar límites de confianza para utilizar como referencia solamente aquellos datos con menor sesgo y, por ende, mayor veracidad. En los resultados del presente estudio se refleja que la metodología aplicada para el procesamiento de las imágenes satelitales generó mejores resultados en espacios con menor densidad o en espacios más abiertos, con menor tangencia de copas. Esto resulta deficiente y limitante en sitios que presentan mayor densidad de individuos arbóreos, como es el ejemplo de los parques urbanos y periurbanos censados, debido a que se incrementan los factores limitantes mencionados. Además, se recomienda la búsqueda de imágenes satelitales de alta resolución, para evitar la afectación por estas limitantes.

Para continuar con los esfuerzos de crear una ecuación, se recomienda la consideración de otras variables en campo, esto para contar con más información relevante para la creación de correlaciones. En el presente estudio, para efectos de aplicar teledetección, se tomaron en consideración solamente aquellas variables que podían ser percibidas con mayor facilidad a través de una imagen satelital.

Finalmente, el aplicar estas nuevas tecnologías y herramientas de código libre, como Qgis, ofrece grandes posibilidades y nuevas herramientas que son de gran utilidad para generar índices regionales de biomasa arbórea urbana y periurbana, como lo fue para el presente tema de investigación. Por lo tanto, se recomienda continuar con la exploración de este tipo de metodologías.

## Referencias bibliográficas

- Aguas, C. (2016). *Estimación de biomasa aérea forestal en bosque de robledales del altiplano norte de Antioquia, utilizando teledetección* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. unal.edu.co.
- Ares, A.; Boniche, J.; Quesada, J.; Yost, R.; Molina, E. y Smyth, T. (2002). Estimación de biomasa por métodos alométricos, nutrimentos y carbono en plantaciones de palmito en Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 19-30. [https://www.researchgate.net/publication/26459550\\_Estimacion\\_de\\_biomasa\\_por\\_metodos\\_alometricos\\_nutrimentos\\_y\\_carbono\\_en\\_plantaciones\\_de\\_palmito\\_en\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/26459550_Estimacion_de_biomasa_por_metodos_alometricos_nutrimentos_y_carbono_en_plantaciones_de_palmito_en_Costa_Rica)
- Arévalo, L.; Alegre, J. y Palm, CH. (2003). *Manual de las reservas totales de carbono en los diferentes sistemas de uso de la tierra en Perú*. Publicación de STC-CGIAR Ministerio de agricultura.
- Arias, J. (2013). *Arborización urbana y ordenamiento territorial en la ciudad de San José: fallos y necesidades*. ISSN 1409-214X. Ambientico. 20-25. Universidad Nacional de Costa Rica. <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/232.pdf>
- Avellán, M. (2018). *Estimación del carbono almacenado en cuatro parques del distrito Central de Heredia, Costa Rica* [Trabajo de graduación de maestría, Tecnológico de Costa Rica (TEC)].
- Barboza, R. (2016). *Selección de especies para el arbolado urbano a partir del análisis de 10 parques urbanos municipales del cantón de Curridabat, San José, Costa Rica* [Trabajo de graduación licenciatura, Universidad estatal a distancia (UNED)]. [https://www.academia.edu/30389541/Especies\\_para\\_arbolado\\_urbano.\\_An%C3%A1lisis\\_de\\_10\\_parques\\_urbanos\\_del\\_cant%C3%B3n\\_de\\_Curridabat](https://www.academia.edu/30389541/Especies_para_arbolado_urbano._An%C3%A1lisis_de_10_parques_urbanos_del_cant%C3%B3n_de_Curridabat)
- Borelli, S.; Conigliaro, M. y Pineda, F. (2018). Los bosques urbanos en el contexto global. Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO). *Unasylva*, 69, 3-10. <file:///D:/Taller%20de%20graduacion/Nuevos/Bosques%20urbanos%20cuidados%20sostenibles.pdf>

- Brown, S. (1997). *Estimating biomass and biomass change of tropical forest: a Primer: FAO forest-rypaper-134*. [www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e00.htm](http://www.fao.org/docrep/W4095E/w4095e00.htm)
- Brown, S. y Lugo, A. (1984). *Biomass of tropical forests: a new estimate based on forest volumes*. *Science* 223, 1290. *Science*. 223: 1290 - 1293.  
[https://www.researchgate.net/publication/6081695\\_Biomass\\_of\\_Tropical\\_Forests\\_A\\_New\\_Estimate\\_Based\\_on\\_Forest\\_Volumes](https://www.researchgate.net/publication/6081695_Biomass_of_Tropical_Forests_A_New_Estimate_Based_on_Forest_Volumes)
- Cabudivo, K. (2017). *Secuestro de CO<sub>2</sub> y producción de oxígeno en árboles urbanos de la av. Abelardo Quiñones -distrito San Juan Bautista, Loreto, Perú, 2016* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP)].
- Cantero, F.; Tomé, J.; Bravo, J. y Fernández, A. (2017). *Herramientas de localización de árboles individuales con el módulo de procesamiento de QGIS a partir de información LiDAR y ortofotografía aérea*. Conference: 7º Congreso forestal Nacional. At: Plasencia, Cáceres, Extremadura. Volume: 7CFE01-137. [https://www.researchgate.net/publication/318641123\\_Herramientas\\_de\\_localizacion\\_de\\_arboles\\_individuales\\_con\\_el\\_modulo\\_de\\_procesado\\_de\\_QGIS\\_a\\_partir\\_de\\_informacion\\_LiDAR\\_y\\_ortofotografia\\_aerea](https://www.researchgate.net/publication/318641123_Herramientas_de_localizacion_de_arboles_individuales_con_el_modulo_de_procesado_de_QGIS_a_partir_de_informacion_LiDAR_y_ortofotografia_aerea)
- Carbonell, P. (2016). *Análisis del potencial reservorio de CO<sub>2</sub> en los bosques urbanos para el mejoramiento de la calidad social y ambiental en los cuatro distritos centrales de San José, Costa Rica* [Tesis de licenciatura]. Universidad Estatal a Distancia (UNED).
- Challenge, A. (2009). *Introducción a los servicios ambientales-Seminario de divulgación servicios ambientales: sustento de vida, SEMARNAT-INE*. [https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/sites/sernapam.tabasco.gob.mx/files/dpcc\\_introduccion\\_servicios\\_ambientales.pdf](https://tabasco.gob.mx/sites/all/files/sites/sernapam.tabasco.gob.mx/files/dpcc_introduccion_servicios_ambientales.pdf)
- Chuvieco, E. (2000). *Fundamentos de teledetección espacial Rialp S. A.* <https://www.slideshare.net/noldinn/fundamentos-deteledeteccionemiliochuvieco>
- Cordero, J. (2018). *Diseño de un sistema de cuantificación automática de biomasa que se basa en procesamiento de imágenes y fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados*. [Trabajo de graduación, licenciatura, Instituto Tecnológico de Costa Rica (TEC)]. [https://repositorio-tec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10429/disenio\\_sistema\\_cuantificacion\\_automatica\\_biomasa\\_basado\\_procesamiento\\_imagenes\\_fotogramtria\\_vehiculos\\_aereos\\_no\\_tripulados.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio-tec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/10429/disenio_sistema_cuantificacion_automatica_biomasa_basado_procesamiento_imagenes_fotogramtria_vehiculos_aereos_no_tripulados.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Del Águila, C. (2014). *Secuestro de CO<sub>2</sub> y almacenamiento de carbono en plantaciones de Cedrelinga cateniformis Ducke tornillo en tres edades diferentes en el Ciefor, Puerto Almendra, Río Nana, Iquitos Perú*. Universidad Nacional de la Amazonia Peruana (UNAP). [https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/2554/Secuestro de CO<sub>2</sub> y almacenamiento de carbono en plantaciones de Cedrelinga cateniformis Ducke.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unapiquitos.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12737/2554/Secuestro%20de%20CO2%20y%20almacenamiento%20de%20carbono%20en%20plantaciones%20de%20Cedrelinga%20cateniformis%20Ducke.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Díaz, G. (2012). El cambio climático. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227-240. <https://www.researchgate.org/publication/261179004>
- Dobbs, C. (2005). *Construcción de modelos de estimación de biomasa y área foliar para diez especies arbóreas urbanas de la ciudad de Santiago* [Memoria (ingeniero forestal), Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales]. [https://www.academia.edu/1334621/CONSTRUCCION\\_DE\\_MODELOS\\_DE\\_ESTIMACION\\_DE\\_BIOMASA\\_Y\\_AREA\\_FOLIAR\\_PARA\\_DIEZ\\_ESPECIES\\_ARBOREAS\\_URBANAS\\_DE\\_LA\\_CIUADAD\\_DE\\_SANTIAGO](https://www.academia.edu/1334621/CONSTRUCCION_DE_MODELOS_DE_ESTIMACION_DE_BIOMASA_Y_AREA_FOLIAR_PARA_DIEZ_ESPECIES_ARBOREAS_URBANAS_DE_LA_CIUADAD_DE_SANTIAGO)
- Dobbs, C.; Eleuterio, A.; Amaya, J.; Montoya, J.; y Kendal, D. (2018). *The benefits of urban and periurban forestry*. Unasylva. Vol 69. FAO. [https://www.researchgate.net/publication/323915389\\_The\\_benefits\\_of\\_urban\\_and\\_peri-urban\\_forestry](https://www.researchgate.net/publication/323915389_The_benefits_of_urban_and_peri-urban_forestry)
- Donegan, E.; Sola, G.; Cheng, Z.; Birigazzi, L.; Gamarra, J.G.P.; Henry, M.; Vielledent, G. y Chiti, T. (2014). *GlobAllomeTree wood density database*. file:///C:/Users/Wendy/AppData/Local/Temp/GlobAllomeTree\_s\_wood\_density\_database.pdf
- Ernst, S.; Wirth, C. y Heimann, M. (2000). Managing Forests After Kioto. *Science*, 289(5487), 2058-9. [https://www.researchgate.net/publication/12290949\\_Managing\\_Forests\\_After\\_Kyoto](https://www.researchgate.net/publication/12290949_Managing_Forests_After_Kyoto)
- Fonseca, M. (2015). Cambio climático, una oportunidad y un reto para el sector agropecuario. *Crisol. Revista de Ciencia y Tecnología de la UCR*, 29, 26-27. [https://odi.ucr.ac.cr/medios/documentos/crisol/revista\\_crisol\\_29.pdf](https://odi.ucr.ac.cr/medios/documentos/crisol/revista_crisol_29.pdf)
- Fonseca, W. (2016). *Construcción de Funciones Alométricas para Costa Rica en el Contexto del proyecto de Protección Ambiental a través de la Protección de los Bosques de Centroamé-*

*rica (Informe final)*. Inventario nacional forestal, Costa Rica 2012-2013. <http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/694/Construcci%20de%20Funciones%20Alom%20a%20tricas%20para%20CR%20en%20el%20Contexto%20del%20Proyecto%20de%20Protecci%20Ambienta%20a%20trav%20de%20la%20Protecci%20de%20los%20Bosques%20de%20Centro%20Am%20rica%20%28Informe%20final%29.pdf?sequence=1&isAllowed=>

Fonseca, W.; Ruiz, L.; Rojas, M. y Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 6(2), 37-50. <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/7218/7425>

Freitas, L.; Otárola, E.; del Castillo, D.; Linares, C.; Martínez, P. y Malca, G. (2006). *Servicios ambientales de almacenamiento y secuestro de carbono del ecosistema Aguajal en la Reserva Nacional Pacaya Samiria, Loreto - Perú*. [https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/228/2/Freitas\\_documentotecnico\\_2006.pdf](https://repositorio.iiap.gob.pe/bitstream/20.500.12921/228/2/Freitas_documentotecnico_2006.pdf)

Gasparri, N.; Parmuchi, M.; Bono, J.; Karszenbaum, H. y Montenegro, C. (2007). *Utilidad de imágenes Landsat 7 ETM+ de diferentes fechas para la estimación de biomasa aérea en bosques subtropicales secos de Argentina*. XII Congreso Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata Argentina 19 al 21 de septiembre de 2007. [https://www.researchgate.net/profile/Nestor\\_Gasparri/publication/237265574\\_Utilidad\\_de\\_imagenes\\_Landsat\\_7\\_ETM\\_de\\_diferentes\\_fechas\\_para\\_la\\_estimacion\\_de\\_biomasa\\_aerea\\_en\\_bosques\\_subtropicales\\_secos\\_de\\_Argentina/links/0046352926653a31c3000000/Utilidad-de-imagenes-Landsat-7-ETM-de-diferentes-fechas-para-la-estimacion-de-biomasa-aerea-en-bosques-subtropicales-secos-de-Argentina.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Nestor_Gasparri/publication/237265574_Utilidad_de_imagenes_Landsat_7_ETM_de_diferentes_fechas_para_la_estimacion_de_biomasa_aerea_en_bosques_subtropicales_secos_de_Argentina/links/0046352926653a31c3000000/Utilidad-de-imagenes-Landsat-7-ETM-de-diferentes-fechas-para-la-estimacion-de-biomasa-aerea-en-bosques-subtropicales-secos-de-Argentina.pdf)

Herrera, E. y Herrera, M. (2013). *Comercialización del servicio de mitigación de gases de efecto invernadero (GEI): generado en fincas con contrato de PSA área del proyecto Zona Atlántica*. Fonafifo-Minaet. <http://www.fonafifo.go.cr/media/2558/documento-2-proyecto-zona-norte-2019.pdf>

Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica (IMN). (2008). *Atlas climatológico de Costa Rica*. <http://www.imn.ac.cr>

- Jellicoe, G. A. (1985). *The search for a paradise garden (IFLA Yearbook 1985/86)*. International Federation of Landscape Architects.
- Jiménez, L.; Valverde, J. y Arias, D. (2018). Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb. procedente de plantaciones con manejo de rebrotes. *Revista mesoamericana Kurú*, 15, 53-60.  
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/kuru/v15s1/2215-2504-kuru-15-s1-53.pdf>
- Jiménez, Q. (2013). *Arbolado urbano: beneficios, desaciertos y realidad en la Gran Área Metropolitana*. SSN 1409-214X. *Ambientico*, 4-12. <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/232.pdf>
- Jiménez, Q.; Estrada, A.; Arias, J.; Sánchez, G.; Artavia, R.; Valle, D.; Quesada, G.; Harb, D.; Feoli, S.; Acosta, V.; Monga, J. y Barrientos, Z. (2013, abril-mayo). *Biodiversidad en la ciudad costarricense*. *Ambientico*. <http://www.ambientico.una.ac.cr/pdfs/ambientico/232.pdf>
- Koch, B. (2013). *La teledetección como apoyo a los inventarios forestales nacionales EFN*. Antología de conocimientos para la evaluación de los recursos forestales nacionales.
- Malleux, J. (1970). Estudio de la Relación, D.A.P. con el Diámetro de Copa en un Bosque Húmedo Sub Tropical. *Revista forestal del Perú*, 4.
- Manual de arborización urbana. (2008). *Guía práctica para la selección, siembra, cuidado y protección de árboles y palmas para zonas blandas y parques de Santiago Chile*. Departamento Administrativo de Gestión del Medio Ambiente-Dagma. [https://www.academia.edu/4977797/MANUAL\\_DE\\_ARBORIZACION\\_PARA\\_LA\\_SELECCION\\_SIEMBRA\\_CUIDADO\\_Y\\_PROTECCION\\_DE\\_ARBOLES\\_Y\\_PALMAS\\_PARA\\_ZONAS\\_BLANDAS\\_Y\\_PARQUES\\_DE\\_SANTIAGO\\_DE\\_CALI\\_Colombia](https://www.academia.edu/4977797/MANUAL_DE_ARBORIZACION_PARA_LA_SELECCION_SIEMBRA_CUIDADO_Y_PROTECCION_DE_ARBOLES_Y_PALMAS_PARA_ZONAS_BLANDAS_Y_PARQUES_DE_SANTIAGO_DE_CALI_Colombia)
- Martínez, R. (2014). *Modelación de la DINÁMICA del carbono en Bosques del Estado de Durango* [Tesis de maestría, Ciencias Forestales, Univ. Autónoma de Nuevo León].
- Maza, C.; Rodríguez, M.; Hernández, J.; Serra, M.; Gutiérrez, P.; Escobedo, F. y Varnero, M. (2005). Vegetación urbana como factor de descontaminación. *Chile forestal-Corporación Nacional forestal (Chile)* (313), 46-49.

- Méndez, M.; Ramírez, L. y Alzate, A. (2005). La práctica de la agricultura urbana como expresión de la emergencia de nuevas ruralidades: reflexión en torno a la evidencia empírica. En: *Cuadernos de desarrollo rural*, 55, 51-70. file:///C:/Users/Wendy/Downloads/1243-Texto%20del%20art%C3%ADculo-3852-1-10-20110411.pdf
- Méndez, M.; Ramírez, L. y Alzate, A. (2005). La práctica de la agricultura urbana como expresión de emergencia de nuevas ruralidades: reflexiones en torno a la evidencia empírica. *Cuadernos de Desarrollo Rural*, (55). <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/desarrolloRural/article/view/1243>
- Ministerio de ambiente, Energía y Telecomunicaciones (Minaet). (2009). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*. Calderón y Alvarado, S. A.
- Ministerio del Ambiente (Minam). (2009). *Identificación de Metodologías existentes para determinar stock de carbono en ecosistemas forestales*. Segunda Comunicación Nacional del Perú a la CMNUCC. Viceministerio de Desarrollo Estratégico de Recursos Naturales. <https://libelula.com.pe/wp-content/uploads/2014/10/SCNCC-Minam.pdf>
- Ministerio del Ambiente (Minam). (2015). *Guía de inventario de flora y vegetación*. Ministerio del Ambiente, Dirección General de Evaluación, Valoración y Financiamiento del Patrimonio Natural. <http://www.minam.gob.pe/patrimonio-natural/wp-content/uploads/sites/6/2013/10/GU%C3%83-A-DE-FLORA-Y-VEGETACI%C3%83%E2%80%9CN.compressed.pdf>
- Mogas, J. y Rivera, P. (2004). *El valor de la fijación de carbono en programas de reforestación*. II Simposio iberoamericano de gestión y economía forestal.
- Molina, E. (2018). *Plan de gestión de Emisiones de Gases de efecto invernadero para alcanzar la carbononeutralidad*, Compañía de Galletas Pozuelo DCR, S. A. [Trabajo de graduación para el grado de licenciatura, Universidad Nacional].
- Montero, M. y Montagnini, F. (2005). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Revista Recursos Naturales y Ambiente*, 5, 112-119. [https://www.researchgate.net/publication/284401254\\_Modelos\\_alometricos\\_para\\_la\\_estimacion\\_de\\_biomasa\\_de\\_diez\\_especies\\_nativas\\_en\\_plantaciones\\_en\\_la\\_region\\_Atlantica\\_de\\_Costa\\_Rica](https://www.researchgate.net/publication/284401254_Modelos_alometricos_para_la_estimacion_de_biomasa_de_diez_especies_nativas_en_plantaciones_en_la_region_Atlantica_de_Costa_Rica)

- Muukkonen, P. y Heiskanen, J. (2007). Biomass estimation over a large area based on stand wise forest inventory data and ASTER and MODIS satellite data: A possibility to verify carbon inventories. Science Direct. *Remote Sensing of Environment*, 107, 617-624. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S003442570600407X?via%3Dihub>
- Navarro, E. y Álvarez, E. (2015). Agroecosistemas periurbanos, un potencial latente. Contribución al análisis de la multifuncionalidad a partir de indicadores de sustentabilidad. *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica* Vol. 24:107-121. [https://www.academia.edu/23765328/AGROECOSISTEMAS\\_PERIURBANOS\\_UN\\_POTENCIAL\\_LATENTE\\_Contribuci%C3%B3n\\_al\\_an%C3%A1lisis\\_de\\_la\\_multifuncionalidad\\_a\\_partir\\_de\\_indicadores\\_de\\_sustentabilidad](https://www.academia.edu/23765328/AGROECOSISTEMAS_PERIURBANOS_UN_POTENCIAL_LATENTE_Contribuci%C3%B3n_al_an%C3%A1lisis_de_la_multifuncionalidad_a_partir_de_indicadores_de_sustentabilidad)
- Nowak, D. (1994). *Atmospheric carbon dioxide reduction by Chicago urban forest*. Chicago urban forest ecosystem: results of the Chicago Urban Forest Climate Project. [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr\\_ne186.pdf](https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/gtr/gtr_ne186.pdf)
- Nowak, D.; Hoehn, R. y Crane, D. (2007). Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*, 33(3), 220-226. [https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2007/nrs\\_2007\\_nowak\\_001.pdf](https://www.nrs.fs.fed.us/pubs/jrnl/2007/nrs_2007_nowak_001.pdf)
- ONU-Hábitat. (2011). *Cities and Climate Change: Global Report on Human Settlements*.
- Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC). (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. <http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- Pete, S. y Bustamante, M. (2014). *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*. Sl. IPCC. [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/103008543/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter11.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/103008543/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf)
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). (2019). *Paisajes productivos*. <https://www.paisajesproductivos.org/index.php#close>
- Quiceno, N. y Tangarife, G. (2013). *Estimación del contenido de biomasa, fijación de carbono y servicios ambientales, en un área de bosque primario en el resguardo indígena Piapoco Chiguiro-Chatare de Barrancominas, departamento del Guainía* [Tesis de maestría, Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Universidad de Manizales].

[http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1639/402\\_Quiceno\\_Urbina\\_Nubia\\_Janeth\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/1639/402_Quiceno_Urbina_Nubia_Janeth_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

- Quiñónez, L. (2010). Gestión forestal urbana como mecanismo de captura de carbono en el campus de la Pontificia Universidad Javeriana, sede Bogotá, D.C. [Trabajo de grado, Magister en Gestión Ambiental, Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Estudios Ambientales y Rurales, 161].
- Reyes, S., Barbosa, O., Celis, J. y de la Barrer, F. (2018). Ecosistemas Urbanos. Biodiversidad de Chile. Patrimonio y Desafíos. Ministerio del Medio Ambiente, Chile. [https://www.researchgate.net/publication/326257890\\_Ecosistemas\\_Urbanos](https://www.researchgate.net/publication/326257890_Ecosistemas_Urbanos)
- Rodríguez, R. (2014). *Inventario de emisiones-absorciones de gases de efecto invernadero en el sector forestal y uso del suelo (FOLU) del cantón de Belén para el periodo 2006-2013*. Universidad Nacional de Costa Rica. <https://www.belen.go.cr/documents/20181/76300/Inventario+de+emisiones+y+absorciones+de+gases+de+efecto+invernadero+en+el+sector+forestal+y+uso+.pdf/d14d08ae-b5f8-4b67-ab70-be8e46781bfa>
- Rodríguez, R. y Fonseca, W. (2015). *Almacenamiento de carbono en los distritos Pavas, San Francisco, San Sebastián, La Uruca y Hatillo, cantón de San José*. Laboratorio de Análisis Ambiental-proyecto Manejo del cambio climático a través del sector forestal de Costa Rica.
- Rodríguez, R.; Jiménez, J.; Aguirre, O. y Treviño, E. (2006). Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia UANL*, 9(2), 179-188.
- Rodríguez-Veiga, P.; Saatchi, S.; Tansey, K. y Balzter, H. (2016). Magnitude, spatial distribution and uncertainty of forest biomass stocks in México. *Remote Sensing of Environment*, 183, 265-281. DOI. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.06.004>
- Rojas, M. (2016). *Elaboración línea base de biomasa y carbono en el CBIMA y ACLAP*. Proyecto Conservando la biodiversidad a través de la gestión sostenible en los paisajes de producción en Costa Rica.
- Sánchez, G. y Artavia, R. (2013). *Inventario de la foresta de San José: Gestión ambiental urbana*. *Ambientico*, 232-233, 26-33.

- SánchezMonge, M. 2013. Protocolo de establecimiento y medición de Parcelas Permanentes de Muestreo en bosque natural. Para la Red de Parcelas Permanentes de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (RedMEF). Heredia, Costa Rica, Inisefor - Universidad Nacional. 47 p.
- Schlegel, B. (2001). *Estimación de la biomasa y carbono en Bosques del tipo forestal siempre verde*. Universidad Austral de Chile. [https://www.researchgate.net/publication/255632322\\_ESTIMACION\\_DE\\_LA\\_BIOMASA\\_Y\\_CARBONO\\_EN\\_BOSQUES\\_DEL\\_TIPO\\_FORESTAL\\_SIEMPREVERDE\\_1](https://www.researchgate.net/publication/255632322_ESTIMACION_DE_LA_BIOMASA_Y_CARBONO_EN_BOSQUES_DEL_TIPO_FORESTAL_SIEMPREVERDE_1)
- Segura, M. y Kanninen, M. (2005). Allometric models for tree volume and total aboveground biomass in a tropical humid forest in Costa Rica. *Biotropica*, 37, 2-8. [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/242/Allometric\\_models\\_for\\_tree\\_volume.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/242/Allometric_models_for_tree_volume.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Sevillano, E.; Quintano, C.; Fernández, A. y Shimabukuro, Y. (2009). *Estimación de biomasa en Pinus Radiata (D. don) a partir de Índices Derivados de Imágenes CCD-CBERS*. Calatayud. <http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal83.pdf>
- Smith, P.; Bustamante, M.; Ahammad, H.; Clark, H.; Dong, H.; Elsiddig, E. A.; Haberl, H.; Harper, R.; House, J.; Jafari, M.; Masera, O.; Mbow, C.; Ravindranath, N. H.; Rice, C. W.; Abad, C. R.; Romanovskaya, A.; Sperling, F.; Tubiello, F. N. y Bolwig, S. (2014). *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)*. In Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. [https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/103008543/ipcc\\_wg3\\_ar5\\_chapter11.pdf](https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/103008543/ipcc_wg3_ar5_chapter11.pdf)
- Sociedad Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ). (2019). *Costa Rica: Género y transporte en Costa Rica*. <https://gender-works.giz.de/competitions2020/costa-rica-genero-y-transporte-en-costa-rica/>
- Solano, J. (2015). *4.º Informe de la contratación por servicios profesionales n.º 2015Cd-000022-01*. Informe final. <https://www.belen.go.cr/documents/20181/76421/Inventario+forestal+Bel%C3%A9n.pdf/462512c3-39eb-4d42-a7da-48139b673b13>
- Stoffberg, G.; Van Rooyen, M.; Van der Linde, M. y Groeneveld, H. (2010). *Carbon sequestration estimates of indigenous street trees in the City of Tshwane, South Africa*. Urban Forestry &

Urban Greening, 9. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1618866709000648?via%3Dihub>

Streck, C. y Scholz, S. M. (2006). Journal Compilation. Blackwell Publishing Ltd/The Royal Institute of International Affairs. *International Affairs*, 82, 5, 861- 879.

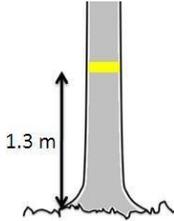
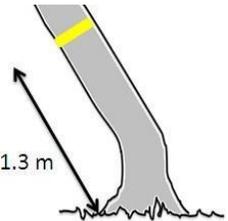
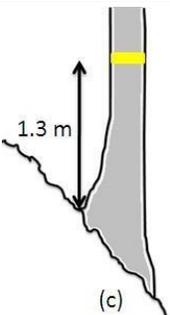
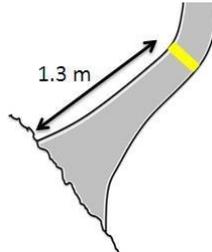
INTA82\_5\_03\_Streck.indd (gppi.net)

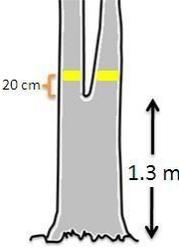
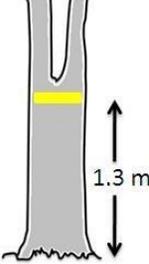
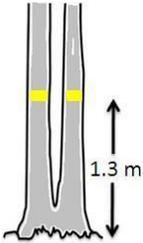
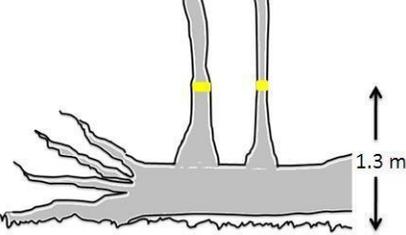
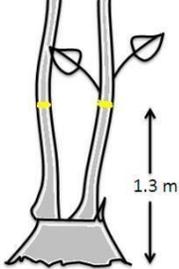
Weber, M. (2003). The Global Carbon Cycle and the Greenhouse Effect. *En: Seminario Forest Management for Carbon Sequestration*. Facultad de Agronomía e Ingeniería forestal. Pontificia Universidad Católica de Chile.

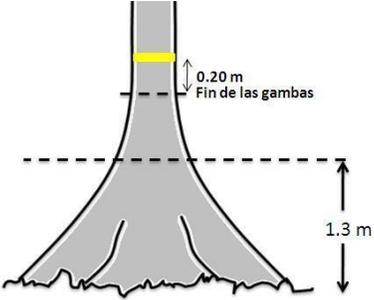
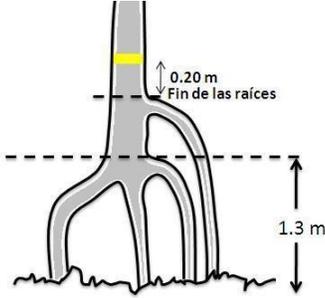
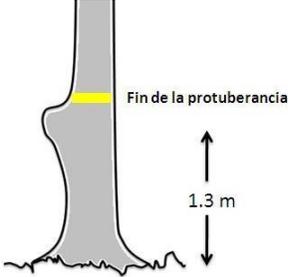
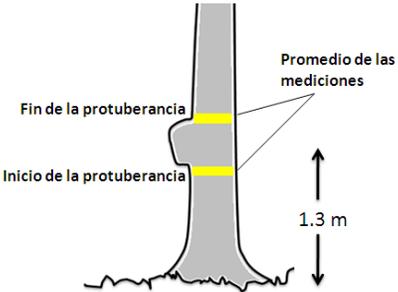
Zanne, A.; López, G.; Coomes, D.; Ilic, J.; Jansen, S.; Lewis, S.; Miller, R.; Swenson, N.; Wiemann, M. y Chave, J. (2009). *Global wood density database*. <https://datadryad.org/stash/dataset/doi:10.5061/dryad.234>

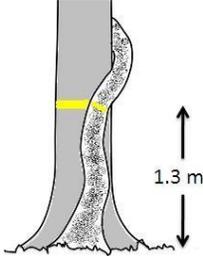
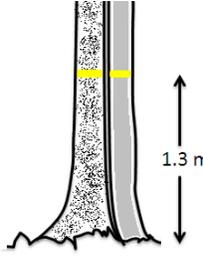
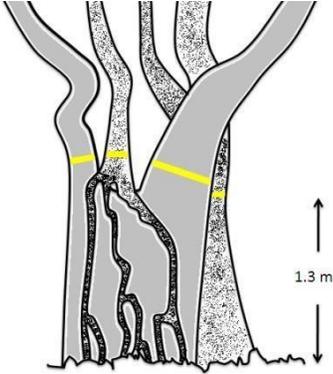
## Anexos

### Anexo 1. Consideraciones para la medición del DAP en campo, Fuente: Sánchez-Monge (2013)

Guía para la medición del DAP	
	A) Diámetro de la sección normal del árbol que se encuentra a 1.30 m desde la base
	B) En terreno plano y árboles inclinados se mide el diámetro a 1.30 m por el lado hacia donde está inclinado el fuste
 <p>(c)</p>	C) En terreno inclinado y árboles verticales se mide el diámetro a 1.30 m medidos verticalmente por el lado del fuste que está más arriba de la pendiente.
	D) En terreno y árboles inclinados se mide el diámetro a 1.30 m medidos al seguir la inclinación del fuste por el lado más arriba de la pendiente.

	<p>E) Árbol bifurcado a 1.30 m, se toma como un árbol con dos ejes y el diámetro de cada eje se mide 20 cm por arriba de la bifurcación.</p>
	<p>F) Árbol bifurcado por encima de 1.30 m, se toma como un árbol con un eje y el diámetro se mide a 1.30 m.</p>
	<p>G) Árbol bifurcado por debajo de 1.30 m, se toma como un árbol con dos ejes y el diámetro de cada eje se mide a 1.30 m</p>
	<p>H) Árbol caído que presenta rebrotes, se toma como un árbol con dos o más ejes y el diámetro de cada eje se mide a 1.30 m desde el suelo.</p>
	<p>I) Árbol cortado o tocón que presenta rebrotes.</p>

	<p>J) Árbol con gambas a 1.30 m, el diámetro del fuste se mide a 20 cm medidos a partir de donde terminan las gambas.</p>
	<p>K) Árbol con raíces fúlcreas a 1.30 m, el diámetro del fuste se mide a 20 cm medidos a partir de donde terminan las raíces fúlcreas</p>
	<p>L) Árbol con protuberancias o deformaciones en la mayor parte de la sección normal, desde el suelo hasta 1.30 m de altura, se mide el diámetro del fuste inmediatamente después del fin de la protuberancia o deformación.</p>
	<p>M) Árbol con una protuberancia o deformación localizada en la sección normal a 1.30 m del suelo, se mide el diámetro del fuste inmediatamente antes e inmediatamente después de la protuberancia o deformación.</p>

	<p>N) Árbol con trepadoras o árboles parásitos que miden más de 10 cm de grosor al 1.30 m, se mide el diámetro del árbol y de la especie trepadora.</p>
	<p>Ñ) Dos o más árboles contiguos que no permiten el paso de la cinta diamétrica, se mide el diámetro de todos los árboles, de ser necesario presentando la cinta métrica en una de las caras del árbol, la marca debe quedar del lado que se midió.</p>
	<p>O) Grupo de árboles que ocupan el mismo sitio, se mide el diámetro de todos los individuos ya sean árboles, trepadoras, árboles contiguos o árboles parásitos. La selección del punto de medición debe tratar de seguir todas las reglas anteriores. En última instancia la decisión queda a criterio del evaluador, pero se debe marcar claramente el sitio de medición</p>

## Anexo 2. Formulario para la toma de datos en campo

GPS	N.º Árbol	Especie	DAP (cm)	Altura (m)	DcN-S (m)	DcE-O (m)	Observaciones
-----	--------------	---------	----------	------------	--------------	--------------	---------------

Donde:

**DAP**= Diámetro a la altura de pecho (1,30 m).

**Dc N-S**=Diámetro de copa en dirección norte a sur.

**Dc E-O**= Diámetro de copa en dirección este a oeste.

**Anexo 3. Biomasa, existencia de carbono y almacenamiento de CO2e por especie censada, Heredia, Costa Rica 2020**

<b>Especie</b>	<b>DAP prom</b>	<b>Cobertura de copa en campo (m)</b>	<b>Biomasa (Mg)</b>	<b>Carbono (Mg)</b>	<b>CO2e (Mg)</b>
<i>Acnistus arborescens</i>	84.95	13.00	0.19	0.09	0.33
<i>Anacardium occidentale</i>	42.90	9.50	0.14	0.07	0.24
<i>Andira inermis</i>	197.00	31.00	3.35	1.57	5.78
<i>Annona muricata</i>	112.50	12.00	0.42	0.20	0.72
<i>Averrhoa carambola</i>	20.90	6.00	0.13	0.06	0.22
<i>Bauhinia acuminata</i>	10.75	3.00	0.02	0.01	0.03
<i>Bauhinia purpurea</i>	234.35	30.00	1.80	0.84	3.10
<i>Bauhinia sp</i>	33.33	5.50	0.10	0.04	0.16
<i>Bauhinia variegata</i>	13.60	4.00	0.03	0.02	0.06
<i>Bursera simaruba</i>	43.60	2.00	0.19	0.09	0.33
<i>Callistemon virminalis</i>	1074.68	137.50	6.14	2.88	10.58
<i>Calycophyllum candidisimun</i>	41.20	9.50	0.55	0.26	0.96
<i>Cassia fistula</i>	199.70	35.25	0.81	0.38	1.39

<i>Cedrela odorata</i>	159.00	12.50	3.02	1.42	5.20
<i>Chrysophyllum cainito</i>	51.70	10.50	0.93	0.44	1.61
<i>Citharexylum donnell-smithii</i>	275.09	59.50	1.31	0.62	2.26
<i>Citharexylum macradenium</i>	10.95	3.50	0.02	0.01	0.04
<i>Citrus sp</i>	60.90	8.50	0.13	0.06	0.23
<i>Clusia sp</i>	11.33	6.00	0.02	0.01	0.03
<i>Cnidoscolus aconitifolius</i>	144.00	19.50	0.40	0.19	0.69
<i>Coccoloba caracasana</i>	25.35	7.00	0.16	0.07	0.27
<i>Cojoba arborea</i>	1492.88	151.50	25.20	11.84	43.43
<i>Croton draco</i>	102.70	8.50	0.69	0.33	1.20
<i>Cupressus sp</i>	428.43	54.50	2.83	1.33	4.87
<i>Delonix regia</i>	206.83	38.50	1.85	0.87	3.18
<i>Dendropanax cuneatus</i>	41.00	6.00	0.30	0.14	0.52
<i>Diphysa americana</i>	303.28	48.25	2.57	1.21	4.43
<i>Diphysa carthagenensis</i>	599.70	90.00	4.30	2.02	7.41
<i>Enterolobium cyclocarpum</i>	219.40	24.00	7.35	3.45	12.67

<i>Eriobotrya japonica</i>	91.00	17.00	0.43	0.20	0.75
<i>Erythrina poeppigiana</i>	27.10	2.00	0.15	0.07	0.26
<i>Eucalyptus sp</i>	88.10	13.50	1.31	0.61	2.25
<i>Eugenia salamensis</i>	17.90	5.00	0.12	0.05	0.20
<i>Eugenia sp</i>	29.56	9.00	0.12	0.06	0.21
<i>Eugenia uniflora</i>	27.25	5.25	0.06	0.03	0.11
<i>Euphorbiaceae</i>	18.30	3.50	0.03	0.02	0.06
<i>Ficus benjamina</i>	1858.37	257.00	17.62	8.28	30.36
<i>Ficus costarricana</i>	12.26	7.00	0.02	0.01	0.03
<i>Ficus sp</i>	465.30	54.50	9.31	4.38	16.05
<i>Gaiadendron punctatum</i>	209.70	40.50	2.05	0.96	3.53
<i>Guatteria sp</i>	32.30	3.00	0.34	0.16	0.59
<i>Handroanthus impetiginosus</i>	538.75	130.00	3.71	1.74	6.39
<i>Handroanthus ochraceus</i>	220.63	46.25	0.79	0.37	1.36
<i>Hibiscus pernambucensis</i>	10.20	6.00	0.02	0.01	0.04
<i>Ilex sp</i>	19.25	2.50	0.04	0.02	0.07

<i>Inga sp</i>	36.80	6.50	0.22	0.10	0.37
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	553.40	104.00	4.08	1.92	7.04
<i>Juglans olanchana</i>	53.50	9.00	0.81	0.38	1.39
<i>Lagerstroemia speciosa</i>	33.83	9.25	0.15	0.07	0.25
<i>Lauraceae</i>	248.42	41.00	1.30	0.61	2.24
<i>Leucaena leucocephala</i>	38.30	12.00	0.18	0.08	0.31
<i>Malpighia glabra</i>	31.85	4.50	0.06	0.03	0.10
<i>Mangifera indica</i>	293.14	58.50	0.77	0.36	1.33
<i>Mauria heterophylla</i>	28.17	10.50	0.25	0.12	0.44
<i>Moringa oleifera</i>	54.35	13.50	0.19	0.09	0.33
<i>Myrcianthes fragans</i>	139.93	25.00	2.06	0.97	3.54
<i>Myrospermum frutescens</i>	12.10	4.00	0.02	0.01	0.04
<i>Pimenta dioica</i>	13.50	1.00	0.02	0.01	0.04
<i>Pinus sp</i>	4924.95	385.75	76.27	35.85	131.45
<i>Plumeria rubra</i>	18.75	8.00	0.09	0.04	0.16
<i>Psidium friedrichsthalium</i>	555.69	95.00	2.19	1.03	3.78

<i>Psidium guajava</i>	831.58	191.50	3.20	1.50	5.51
<i>Rhamnus sp</i>	34.30	4.50	0.29	0.14	0.50
<i>Rollinia membranacea</i>	66.80	13.50	0.14	0.06	0.23
<i>Roupala montana</i>	179.70	33.00	3.66	1.72	6.31
<i>Samanea saman</i>	156.60	32.00	1.44	0.68	2.49
<i>Sapium glandulosum</i>	10.30	3.00	0.01	0.00	0.01
<i>Schinus terebinthifolia</i>	16.10	7.50	0.06	0.03	0.10
<i>Spathodea campanulata</i>	1465.73	187.50	28.89	13.58	49.79
<i>Spondias purpurea</i>	68.60	4.50	0.96	0.45	1.66
<i>Swietenia macrophylla</i>	81.10	11.50	2.42	1.14	4.17
<i>Syzygium malaccense</i>	28.50	1.25	0.08	0.04	0.14
<i>Syzygium paniculatum</i>	166.26	18.00	0.40	0.19	0.68
<i>Tabebuia rosea</i>	2066.60	341.50	23.89	11.23	41.17
<i>Tapirira guianensis</i>	23.10	5.50	0.12	0.06	0.21
<i>Tapirira sp</i>	18.60	2.50	0.07	0.03	0.12
<i>Tecoma stans</i>	267.00	58.00	1.25	0.59	2.15

<i>Terminalia sp</i>	859.20	169.75	3.41	1.60	5.88
<i>Thevetia peruviana</i>	81.93	14.00	0.26	0.12	0.45
<i>Trema micrantha</i>	22.20	3.25	0.06	0.03	0.10
<i>Trichilia havanensis</i>	811.89	142.75	3.63	1.71	6.25
<i>Trichilia havanensis</i>	20.40	4.50	0.04	0.02	0.08
<i>Trichilia martiana</i>	27.40	1.50	0.05	0.02	0.08
<i>Turpinia sp</i>	34.40	4.50	0.17	0.08	0.29
<i>Ugni myricoides</i>	14.20	6.00	0.04	0.02	0.06
<i>Vochysia guatemalensis</i>	34.20	10.00	0.20	0.09	0.34
<i>Zygia longifolia</i>	215.65	60.50	0.81	0.38	1.39
<b><i>Total general</i></b>	<b>24546.99</b>	<b>3568</b>	<b>265.26</b>	<b>124.67</b>	<b>457.18</b>

**Anexo 4. Biomasa, carbono y CO<sub>2</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos tomados en campo presentado por rango de cobertura de copa**

<b>Rangos de cobertura de copa (m)</b>	<b>Cobertura de copa promedio en campo (m)</b>	<b>Biomasa promedio (kg)</b>	<b>Carbono promedio (kg)</b>	<b>CO<sub>2</sub> promedio (kg)</b>	<b>Biomasa promedio (Mg)</b>	<b>Carbono promedio (Mg)</b>	<b>CO<sub>2</sub> promedio (Mg)</b>
<b>0-1.9</b>	1.16	113.09	53.15	194.92	0.11	0.05	0.1949
<b>2-3.9</b>	2.77	173.61	81.59	299.21	0.17	0.08	0.2992
<b>4-5.9</b>	4.74	275.69	129.57	475.14	0.28	0.13	0.4751
<b>6-7.9</b>	6.60	472.52	222.08	814.38	0.47	0.22	0.8144
<b>8-9.9</b>	8.60	933.32	438.66	1608.57	0.93	0.44	1.6086
<b>10-11.9</b>	10.86	1024.13	481.34	1765.08	1.02	0.48	1.7651
<b>12-13.9</b>	12.60	1207.00	567.29	2080.26	1.21	0.57	2.0803
<b>14-15.9</b>	15.00	5728.65	2692.47	9873.28	5.73	2.69	9.8733
<b>16-17.9</b>	17.00	2891.34	1358.93	4983.19	2.89	1.36	4.9832
<b>Total general</b>	<b>79.33</b>	<b>12819.35</b>	<b>6025.10</b>	<b>22094.03</b>	<b>12.82</b>	<b>6.03</b>	<b>22.09</b>
<b>Promedio general</b>	<b>8.81</b>	<b>1424.37</b>	<b>669.46</b>	<b>2454.89</b>	<b>1.42</b>	<b>0.67</b>	<b>2.45</b>

**Anexo 5. Biomasa, carbono y CO<sub>2e</sub> promedio almacenado arriba del suelo en individuos arbóreos según datos del procesamiento de imágenes presentados por rango de cobertura de copa**

<b>Rangos de cobertura de copa (m)</b>	<b>Cobertura de copa promedio según Qgis (m)</b>	<b>Biomasa promedio (kg)</b>	<b>Carbono promedio (kg)</b>	<b>CO<sub>2e</sub> promedio (kg)</b>	<b>Biomasa promedio (Mg)</b>	<b>Carbono promedio (Mg)</b>	<b>CO<sub>2e</sub> promedio (Mg)</b>
<b>0- 1.99</b>	1.78	102.40	48.13	176.48	0.10	0.05	0.18
<b>2- 3.99</b>	3.10	111.36	52.34	191.92	0.11	0.05	0.19
<b>4- 5.99</b>	4.97	201.00	94.55	344.09	0.20	0.09	0.34
<b>6- 7.99</b>	6.85	200.22	94.04	344.84	0.20	0.09	0.34
<b>8- 9.99</b>	9.17	250.45	105.45	386.69	0.25	0.11	0.39
<b>10- 11.99</b>	10.84	466.26	219.19	803.77	0.47	0.22	0.80
<b>12- 13.99</b>	12.92	757.88	375.79	1378.01	0.76	0.38	1.38
<b>14-15.99</b>	14.90	1243.24	584.40	2142.99	1.24	0.58	2.14
<b>16-17.99</b>	17.02	692.62	325.52	1193.66	0.69	0.33	1.19
<b>18-19.99</b>	18.71	904.10	574.93	2108.25	0.90	0.57	2.11
<b>20- 21.99</b>	20.87	1613.38	758.11	2780.00	1.61	0.76	2.78
<b>22- 23.99</b>	22.55	1375.72	646.58	2371.02	1.38	0.65	2.37
<b>24- 24.99</b>	24.52	20961.06	2566.70	9412.10	20.96	2.57	9.41
<b>25- 27.99</b>	26.34	1926.07	905.26	3319.57	1.93	0.91	3.32
<b>28- 29.99</b>	29.03	3047.63	1432.39	5252.56	3.05	1.43	5.25
<b>30-34.99</b>	30.70	6414.86	3014.98	11055.91	6.41	3.01	11.06
<b>35-39.99</b>	37.51	13943.91	5499.56	20166.90	13.94	5.50	20.17
<b>40-49.99</b>	45.48	3231.00	1518.57	5568.58	3.23	1.52	5.57
<b>Total general</b>	<b>337.26</b>	<b>57443.16</b>	<b>18816.46</b>	<b>68997.34</b>	<b>57.44</b>	<b>18.82</b>	<b>69.00</b>

**Anexo 6. Diferencia promedio de cobertura de copa en datos tomados en campo vs. datos del procesamiento de imágenes satelitales por rangos de cobertura de copa**

<b>Rangos de cobertura de copa (m)</b>	<b>Cobertura de copa promedio según Qgis (m)</b>	<b>Cobertura de copa promedio en campo (m)</b>	<b>Diferencia promedio (m)</b>
<b>0- 1.99</b>	1.78	2.88	2.10
<b>2- 3.99</b>	3.10	2.72	1.54
<b>4- 5.99</b>	4.97	3.83	1.81
<b>6- 7.99</b>	6.85	4.48	2.55
<b>8- 9.99</b>	9.17	5.92	3.87
<b>10- 11.99</b>	10.84	7.64	6.95
<b>12- 13.99</b>	12.92	12.76	8.29
<b>14-15.99</b>	14.90	14.16	6.26
<b>16-17.99</b>	17.02	11.82	5.47
<b>18-19.99</b>	18.71	20.25	6.65
<b>20- 21.99</b>	20.87	20.94	8.59
<b>22- 23.99</b>	22.55	21.42	2.72

---

<b>24- 24.99</b>	24.52	23.75	2.72
<b>25- 27.99</b>	26.34	29.10	7.65
<b>28- 29.99</b>	29.03	32.42	3.43
<b>30-34.99</b>	30.70	49.50	18.80
<b>35-39.99</b>	37.51	55.75	40.21
<b>40-49.99</b>	45.48	21.25	24.23
<b>Total general</b>	<b>337.26</b>	<b>340.58</b>	<b>153.82</b>
<b>Promedio general</b>	<b>18.74</b>	<b>18.92</b>	<b>8.55</b>

---