

CAPÍTULO I
REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

CAPÍTULO I

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1.El papel esencial de las áreas verdes y el arbolado urbano

1.1.1. Áreas verdes

Las **áreas verdes** urbanas desempeñan un papel integral e indispensable en las estrategias ambientales para el desarrollo sostenible de las ciudades, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de sus habitantes. Estas áreas están diseñadas para cumplir diversas funciones, como la generación de aire limpio y la creación de espacios naturales en el entorno urbano. El concepto tradicional de asociar las áreas verdes únicamente con fines ornamentales y recreativos ha evolucionado. Ahora se reconoce que estas áreas proporcionan un recurso comunitario, generando bienestar en el entorno residencial y ofreciendo oportunidades de integración social. Se han convertido en puntos focales para actividades comunitarias, constituyendo un subsistema social crucial en la planificación estratégica de las áreas verdes. Otro aspecto importante del enfoque de las áreas verdes es su papel como subsistema ecológico, que no es menos relevante que el aspecto social. Los espacios verdes contribuyen al mantenimiento y mejora de los hábitats, así como a la conservación de la biodiversidad en las ciudades. Esto es válido independientemente de la composición vegetal de las áreas verdes, ya que pueden incluir árboles remanentes de la vegetación original o áreas verdes creadas por el ser humano como parte del equipamiento urbano (LLanos, 2017).

Las áreas verdes poseen tanto valores tangibles como intangibles para los seres humanos y otras formas de vida, y se consideran uno de los componentes fundamentales del ecosistema, donde es necesario que las áreas verdes sean abordadas de manera planificada, integrada y sistemática en la gestión de árboles, arbustos y otros tipos de vegetación en los centros urbanos. Esto permitirá que desempeñen un papel significativo en el crecimiento acelerado de las ciudades, generando beneficios ambientales, económicos y sociales para la población urbana, y por ende mejorar la calidad de vida de los ciudadanos (LLanos, 2017).

1.1.2. Arbolado urbano

El conjunto de vegetación que se desarrolla en áreas públicas urbanas o periurbanas, como plazas, parques y avenidas, conformado por árboles, arbustos y césped, es lo que se conoce como **arbolado urbano** (Salomón, 2018). Se conforma por arbolado de alineación o viario (calles, avenidas y camellones), áreas verdes urbanas (parques, jardines y glorietas), cementerios (derechos de vía, barrancas y riberas de ríos o arroyos que surquen la ciudad) y grandes masas arboladas, naturales o inducidas, que se encuentran dentro de los límites de la misma (López S. F., 2019).

De acuerdo a López S.F. (2019), las características del arbolado urbano incluyen su origen antropocéntrico, es decir, que se deben a las preferencias, exigencias o necesidades del ser humano. Además, su distribución y desarrollo son influenciados por los requerimientos urbanos, y se encuentran en constante cercanía con la población y expuestos a factores abióticos adversos. A pesar de esto, el arbolado urbano proporciona beneficios ambientales y ecosistémicos similares a los de las masas forestales naturales, lo que le otorga una gran importancia tanto ecológica como social.

El arbolado urbano puede manifestarse en diversas **formas de vida**, las cuales incluyen:

- **Árbol:** Es una planta leñosa con un tallo perenne de 7,5 centímetros de diámetro mínimo en la parte superior y de 1,5 metros de altura mínima de fuste, con una copa definida y una altura total superior a los 4 metros (Hallé et al, 1978). Incluye los bambúes, las palmeras y toda otra planta leñosa que cumpla con los criterios señalados (FAO, 2001). Según el proyecto i-Tree Eco, lo define como una especie leñosa con un diámetro normal (DN) mayor o igual a 2,54 centímetros. Forma de vida considera para el estudio.
- **Brinjal:** Es una clase natural del arbolado en el que el individuo que tiene una altura comprendida entre los 30 centímetros y menor o igual a 1,5 metros, con un DAP menor a 5 centímetros (Juárez, 2014).

- **Latizal:** Es una clase natural del arbolado en el que el individuo que tiene una altura mayor a 1,5 metros y un diámetro normal menor o igual a 10 centímetros (Juárez, 2014).
- **Fustal:** Según Juárez, 2014, un fustal es el árbol que tiene un diámetro normal de 10 y 25 cm.
- **Palmera:** Es un vegetal compuesto por raíz fibrosa, estípites con estructura lisa o escamosa y corona, la cual presenta un follaje (penacho) y un meristemo apical que da origen a nuevos brotes de hojas (GCDMS, 2016 citado por (López S. F., 2019)).
- **Arbusto:** Según el proyecto de i-Tree Eco, es una planta leñosa cuyas ramas surgen desde la base del tronco, con un diámetro normal (DN) menor a 2,54 centímetros.

1.1.3. Dasonomía y arboricultura urbana

La **dasonomía** es una rama de la disciplina forestal que se enfoca en el estudio, conservación, protección y manejo de la vegetación, incluyendo árboles, que se encuentran dentro y en la periferia de las ciudades o entornos urbanos (López S. F., 2019).

Esta disciplina se basa en la aplicación de conocimientos derivados de la biología forestal, dendrología, dendrometría, dasimetría, inventarios y otras áreas relacionadas. Aunque los árboles y masas arboladas son el enfoque principal de la dasonomía, es importante considerar las interacciones con otros componentes del ecosistema urbano, así como las relaciones y comportamientos humanos, los procesos educativos y la participación pública (López S. F., 2019).

La **arboricultura** es un conjunto de técnicas, prácticas y conocimientos utilizados en la selección, plantación, mantenimiento y gestión de los árboles en ambientes urbanos y periurbanos, con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas y el ambiente urbano en general. Esta disciplina tiene en cuenta factores como la selección adecuada de especies, la ubicación, la salud, la seguridad y la estética de los árboles urbanos (Barrios, 2017).

1.1.4. Censo forestal del arbolado urbano

El software i-Tree Eco permite llevar a cabo dos tipos de proyectos: aquellos que utilizan datos recopilados a partir de parcelas de muestreo o inventarios sistemáticos o aleatorios, que incluyen un número determinado de muestras; y el **inventario completo**, que se refieren al **censo forestal** de un área determinada. Por lo cual según i-Tree un censo forestal o inventario completo *“es aquel en el que recopilas datos de todos los árboles en tu área de estudio. Este tipo de proyecto aplica más al análisis de áreas pequeñas y discretas como una parcela residencial o una propiedad comercial. Sin embargo, se debe tomar en cuenta que la recopilación de datos de cada árbol es intensa y los sitios con muchos árboles pueden tomar mucho tiempo”*.

Según García (2018), *“el censo forestal es una herramienta clave para la toma de decisiones en la gestión de los recursos forestales, ya que permite obtener información detallada sobre la cantidad, calidad y estado de los árboles presentes en una determinada área geográfica”*. Esta herramienta proporciona datos importantes, tales como la cantidad y especies de árboles, su ubicación, diámetro, altura, calidad externa, características del terreno y drenaje, así como el uso histórico del área y ubicación de zonas de valor ecológico y cultural. Además, se pueden identificar otras características especiales relevantes (Kometter, 2005).

Los censos o inventarios del arbolado urbano son herramientas importantes para obtener información precisa y confiable sobre los árboles, lo que ayuda a reducir la subjetividad en la toma de decisiones para su manejo. Además, estos censos identifican problemas oportunamente, disminuyen los riesgos potenciales, optimizan los beneficios y servicios ambientales que generan, minimizan los costos de mantenimiento y prolongan la vida útil del arbolado urbano (López S. F., 2019).

1.1.5. Estructura florística

La estructura florística se refiere a la distribución proporcional de las distintas etapas de crecimiento de una especie, lo que permite identificar la relación existente entre la especie y el estrato (Valerio & Salas, 1998).

1.1.5.1.Estructura horizontal

Es un arreglo espacial de los árboles, en bosques es reflejado en la distribución de individuos por clase de diámetro, determinada por el diámetro a la altura al pecho (DAP) y el área basal. Esta estructura representa el grado de desarrollo del bosque y el nivel de competencia entre los árboles de un mismo rodal (Valerio & Salas, 1998).

1.1.5.2.Estructura Vertical

En la vegetación, la estratificación nos lleva a considerar las formas vitales y la distribución de las especies dentro de la comunidad. Según Braun-Blanquet (1979), se pueden diferenciar cuatro estratos principales en la vegetación: arbóreo, arbustivo, herbáceo y muscinal. Estos estratos pueden subdividirse según las necesidades, por ejemplo, en un estrato herbáceo superior e inferior y un estrato arbóreo inferior, medio y superior. La estructura vertical se refiere a la forma en que los elementos que constituyen el bosque se ubican en líneas o pisos cuyas alturas fluctúan muy poco respecto a un valor promedio, esto es lo que se conoce como estrato (Lamprecht, 1990).

1.2.Contexto de áreas verdes y del arbolado urbano en la ciudad de Tarija

Según los datos proporcionados por la Dirección de Ordenamiento Territorial del Gobierno Municipal de Tarija, en el municipio de Cercado existen un total de 248,33 hectáreas de áreas verdes. Esto indica que hay aproximadamente 9,55 metros cuadrados de espacios verdes por habitante en el municipio. Estas áreas verdes se definen como espacios públicos con vegetación, como pastizales, árboles y arbustos. Donde se recalca que estos sitios son fundamentales para el desarrollo urbano sostenible y contribuyen a la calidad de vida de los habitantes, además de ser importantes para respirar un aire más limpio en las ciudades (El País, 2019).

En el 2020, el Concejo Municipal, en sesión ordinaria, aprobó por unanimidad la Ley Municipal de Arborización “Ley 248”, misma que contempla 20 artículos y que tiene por objeto regular la conservación y protección de la arborización urbana en la ciudad, mejorando el paisaje urbano con el embellecimiento del espacio público e incrementando el arbolado público, lo que conllevará a mejorar la calidad ambiental y

el bienestar de la población. La implementación de esta ley tiene varios propósitos, entre ellos reducir el efecto de isla de calor en el área urbana y proporcionar hábitat para especies de aves desplazadas del área rural debido a la pérdida de hábitat, el uso excesivo de agroquímicos, la captura, la caza y otras amenazas. Además, la norma contempla la declaración de patrimonio de árboles históricos, con la correspondiente identificación (El País, 2020); (GAMT, 2020).

La normativa también contempla incentivos para aquellos que tengan árboles en la acera de su casa que tengan más de tres años y estén certificados por la Dirección de Ornato. Estas personas recibirán un descuento del 5% en el pago de sus impuestos municipales. La declaración de patrimonio de árboles históricos es otro aspecto importante de esta ley. Se establece la realización de un inventario para identificar la variedad a la que pertenecen, su historia, antigüedad y otros aspectos relevantes, con el fin de declararlos como patrimonio de árbol histórico en la ciudad (El País, 2020); (GAMT, 2020).

Según un estudio realizado por Llanos en 2017, se encontró que alrededor del 70% del arbolado urbano en la ciudad de Tarija está compuesto por especies introducidas, como Jacarandas, Lapachos, Carnavalitos, entre otras. Estas especies son dominantes en el paisaje urbano y su elección parece haber sido influenciada por modas históricas. En términos de biodiversidad, se identificaron actualmente 32 especies arbóreas, 8 tipos de arbustos y 5 especies frutales en la ciudad. Sin embargo, la autora destaca que la diversidad se centra principalmente en árboles, sin considerar especies de menor altura utilizadas con propósitos ornamentales. En cuanto a los valores paisajísticos, se observó que la mayoría de los parques y plazas presentan una diversidad de especies que oscila entre 6 y 10. No obstante, es necesario señalar que este criterio se limita al arbolado y no abarca arbustos y herbáceas, por lo que no refleja la diversidad biológica en su totalidad, sino que se utiliza como un indicador específico para el análisis realizado.

1.3.Los servicios ecosistémicos proporcionados por el arbolado urbano

Los servicios ambientales, también conocidos como servicios ecosistémicos, son los beneficios que los diferentes ecosistemas proporcionan de manera natural a la sociedad, y que influyen directamente en el mantenimiento de la vida y en el bienestar de las personas y comunidades. Los bosques, selvas, desiertos, sabanas y tundras son algunos ejemplos de los biomas que brindan estos servicios. Es importante diferenciar los bienes de los servicios ambientales, siendo los primeros *“productos tangibles de la naturaleza (madera, frutos, agua, suelo, plantas medicinales) de los que nos beneficiamos directamente los seres humanos. Los servicios ambientales, en cambio, son beneficios intangibles cuya utilización —cuando la hay— es indirecta (captura de carbono, regulación del clima, belleza escénica, control de la erosión, etcétera)”* (SEMARNAT, 2003). Los servicios ecosistémicos del arbolado urbano se refieren a los beneficios y servicios que los árboles proporcionan a las ciudades y sus habitantes. Estos servicios son fundamentales para el bienestar humano y la sostenibilidad del entorno urbano. Algunos de los servicios ecosistémicos más destacados del arbolado urbano incluyen:

1.3.1. Almacenamiento y secuestro de carbono

El dióxido de carbono (CO₂) es un gas de efecto invernadero (GEI) que se produce de forma natural a través de procesos biológicos y geológicos. Sin embargo, la actividad humana también contribuye a su emisión en la atmósfera, principalmente a través de la quema de combustibles fósiles y la deforestación (IPCC, 2013). Este gas es denso, incoloro y no tóxico, y se encuentra en la troposfera, la capa más cercana a la Tierra de la atmósfera. Debido a su capacidad de retener el calor en la atmósfera, el CO₂ es considerado uno de los gases de efecto invernadero más significativos y contribuye al cambio climático global. El CO₂ es el GEI más abundante y responsable de la mayor parte del calentamiento global. Por esta razón, se han implementado varias medidas para reducir las emisiones de CO₂, como la transición a fuentes de energía renovable y la implementación de prácticas agrícolas y forestales sostenibles (IPCC, 2013).

Los árboles absorben dióxido de carbono a través del proceso de fotosíntesis, en el cual las hojas utilizan la energía solar para convertir el dióxido de carbono y el agua en glucosa y oxígeno. La glucosa es utilizada por el árbol como fuente de energía y para construir su estructura celular. El oxígeno es liberado al aire como subproducto de la fotosíntesis. Este proceso ayuda a mantener el equilibrio del dióxido de carbono en la atmósfera y a mitigar los efectos del cambio climático (Pearse, 2019). Además de la fotosíntesis, los árboles también pueden absorber dióxido de carbono a través de su corteza y hojas, mediante un proceso conocido como fijación de carbono. La fijación de carbono ocurre cuando el dióxido de carbono se convierte en una forma más estable de carbono, que se almacena en la biomasa del árbol. Este proceso ayuda a los árboles a crecer y a aumentar su biomasa, lo que a su vez aumenta la cantidad de dióxido de carbono que pueden absorber (Maillard, 2019). Por último, los árboles también pueden almacenar carbono en sus raíces y en el suelo circundante. Las raíces de los árboles pueden absorber dióxido de carbono y convertirlo en compuestos orgánicos estables que se almacenan en el suelo (Lal, 2020). En las áreas urbanas, donde se concentran centros de población y se consumen grandes cantidades de energía, se liberan dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero, como el metano y óxido nitroso, el ozono y otros. Por esta razón, el secuestro de carbono por parte del arbolado es uno de los factores que contribuyen a la reducción del dióxido de carbono en la atmósfera. Durante el tiempo en que el carbono se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol, como la corteza, el tronco, las hojas o las raíces, se considera **almacenado**. Sin embargo, en el momento de su liberación, el carbono es enviado nuevamente al suelo o a la atmósfera en forma de CO₂, ya sea a través de la respiración por la descomposición de la materia orgánica o por la quema de la biomasa para regresar al ciclo del carbono. De manera general, se acepta que aproximadamente el 50% de la biomasa de los árboles lo constituye el carbono, lo que significa que los árboles tienen un gran potencial como sumideros de carbono y pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en las áreas urbanas y en el mundo en general (Castellanos-Bolaños, 2013).

El arbolado urbano tiene la capacidad de almacenar y secuestrar grandes cantidades de carbono de la atmósfera. Por ejemplo, un estudio realizado en la ciudad de Nueva York estimó que los árboles urbanos de esa ciudad almacenan aproximadamente 1.042.000 toneladas de carbono (Nowak et al., 2014). Otro estudio llevado a cabo en la ciudad de Madrid, España, encontró que los árboles urbanos de esa ciudad almacenan alrededor de 680.000 toneladas de carbono (Jiménez et al., 2016). En cuanto a Bolivia, un estudio llevado a cabo en la ciudad de Cochabamba encontró que los árboles urbanos de esa ciudad almacenan aproximadamente 522.800 toneladas de carbono (Barney & Contreras, 2013).

Con el fin de entender como los árboles capturan el carbono, se presentan las siguientes definiciones:

- **Fotosíntesis**

La fotosíntesis es un proceso biológico esencial que se lleva a cabo en organismos fotosintéticos, como plantas, algas y algunas bacterias. Luego, esta energía química se utiliza para convertir dióxido de carbono (CO₂) y agua (H₂O) en glucosa (C₆H₁₂O₆) y oxígeno (O₂), lo que se conoce como la ecuación de la fotosíntesis:



La fórmula química de la fotosíntesis fue propuesta por primera vez por el bioquímico Cornelius van Niel en la década de 1930. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la fotosíntesis es un proceso complejo y multifacético que ha sido estudiado y descubierto por muchos científicos a lo largo de la historia (Govindjee *et al.*, 2012).

- **Biomasa aérea**

La **biomasa aérea arbórea** se refiere a la cantidad de material vegetal seco producido por los árboles, expresado en términos de peso por unidad de superficie (ton/ha). La forma tradicional de calcular la biomasa de los árboles en el tronco es mediante el cálculo del volumen de madera y la densidad básica de la misma (MINAM, 2015).

- **Biomasa radical**

La **biomasa radical** se refiere a la cantidad de materia orgánica que se encuentra en las raíces y el sistema radicular de los árboles. Esta biomasa es importante porque puede ser una fuente significativa de carbono almacenado en los ecosistemas forestales. Además, la biomasa radical puede influir en la capacidad de los árboles para capturar y almacenar carbono en la biomasa aérea (Bond-Lamberty, 2010).

- **Necromasa**

La **necromasa** se refiere a la materia orgánica muerta presente en el ecosistema forestal, incluyendo hojas, ramas, troncos y raíces muertas. Según Baker (2010), la necromasa es una parte importante del ciclo de carbono en los bosques, ya que almacena grandes cantidades de carbono y otros nutrientes que pueden ser liberados al suelo a medida que se descomponen.

- **Metodologías para el muestreo del stock de carbono**

Muestreo destructivo: es una técnica que se basa en pesar directamente los diferentes componentes de un bosque utilizando una balanza. Esta metodología se suele aplicar a los componentes menores, como el peso de arbustos, hierbas, árboles con diámetros pequeños, hojarasca y raíces finas, entre otros (Baker, 2010).

Muestreo no destructivo: es una técnica que permite hacer estimaciones indirectas de la biomasa de los árboles mediante el uso de ecuaciones alométricas. En esta técnica, el diámetro de los árboles es una variable fácil de medir en el campo, que se utiliza para estimar la biomasa. Sin embargo, para lograr una mayor precisión en la estimación, es necesario considerar otras variables como la altura de los individuos y la densidad de la madera (Baker, 2010; Chave et al., 2005).

Percepción remota: es una técnica que se utiliza para obtener información sobre la vegetación a partir de imágenes satelitales ópticas. El Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), es utilizado para la determinación de estos parámetros, que se obtiene a partir de la diferencia normalizada entre la radiación reflejada en el espectro visible e infrarrojo cercano (Baker, 2010).

- **Ciclo del carbono**

El **ciclo de carbono** implica el almacenamiento y transferencia de moléculas de carbono entre la atmósfera, biósfera, litósfera y océanos. Para comprender este ciclo, es fundamental comprender la distinción entre el "**stock**" y el "**flujo**" de carbono. Esto se debe a que los procesos que afectan al stock de carbono, como la fotosíntesis y la respiración, son diferentes a los procesos que afectan al flujo de carbono, como la transferencia de dióxido de carbono entre la atmósfera y la superficie terrestre (Baker, 2010).

- **Stock de carbono almacenado**

El **stock de carbono** se refiere a todo lo que está **almacenado** en los diferentes componentes, como la biomasa viva y muerta, así como el carbono presente en la materia orgánica del suelo. Cuando se mide el stock de un bosque, se considera el peso por unidad de área en términos de megagramos por hectárea (Mg ha^{-1}). La biomasa total del bosque, que incluye el carbono almacenado en los diferentes componentes del mismo, es considerada un stock y se mide en Mg ha^{-1} (Baker, 2010).

- **Flujos de carbono fijado**

Según Baker (2010), los **flujos de carbono** se refieren a los procesos que afectan el stock de carbono en un bosque, se cuantifica la fotosíntesis de las hojas, la respiración de los árboles y otros componentes. Estas mediciones incluyen la variable tiempo y cuantifican la cantidad de carbono que entra o sale de un componente del stock de carbono en el tiempo, expresado como $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$.

- **Productividad primaria neta**

La **productividad primaria neta** es el aumento neto en la biomasa producido por la fotosíntesis, excluyendo la cantidad de carbono que se utiliza en la respiración. Se cuantifica midiendo el crecimiento del fuste y la producción de ramas, hojas y raíces. La productividad primaria neta, junto con la respiración, mortalidad, descomposición y fotosíntesis son considerados flujos y generalmente se expresan en términos de peso por unidad de área y tiempo, como $\text{Mg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ (Baker, 2010).

- **Sumidero de carbono**

Según Baker (2010), un área de bosque se considera un sumidero de carbono si la cantidad de carbono almacenado en ella aumenta con el tiempo, es decir, si hay un cambio positivo en el stock de carbono. Esto ocurre cuando los flujos que agregan carbono al stock, como el crecimiento, son mayores que los flujos que reducen el stock, como la mortalidad, durante un período determinado. Esta definición es importante para entender cómo los bosques pueden ayudar a mitigar el cambio climático al actuar como sumideros de carbono, absorbiendo y almacenando carbono de la atmósfera. Por lo que, el arbolado urbano puede ser considerado un sumidero de carbono si la cantidad de carbono almacenado en los árboles y en el suelo urbano aumenta con el tiempo debido a los flujos que agregan carbono al stock, como el crecimiento de los árboles, y los flujos que disminuyen el stock son menores.

- **Fuente de carbono**

Una fuente de carbono en un área de bosque se refiere a la situación en la que el stock de carbono disminuye con el tiempo. Esto ocurre cuando los flujos que disminuyen el stock, como la mortalidad, son mayores que los flujos que agregan carbono al stock, como el crecimiento, en un determinado periodo de tiempo (Baker, 2010).

1.3.2. Eliminación y disminución de contaminantes atmosféricos

Los árboles tienen la capacidad de reducir la cantidad de contaminantes gaseosos en el aire al absorberlos a través de las estomas de las hojas. Dentro de las hojas, los gases difusos se introducen en los espacios intracelulares y pueden ser absorbidos por películas de agua o reaccionar con las superficies internas de la hoja, lo que permite su eliminación (Nowak D. J., 2014). Una vez dentro de la hoja, los gases pueden reaccionar con las superficies internas o disolverse en películas de agua. Los árboles también pueden retener algunos tipos de partículas en su superficie, que pueden ser liberadas cuando las hojas se caen o son lavadas por la lluvia. Estos contaminantes incluyen monóxido de carbono (CO), dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂), ozono (O₃), compuestos orgánicos volátiles (COV) y partículas (Ziegler, 1973).

Por otro lado, los árboles son capaces de absorber contaminantes particulados, como el material particulado respirable de 2,5 micrones ($PM_{2,5}$) y 10 micrones (PM_{10}), que se compone de partículas sólidas, plomo y gotas líquidas presentes en el aire. Algunas de estas partículas son visibles a simple vista, como el polvo, la suciedad, el hollín o el humo, mientras que otras son tan pequeñas que solo pueden detectarse mediante el uso de un microscopio electrónico. De entre todas ellas, el contaminante más peligroso para la salud humana es el material particulado respirable de 2,5 micras ($PM_{2,5}$), que son partículas inhalables finas con diámetros de, generalmente, 2,5 micrómetros o menos. Estas partículas son perjudiciales para la salud porque pueden penetrar profundamente en los pulmones e incluso en el torrente sanguíneo, lo que puede aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias y reducir la capacidad pulmonar (EPA, 2022).

El material particulado puede ser absorbido por las hojas, ramas y troncos de los árboles, y se retiene en la superficie de las mismas hasta que son lavadas por la lluvia o caen al suelo. La capacidad de los árboles para capturar y retener el material particulado depende de factores como la densidad y la forma de la copa, la especie del árbol y la velocidad del viento (Nowak *et al.*, 2006).

Un estudio realizado en la ciudad de Nueva York encontró que los árboles urbanos capturaron alrededor del 2,7% del $PM_{2,5}$ en la ciudad, lo que equivale a una eliminación de aproximadamente 1,200 toneladas de material particulado por año (Lovasi *et al.*, 2013). Otro estudio realizado en la ciudad de Toronto encontró que los árboles urbanos pueden eliminar hasta el 26% del $PM_{2,5}$ de la ciudad (Liu *et al.*, 2013).

En general, se ha demostrado que los árboles urbanos pueden desempeñar un papel importante en la reducción del material particulado y los demás contaminantes en las ciudades, lo que puede tener beneficios significativos para la salud pública y el medio ambiente (Nowak *et al.*, 2006).

El software i-Tree Eco se enfoca exclusivamente en analizar el material particulado respirable de menos de 2,5 micrones ($PM_{2,5}$), el cual es una fracción del PM_{10} . Como se mencionó previamente, el $PM_{2,5}$ es más relevante en términos de los efectos de la

contaminación del aire en la salud humana, aunque el PM_{10} también es un contaminante atmosférico significativo. Este enfoque en el $PM_{2,5}$ es debido a su mayor impacto en la salud pública y en la calidad del aire urbano (i-Tree Eco, 2017).

1.3.3. Producción de oxígeno

El arbolado urbano es una fuente importante de oxígeno. Los árboles generan oxígeno a través de la fotosíntesis, proceso en el cual absorben dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O) para producir glucosa y oxígeno (O_2). Se estima que un árbol adulto puede producir suficiente oxígeno para una persona durante todo el día (Nowak *et al.*, 2002). Además, se ha demostrado que el arbolado urbano puede tener un efecto positivo en la calidad del aire y en la salud humana al disminuir la contaminación atmosférica, lo cual contribuye a mejorar la calidad del oxígeno que se respira (Escobedo *et al.*, 2020). Es importante destacar que la cantidad de oxígeno producido por el arbolado urbano depende de varios factores, tales como la especie de árbol, su edad, tamaño y estado de salud, así como también del clima y otros factores ambientales. Por ejemplo, se ha observado que las especies de árboles con un crecimiento rápido y una gran altura pueden generar mayores cantidades de oxígeno que los árboles más pequeños y lentos (Grote y Pretzsch, 2002). Según Lakyda (2011), los bosques tienen un papel fundamental en la producción de oxígeno y representan alrededor del 54% de la biomasa vegetal terrestre. Además, poseen una alta densidad de biomasa por unidad de superficie.

1.3.4. Emisión de compuestos orgánicos volátiles (COVs)

De acuerdo con Kramer y Kozlowski (1979), algunos árboles emiten compuestos orgánicos volátiles (COVs) como el isopreno y monoterpenos, los cuales son sustancias químicas naturales que se utilizan para producir aceites esenciales, resinas y otros productos de las plantas. Además, estas emisiones pueden tener funciones como atraer polinizadores o repeler depredadores. Por otro lado, producen moléculas que ayudan a la condensación del vapor del agua. Tingey (1991) señala que las emisiones de COV varían en función de la especie de árbol, la temperatura del aire y otros factores

ambientales. En relación a la formación de O₃, Brasseur y Chatfield (1991) indican que las emisiones de COV de los árboles pueden contribuir a su formación. Sin embargo, González de Canales (2002) señala que las emisiones de COV por los árboles son dependientes de la temperatura y que, en general, los árboles reducen la temperatura del aire. Por lo tanto, se cree que una buena cobertura arbórea puede reducir las emisiones globales de COV y, por lo tanto, los niveles de O₃ en áreas urbanas (Cardelino y WL, 1990) citado por (González de Canales, 2002).

1.3.5. Reducción de la polución acústica

El arbolado urbano es un recurso importante para reducir la contaminación acústica en las ciudades. Pruebas en terreno han demostrado que una plantación adecuada de árboles y arbustos puede reducir significativamente el ruido en una zona determinada, gracias a que las hojas y ramas de los árboles dispersan el sonido y el suelo absorbe una parte del ruido. Es fundamental tener en cuenta que la plantación de árboles debe realizarse cerca del origen del ruido y no en la zona receptora para lograr una reducción óptima del ruido. Además, el arbolado urbano no solo aporta beneficios estéticos y ambientales, sino que también mejora la calidad de vida de las personas que residen en las ciudades. Por lo tanto, se debe fomentar la plantación de árboles y arbustos en las ciudades como parte de una estrategia integral para reducir la contaminación acústica y promover la salud y el bienestar de los habitantes urbano, adaptado de (González de Canales, 2002).

1.3.6. Regulación de la temperatura superficial

La temperatura es una de las variables meteorológicas más sensibles a los procesos de urbanización, registrándose valores superiores en el centro de la ciudad, respecto su entorno natural. Este efecto urbano sobre el campo térmico superficial en la ciudad se denomina “isla calórica” (Camilloni & Barros, 1991). Diversos factores están involucrados en este fenómeno, incluyendo los espacios construidos de las ciudades que almacenan y emiten calor, la capa de contaminación atmosférica, la escasa evapotranspiración en los centros urbanos debido a la falta de áreas verdes y la

impermeabilidad del suelo, así como la generación de calor por los automóviles, la actividad industrial y urbana en general (Santibáñez & Uribe, 1993).

1.3.7. Protección de los rayos ultravioletas

Los árboles tienen la capacidad de disminuir la exposición humana a los rayos ultravioleta, aunque su efectividad puede variar dependiendo del tipo de uso de la tierra y de la cantidad de cobertura del dosel que proporcionan (Na, Heisler, Nowak, & Grant, 2014).

El cáncer de piel es el tipo de cáncer más común en las zonas con escasa forestación. Los árboles reducen la exposición a los rayos UV-B en aproximadamente un 50 por ciento, proporcionando de ese modo protección a los niños en las escuelas y parques de juego, donde pasan mucho tiempo al aire libre (SI San Juan, 2020).

1.3.8. Efectos energéticos en las construcciones

Según McPherson (1991), la vegetación urbana tiene un impacto moderado en las temperaturas, siendo capaz de reducir significativamente la energía térmica en determinados casos. Los árboles desempeñan un papel importante al actuar como barreras contra el viento, lo que disminuye la necesidad de calefacción durante el invierno, además de proporcionar sombra durante los meses de verano, lo que reduce la dependencia de los aires acondicionados (Laverne y Lewis, 1995). La vegetación urbana absorbe parte de la energía solar y utiliza aproximadamente el 80% de esta energía para su propio crecimiento y supervivencia, generando biomasa. Solo alrededor del 20% de la energía solar es reflejada y devuelta a la atmósfera desde la vegetación. Por lo tanto, se puede afirmar que las emisiones de calor provenientes de edificios, industrias y vehículos aumentan los niveles de contaminación atmosférica en las ciudades, lo que a su vez contribuye a un aumento de las temperaturas urbanas en aproximadamente 8°C en comparación con las áreas rurales (González de Canales, 2002).

1.3.9. Relación con la gestión hidrológica

A pesar de que se han realizado numerosos estudios sobre los beneficios del arbolado en la filtración del agua en entornos rurales y forestales, la investigación en el contexto urbano es escasa. No obstante, es fundamental reconocer el importante papel que desempeñan los árboles urbanos, en conjunto con el suelo, en los espacios hidrológicos de las ciudades al interceptar, retener y reducir el flujo de la precipitación. En el ciclo hidrológico urbano, los árboles juegan un papel clave al reducir la velocidad y el volumen de la escorrentía generada por las tormentas, lo que a su vez disminuye el riesgo de inundaciones, los gastos asociados al tratamiento del agua de lluvia y los problemas de calidad del agua. En contraste, las superficies impermeables como el asfalto alteran la hidrología natural de las áreas urbanas. Por el contrario, las áreas con vegetación porosa tienen la capacidad de absorber una gran parte del agua de lluvia, permitiendo que una parte de ella sea devuelta al sistema a través de la evapotranspiración o se filtre para recargar los acuíferos. Esto resulta en un porcentaje menor de agua de lluvia (aproximadamente el 15%) que fluye directamente hacia los ríos. Además, los árboles urbanos contribuyen a regular la temperatura y mejorar la calidad del aire, brindando beneficios adicionales para el bienestar de las comunidades urbanas (González de Canales, 2002).

Los bosques desempeñan un papel crucial en la regulación de la humedad atmosférica y los patrones de precipitación en las áreas terrestres (Ellison *et al.* 2017) citado por (Blanco, 2017). Tanto las superficies terrestres como las oceánicas liberan vapor de agua a la atmósfera. En el caso de las superficies continentales, los bosques y otros tipos de vegetación contribuyen activamente a este proceso. La evapotranspiración representa al menos el 40% de la precipitación en áreas terrestres, pudiendo alcanzar hasta el 70% en ecosistemas de bosques lluviosos tropicales. El vapor de agua circula alrededor del planeta a través de los vientos, lo que se considera una forma de redistribución del agua entre diferentes superficies terrestres (Van der Ent *et al.*, 2010; Jasechko *et al.*, 2013) citado por (Blanco, 2017).

superficies impermeables, como las tuberías y estanques, tienen una capacidad limitada para manejar grandes volúmenes de agua durante las tormentas. Al incrementar la presencia de árboles en estas áreas, se puede reducir el flujo de escorrentía y aliviar la presión sobre las infraestructuras de drenaje, evitando problemas de sobrecarga durante eventos de lluvia intensa (González de Canales, 2002).

1.3.11. Aumento de la biodiversidad

Los árboles urbanos y los espacios verdes de la ciudad, como parques y jardines, desempeñan un papel crucial en la conservación de la biodiversidad al proporcionar hábitats para aves, abejas, insectos beneficiosos y otras especies. La expansión de las ciudades y sus actividades humanas afecta negativamente el entorno natural y la biodiversidad en áreas cercanas, lo que se conoce como la "huella urbana" o "huella ecológica". Para contrarrestar este impacto, se han implementado enfoques en muchos países que consideran los espacios verdes urbanos como lugares para la conservación de la biodiversidad (González de Canales, 2002).

1.4.El papel del arbolado urbano en la mitigación del cambio climático

Los GEI, como el CO₂, atrapan el calor en la atmósfera y aumentan la temperatura global de la Tierra, lo que provoca cambios climáticos significativos, como el aumento del nivel del mar, el derretimiento de los glaciares y la intensificación de eventos climáticos extremos (EPA, 2021). El cambio climático es inequívoco y está siendo impulsado por la actividad humana, principalmente a través de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) causadas por la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva (IPCC, 2021). El informe también señala que se espera que la temperatura global supere los 1,5 °C antes de mediados de siglo, lo que tendrá graves consecuencias para el clima, los ecosistemas y la sociedad (IPCC, 2021). Los árboles y los bosques pueden desempeñar un papel importante en la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono y absorber grandes cantidades de dióxido de carbono de la atmósfera. En su Quinto Informe de Evaluación publicado en 2014, el IPCC señala que los bosques y los árboles tienen un potencial significativo para la mitigación del cambio climático, especialmente en

áreas urbanas y suburbanas, donde pueden ayudar a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero emitidos por vehículos y edificios (IPCC, 2014). Además, los árboles pueden mejorar la calidad del aire y reducir la contaminación acústica, lo que puede tener beneficios para la salud humana y el bienestar (IPCC, 2014). El Sexto Informe de Evaluación del IPCC destaca la importancia del uso del suelo y la gestión forestal sostenible como herramientas para la mitigación del cambio climático. El informe señala que el aumento de la superficie forestal y la gestión adecuada de los bosques pueden contribuir significativamente a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y la absorción de carbono, lo que a su vez puede ayudar a limitar el aumento de la temperatura global (IPCC, 2021).

1.5.El pago por servicios ecosistémicos

Los esquemas de pago por servicios ecosistémicos están ganando popularidad a nivel mundial. Cada vez más países están promoviendo estos esquemas como una herramienta importante de política forestal para generar ingresos adicionales y mejorar la gestión sostenible de los recursos naturales. Estos sistemas no solo ofrecen beneficios financieros directos, sino que también han demostrado tener efectos positivos en la subsistencia e ingresos potenciales de las comunidades participantes, así como en el desarrollo económico local y la productividad de los recursos naturales. En resumen, los pagos por servicios ecosistémicos son una herramienta valiosa para proteger los ecosistemas y mejorar la calidad de vida de las comunidades locales. Para establecer y mantener programas sólidos, viables y a largo plazo de pagos por servicios ecosistémicos se requiere un marco normativo adecuado, así como capacidades organizativas e institucionales notables. Esto incluye programas de tenencia y derechos de propiedad bien definidos para la seguridad de los recursos que reduzcan el riesgo y la incertidumbre, y políticas inclusivas caracterizadas por una distribución de los beneficios y una administración ética y equitativa para promover el interés de la comunidad local y su participación activa (FAO, 2014).

1.6.i-Tree eco, como un modelo de cuantificación de servicios ecosistémicos

i-Tree es un paquete de software de última generación, revisado por expertos del Servicio Forestal del USDA que proporciona herramientas de análisis forestal urbano y rural y de evaluación de beneficios. Las herramientas de i-Tree pueden ayudar a fortalecer la gestión forestal y los esfuerzos de promoción mediante la cuantificación de la estructura forestal y los beneficios ambientales que proporcionan los árboles.

El origen del programa i-Tree es Urban Forest Effects del USDA Forest Service (UFORE), que se desarrolló en la década de 1990, y el Street Tree Resource Modelo de herramienta de evaluación para administradores de bosques urbanos (STRATUM), que se lanzó en principios de la década de 2000. Ambos programas se construyeron a partir de investigaciones desarrolladas originalmente en el Proyecto Climático de Bosques Urbanos de Chicago del Servicio Forestal del USDA (Nowak D. J., 2021).

Los programas fueron originalmente diseñados para ayudar en la gestión forestal urbana, pero desde entonces se ha ampliado para cumplir con las necesidades de múltiples componentes, incluidos administradores de bosques rurales, consultores, planificadores, propietarios de viviendas, educadores y profesionales del paisaje. La investigación y el trabajo de numerosas las personas fueron fundamentales en la evolución de i-Tree (Nowak D. J., 2021). Y uno de ellos es i-Tree Eco, el cual proporciona extensos análisis de bosques y árboles individuales, incluidos los siguientes:

Análisis Funcionales:

- Eliminación de la contaminación e impactos en la salud humana
- Secuestro y almacenamiento de carbono
- Efectos de la hidrología (escorrentía evitada, interceptación, transpiración)
- Efectos de la energía del edificio
- Bioemisiones de árboles
- Idoneidad del hábitat de las aves (proyectos basados en parcelas.
- Efectos de árbol de radiación ultravioleta (UV) Ejemplo de informe UV

Análisis de estructura y composición:

- Condición y distribución de las especies
- Área foliar y biomasa
- Valores de importancia de las especies
- Índices de diversidad y desempeño relativo
- Opciones de modelado de pronósticos que incluyen:
- Insumos para la plantación de árboles
- Impactos de eventos extremos para el clima y las plagas
- Ajustes anuales de mortalidad
- Información de gestión que incluye:
- Análisis de riesgo de plagas
- Campos opcionales definidos por el usuario
- Análisis coste-beneficio

Como se puede observar, i-Tree Eco, nos ofrece una amplia gama de análisis del arbolado urbano (i-Tree).

1.7.Casos de estudio y aplicaciones del software i-Tree eco en ciudades similares

Un estudio realizado por Aguilar Rincán, Cruz Cruz y Salmerón Rodríguez (2021), en San Salvador, donde identificaron un total de 301 individuos de árboles pertenecientes a 21 familias, 34 géneros y 37 especies. Llegando a observar que la especie *Calophyllum brasiliense* fue la más común en las aceras, con una incidencia del 82,35%, mientras que *Magnolia champaca* presentó problemas relacionados con el alumbrado eléctrico en un 53%. Se estimó que el arbolado de San Salvador captura aproximadamente 6,495 toneladas de carbono al año, con un valor asociado de USD 1046,37, y produce anualmente 17,32 toneladas de oxígeno.

Vázquez Arceo, Ramírez Rivera, Arceo Diaz y Solís Enríquez (2021), llevaron a cabo una investigación con el objetivo de identificar especies y ejemplares de árboles relevantes para mejorar la calidad del aire en la colonia Las Palmas, en la ciudad de

Colima, México. Para ello, realizaron un inventario de árboles y plantas leñosas ubicadas en espacios públicos del fraccionamiento que tuvieran un diámetro a la altura del pecho igual o mayor a 2,54 cm. Los datos dasométricos de estos ejemplares se procesaron utilizando el software i-Tree Eco v.6.0. De los 1087 ejemplares inventariados, seleccionaron una submuestra de especies basada en dos criterios: aquellas especies con 25 individuos o más y, en el caso de especies con menos de 25 ejemplares, aquellas que mostraron la mayor capacidad de absorción de contaminantes o la mayor emisión de compuestos orgánicos volátiles según las estimaciones de i-Tree Eco. Los resultados revelaron que el bosque urbano en Las Palmas eliminó 214,34 kg de contaminantes del aire y generó 123,80 kg de bioemisiones de compuestos orgánicos volátiles. Se destacaron las contribuciones de especies nativas como la parota (*Enterolobium cyclocarpum*), higueras (*Ficus spp.*), guamúchil (*Pithecellobium dulce*), rosamorada (*Tabebuia rosea*) y mandimbo (*Ehretia tinifolia*).

Otro estudio realizado por Cercas Pérez (2021), en el centro de la ciudad de San José, Costa Rica, donde tuvo el objetivo de analizar el potencial de provisión de servicios ecosistémicos (SE) por parte de los parques con arbolado urbano. El análisis se llevó a cabo utilizando el modelo i-Tree Eco y se evaluaron cuatro SE específicos. Los resultados revelaron que los parques urbanos del centro de la ciudad albergaban un total de 1287 árboles. Estos árboles producían anualmente aproximadamente 40 toneladas de oxígeno, capturaban alrededor de 15 toneladas de carbono y almacenaban 443 toneladas de carbono. Según el autor, estos hallazgos fueron de gran relevancia para la toma de decisiones en la gobernanza del arbolado urbano, ya que brindaban información valiosa sobre el potencial de los parques en la provisión de servicios ecosistémicos.

En Laguna de San Baltazar, Puebla, se analizó los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles urbanos utilizando el software i-Tree. Donde se determinó que los árboles de la laguna tienen un papel significativo en la eliminación de contaminantes atmosféricos, con una estimación de 324 kg de ozono, monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, material particulado y dióxido de sulfuro eliminados

por año, representando el 73% del valor total de los servicios ecosistémicos. También se encontró que estos árboles capturan 28,47 toneladas métricas de carbono por año, con un valor asociado de 105000 pesos. Además, contribuyen a la reducción del escurrimiento, con una estimación de 1230 m³ infiltrados al subsuelo por año, con un valor asociado de 55000 pesos. Donde los autores resaltan la importancia de conservar y gestionar adecuadamente el arbolado urbano en la laguna para aprovechar los beneficios ambientales que brinda en términos de eliminación de contaminantes, captura de carbono y reducción del escurrimiento (Hernández-Castán *et al.*, 2023).

En Concepción, Chile, se realizó un estudio para evaluar cómo los árboles urbanos pueden contribuir a la reducción del material particulado 2,5 (MP_{2,5}) en el aire. El autor utilizó el software i-Tree Eco y llevó a cabo un inventario completo de los árboles en el Parque Ecuador. Los datos obtenidos se introdujeron en el software para determinar la cantidad de MP_{2,5} eliminado, así como el almacenamiento y secuestro de carbono, y la emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVBs) por parte de los árboles del parque. Los resultados revelaron que el parque logró eliminar 4,52 kg de MP_{2,5} durante un año, con una tasa de eliminación de 0,13 g/m² por área cubierta de árboles. Además, los árboles almacenaron 350 toneladas de carbono y capturaron 3,24 toneladas métricas de carbono anualmente. También se observó una emisión total de 50,48 kg de COVBs por parte de las especies presentes en el parque (Barra, 2019).

Como se puede observar, existen diversos estudios realizados en ciudades internacionales similares a la ciudad de Tarija, que se enfocan en la evaluación y valoración de los servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles urbanos. Estos estudios demuestran la importancia y los beneficios que los árboles urbanos pueden brindar a las ciudades en términos de mejora de la calidad del aire, almacenamiento de carbono, reducción de la contaminación y escurrimiento evitado.

En consecuencia, es importante que la ciudad de Tarija y otras ciudades similares consideren la valoración de los servicios ecosistémicos del arbolado urbano en sus políticas y estrategias de desarrollo sostenible.

CAPÍTULO II
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO II

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Descripción de la zona de estudio

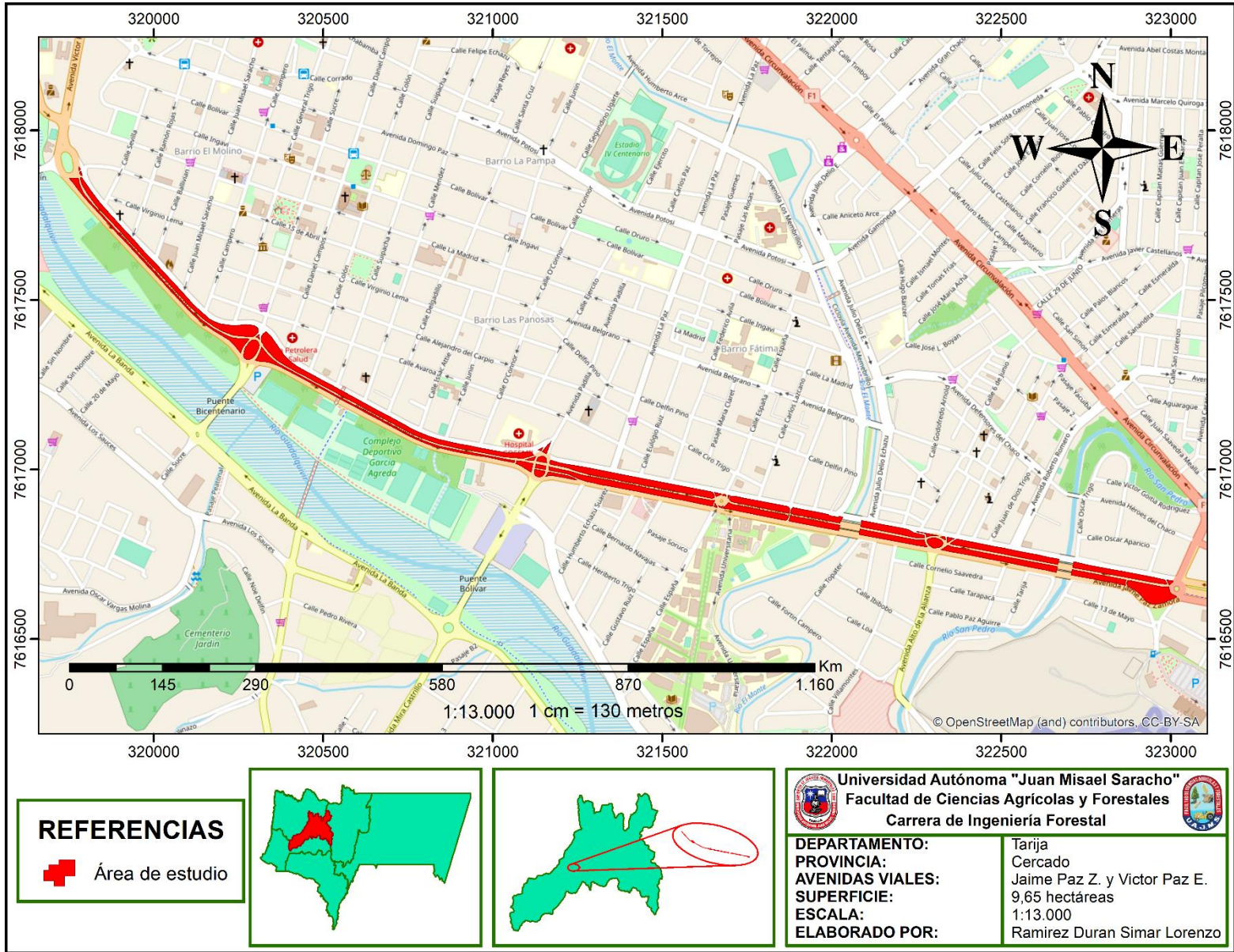
2.1.1. Ubicación

La ciudad de Tarija se encuentra en el sur de Bolivia, situada entre las coordenadas geográficas 21°32'02" de latitud sur y 64°44'03" de longitud oeste. Tiene una altitud de 1869 metros sobre el nivel del mar y abarca una superficie aproximada de 92 kilómetros cuadrados, según datos de la Dirección de Ordenamiento Territorial (2019). Según proyecciones del Instituto Nacional de Estadística (INE, 2020), se estimó que la población de Tarija alcanzó los 272692 habitantes en el año 2022.

Es conocida por su clima cálido y seco, y por ser un importante centro de producción vitivinícola en Bolivia. Además, cuenta con una gran variedad de áreas verdes y arbolado urbano, como el parque Bolívar, Bioparque urbano, parque de las flores, complejo deportivo “La García”, miradores (Corazón de Jesús y Juan Pablo II), plazas (central o Luis de Fuentes y Vargas) y plazuelas (Sucre), campus universitarios (El Tejar), avenidas viales, aceras, riberas de río y quebradas, etc.; que contribuyen a la calidad ambiental de la ciudad y la calidad de vida de sus habitantes.

Donde las avenidas viarias que contemplan una gran diversidad de especies de árboles, son la Av. Jaime Paz Zamora la cual está ubicada entre las coordenadas geográficas 21°31'32" de latitud sur y 64°43'50" de longitud oeste (rotonda del aeropuerto e inicio de la Av. Circunvalación) y 21°32'39" de Latitud Sur y 64°42'75" de longitud oeste (entrada al Parque Temático – Carretera a San Jacinto), en dirección de este a oeste, a una altura promedio de 1860 m.s.n.m. y la Av. Víctor Paz Estensoro está ubicada entre las coordenadas geográficas 21°32'26" de latitud sur y 64°43'38" de longitud oeste (entrada al Parque Temático – Carretera a San Jacinto) y 21° 32'39" de latitud sur y 64°44'52" de longitud oeste (entrada al puente San Martín e inicio de la Av. “La integración”, a una altura promedio de 1865 m.s.n.m.; donde todas las franjas de jardinera para el estudio tienen un área total de 9,65 hectáreas (ver Mapa 1).

Mapa 1. Ubicación del área de estudio



FUENTE: Elaboración propia, con base de OpenStreetMap – CC-BY-SA

2.1.2. Suelos y geomorfología

La zona de estudio presenta, suelos moderadamente desarrollados, de profundos a moderadamente profundos, sometidos a fuertes limitaciones de erosión. Los suelos tienen origen de sedimentos fluvio-lacustres, aluviales y coluviales como gravas, arcilla arenas, y limos además de otros componentes físico - mineralógicos (Morales & Saucedo, 2017).

La geomorfología predominante perteneciente al sistema cuaternario, que consta principalmente de materiales como arcilla y fluvio-lacustres, los cuales fueron depositados en una cuenca lacustre que inicialmente estaba conformada por dos lagos, ubicados al sur y sudeste de la ciudad de Tarija, y que posteriormente formaron un solo lago, siendo este receptáculo de materiales procedentes de las partes altas de la cuenca, comprende todo el material suelto o poco consolidado que yace sobre la superficie del terreno y está constituido principalmente por arcilla, depósitos aluviales, fluvio-lacustres y coluviales, como gravas, arenas, y limos además de otros componentes físico – mineralógicos. En menor proporción se tiene la presencia de un sistema Ordovícico que corresponde a los afloramientos de rocas (de edad ordovícica), que configuran relieves fuertemente plegados y presentan particulares exposiciones litológicas con abundante contenido fosilífero. Se trata de rocas sedimentarias de origen marino, principalmente lutitas, limonitas, cuarcitas y areniscas de variadas tonalidades y granulometría (Morales & Saucedo, 2017). Las características de relieve de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado, y considerando imágenes satelitales y observación *in situ*, el lugar donde se encuentran las avenidas viarias presenta una topografía semiplana y con un micro relieve formado en pequeñas ondulaciones.

Por lo que, en conclusión, la ciudad de Tarija presenta una gran variedad de tipos de suelo, siendo los más comunes los suelos arenosos y arcillosos. Estos suelos presentan diferentes grados de permeabilidad y capacidad de retener agua, lo que tiene un impacto en la salud de los árboles urbanos. Es importante considerar estas características al seleccionar especies de árboles para plantar en la ciudad.

2.1.3. Vegetación

El área de estudio presenta una vegetación poco natural, donde predominan más especies implantadas, en combinación de especies nativas de la zona y exóticas, principalmente en el estrato arbóreo.

- Vegetación herbácea

El área de estudio presenta las siguientes especies herbáceas: *Xelochrysum bracteatum* (siempreviva), *Delphinium ambiguum* (espuela de caballero), *Celosia spp.* (cresta de gallo), *sonchus oleraceus* (borrajilla), *Taraxacum officinale* (diente de león), *Zinnia spp.* (zinnia común), *Amphoricarpos sp.*, *Tropaeolum majus* (capuchina), *Alternanthera spp.* (túnica de José), *Amaranthus blitum* (amaranto silvestre), *Lepidium virginicum* (perejil de tierra), *Osteospermum ecklonis* (caléndula morada), *Asarum europaum* (oreja de fraile), *Calendula officinalis* (botón de oro), *Morning glory* (gloria de la mañana), *Eryngium sp.* (culantro), *Sachezia sp.* y *Setcreasea purpurea* (purpurina), *Tagetes erecta* (rosas pascuas), *Trifolium sp.* (trébol) y *Canna indica* (achira), entre gramíneas se identificaron las siguientes especies: *Paspalum notatum* (pasto bahía), *Pennisetum clandestinum* (pasto kiyuyo), *Eleusine indica* (capín), *Setaria sp.* (almorejo), *Eragrostis spp.* (amorsecos) *Lolium multiflorum* (pasto italiano), *Cynodon dactylon* (gramilla), *Iris germanica* (iris barbudo) y *Bromus catharticus* (pasto de pradera) (identificación propia).

- Vegetación arbustiva

El área de estudio presenta las siguientes especies arbustivas: *Acacia caven* (Churqui), *Parkinsonia aculeata* (cina cina), *Robinia pseudoacacia* (robinia), *Tecoma stans* (guaranguay), *Pistacia terebinthus* (molle chileno), *Citrus x aurantifolia* (naranja agrio), *Ligustrum sinense* (ligustro chino), *Thevetia peruviana* (narciso), *Duranta erecta* (gota de rocío dorado), *Nerium oleander* (laurel rosa), *Rosa spp.* (Rosas), *Malvastrum coromandelianum* (malva falsa), *Hibiscus syriacus* (rosa china), *Ricinus communis* (tártago), *Euphorbia pulcherrima* (flor de pascua) y *cineraria marítima* (ajenjo macho) (identificación propia).

- **Suculentas**

Agave americana (agave americano o pita amarilla) y *Aptenia cordifolia* (escarcha).

- **Palmeras**

Phoenix canariensis (palma canaria), *Washingtonia filifera* (palma californiana) y *Cyperus alternifolius* (paraguaita).

- **Vegetación arbórea**

El área de estudio presenta las siguientes especies arbóreas: *Pinus canariensis* (pino), *Pinus patula* (pino pátula), *Pinus pinea* (pino piñotero), *Pinus sp.* (pino), *Chorisia speciosa* (toborocho), *Ulmus pumila* (olmo), *Araucaria bidwilli* (araucaria), *Tabebuia avellanedae* (lapacho rosado), *Bahuinia candicans* (pata de buey), *Cassia sp.* (carnaval), *Eucalyptus sp.* (eucaliptos) (Herbario Universitario (T.B.), 2023); *Acacia visco* (jarca), *Brachychiton populneus* (brachichito), *Caesalpinia pluviosa* (momoqui), *Casuarina cunninghamiana* (casuarina), *Cupressus macrocarpa* (ciprés), *Cupressus sempervirens* (cedro de monterrey), *Enterolobium contortisiliquum* (timboy), *Erythrina crista-galli* (ceibo), *Fraxinus americana* (fresno americano), *Fraxinus exelsior* (fresno europeo), *Geoffroea decorticans* (chañar), *Gleditsia triacanthos* (coronillo), *Grevillea robusta* (grevilla), *Jacaranda mimosifolia* (tarco), *Leucaena leucocephala* (Leucaena), *Ligustrum lucidum* (ligustre), *Melia azedarach* (paraíso), *Mespilus germánica* (níspero), *Morus nigra* (mora), *Podocarpus parlatorei* (pino de cerro), *Populus alba* (álamo plateado), *Populus deltoides* (álamo americano), *Populus nigra* (álamo piramidal), *Prosopis alba* (algarrobo), *Pterogyne nitens* (tipa colorada), *Quercus robur* (roble europeo), *Quercus suber* (alcornoque), *Salix babylonica* (sauce llorón), *Salix humboldtiana* (sauce criollo), *Schinus molle* (molle), *Tabebuia serratifolia* (lapacho amarillo) y *Tipuana tipu* (tipa blanca) (Killeen *et al.*, (1993); Mostacedo *et al.*, (2003) y USDA (2007)).

2.1.4. Clima

2.1.4.1. Temperatura

La ciudad de Tarija, se caracteriza por tener un clima templado. La temperatura media es de 19,9 ° Celsius, la máxima media es de 26,1° Celsius, la mínima media de 9,7° Celsius, con unas máximas extremas hasta de 39,7° Celsius en verano y mínimas extremas de hasta los -9,2° Celsius en invierno (SENAMHI, 2020) (ver tabla 1).

El año 2019 que es la gestión de estudio, la temperatura media fue de 18,5° Celsius, la máxima media presentó un valor de 26,8° Celsius, la mínima media fue de 10,2° Celsius, con unas máximas extremas hasta de 38,4° Celsius en verano y mínimas extremas de hasta los -4,4° Celsius en invierno (SENAMHI, 2020).

Por lo que, según los registros, la temperatura promedio en la ciudad ha aumentado en aproximadamente 0,78° Celsius en los últimos 50 años. Esto puede deberse a una combinación de factores, como el cambio climático y el crecimiento urbano.

Tabla 1. Variables de temperatura media (1962 -2020)

Meses	Temperatura máxima media (°C)	Temperatura mínima media (°C)	Temperatura media (°C)
ENE	27,2	14,5	20,8
FEB	26,8	14,1	20,4
MAR	26,3	13,5	19,9
ABR	25,7	11,0	18,4
MAY	24,8	6,2	15,5
JUN	24,2	2,8	13,5
JUL	24,0	2,5	13,2
AGO	25,5	4,8	15,1
SEP	26,3	7,9	17,1
OCT	27,7	11,5	19,6
NOV	27,6	13,1	20,4
DIC	27,6	14,3	20,9
Media anual	26,1	9,7	17,9

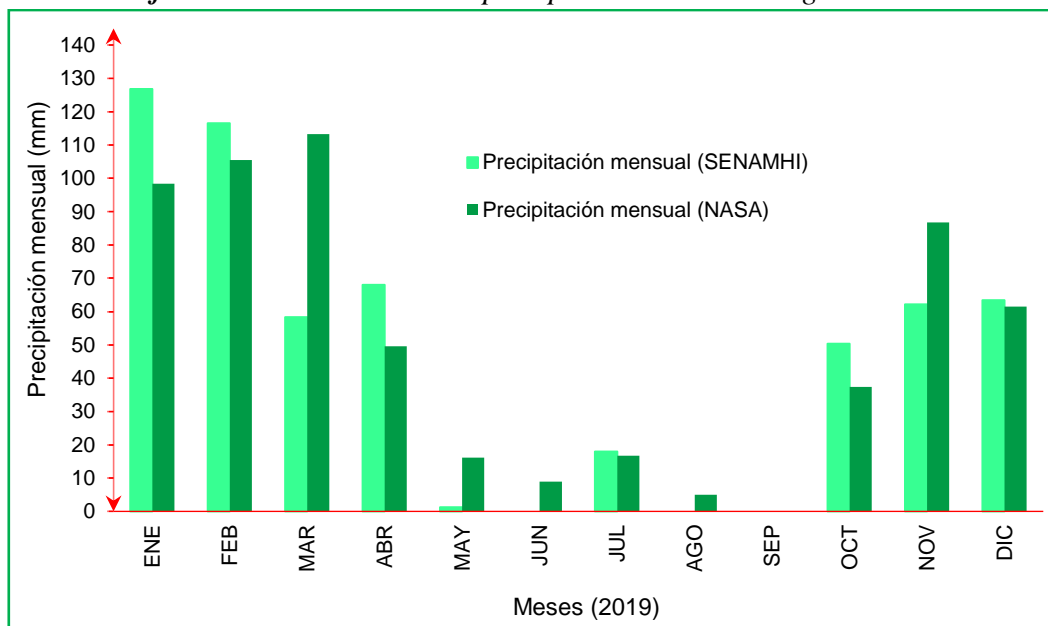
FUENTE: *Elaboración propia, datos de SENAMHI, 2020.*

2.1.4.2. Precipitación

Según el SENAMHI (2020), la precipitación media anual para la ciudad de Tarija es de 597,6 milímetros, el 85% de la precipitación se concentra en los meses de noviembre a marzo, existiendo un 90% de probabilidad que las precipitaciones no sean mayores a los 630 milímetros y un 50% de que no sean mayores a 550 milímetros.

La precipitación se caracteriza por periodos relativamente cortos de lluvias (noviembre-abril), con regímenes de precipitaciones muy variables en cuanto a frecuencia e intensidad y con un periodo largo de estiaje (mayo-octubre), periodo en el cual es más notorio el déficit de agua en las subcuencas del Rio Santa Ana, Sella y El Monte (SENAMHI, 2020). Con fines de calibración del modelo de i-Tree Eco se utilizaron datos de precipitación por hora para la gestión 2019, esto con el fin de estimar los efectos hidrológicos, según SENAMHI (2020) la precipitación anual fue de 564,7 milímetros, en comparación de la NASA con precipitación de 593 milímetros, donde el 58% de la precipitación fue concentrada entre los meses de octubre a abril (ver Gráfico 1).

Gráfico 1. Distribución de la precipitación durante la gestión 2019



FUENTE: Elaboración propia, con datos de SENAMHI (2020) y NASA.

2.1.4.3.Días con lluvia

Los días promedio de lluvia de Tarija fueron de 68 días, donde los meses de mayor concentración son en diciembre, enero y febrero. La gestión 2019 presentó 76 días, distribuidos en octubre a marzo, con un máximo de 15 días (SENAMHI, 2020).

2.1.4.4.Precipitación máxima en 24 horas

La precipitación máxima diaria fue de 125 milímetros en los últimos años, donde para el 2019 fue de 55 milímetros (SENAMHI, 2020).

2.1.4.5.Días con helada

Los días de helada promedio es de 22 días, donde los meses con mayores días son en junio y julio con un máximo de 9 días. Para la gestión 2019 se presentaron 24 días con helada, donde los meses de julio y agosto presentaron 5 días (SENAMHI, 2020).

2.1.4.6.Presión barométrica

La presión barométrica es de 814 hectopascales, con una mínima de 813 hectopascales y máxima de 814,4 hectopascales (SENAMHI, 2020).

2.1.4.7.Humedad relativa

La humedad relativa durante los últimos años presento un valor de 59,8%, donde los meses con mayor valor fueron de diciembre a marzo con un máximo de 71,7%. Para la el año 2019 presento una media anual de 59,8% (SENAMHI, 2020).

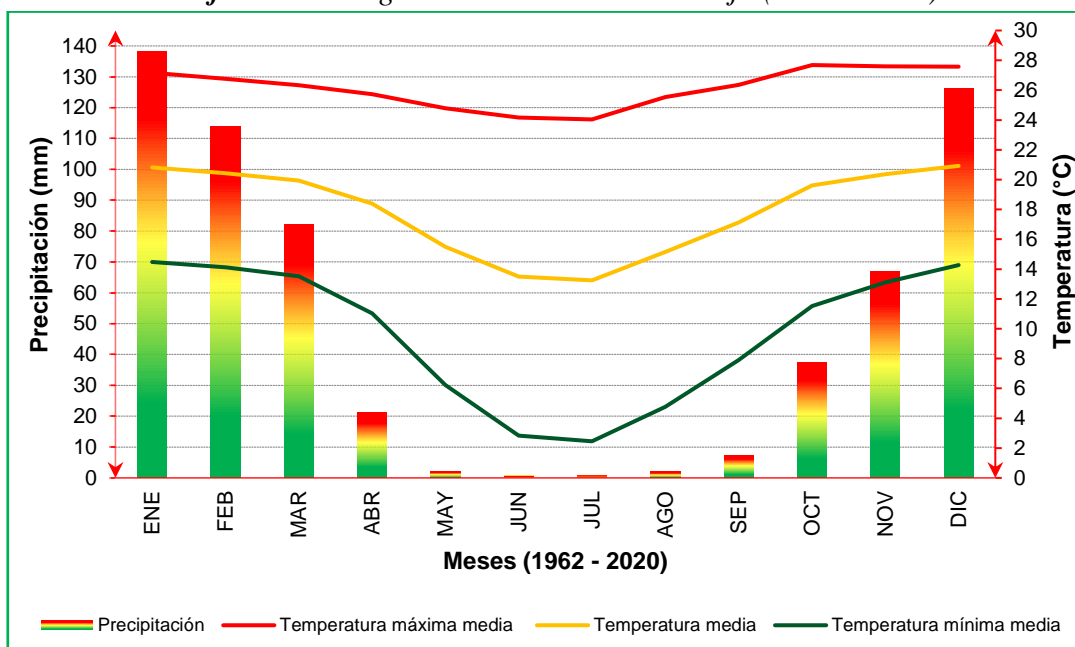
2.1.4.8.Dirección y velocidad de los vientos

Según SENAMHI (2020), la velocidad promedio anual del viento en Tarija es de 6,0 km/h y es más intensa de agosto a diciembre. La dirección predominante es SW y no cambia durante el año. También se presentan vientos débiles a moderados de dirección variable de origen local. La intensidad y dirección predominante del viento en Tarija está influenciada por la fractura geológica de la Angostura y se distribuye hacia el norte y sur de ese punto de referencia.

2.1.4.9. Climograma

El climograma es una herramienta importante para el estudio de los árboles urbanos ya que muestra variables climáticas como la temperatura y la precipitación media. Estas variables son críticas para la salud y el crecimiento de los árboles, por lo que es útil identificar las estaciones del año en las que las temperaturas son más extremas para seleccionar especies de árboles que puedan tolerar esas condiciones. Por otro lado, puede ayudar a identificar tendencias climáticas a largo plazo y planificar la gestión del arbolado urbano. Donde el siguiente climograma (ver Gráfico 2), está basado en las precipitaciones medias y temperaturas medias desde 1962 al 2020.

Gráfico 2. Climograma de la ciudad de Tarija (1962 - 2020)



FUENTE: Elaboración propia, datos de SENAMHI.

En el caso para Tarija, se muestra una distribución altamente concentrada de la precipitación en los meses de enero, febrero y diciembre, y una marcada estacionalidad en las temperaturas, con los meses de junio y julio siendo los más fríos y diciembre el mes más cálido. Es importante tener en cuenta que estos son valores promedio desde el año 1962 al 2020 y que las condiciones climáticas pueden variar significativamente de un año a otro.

2.2. Materiales y equipos

Los materiales, herramientas y equipos empleados para poder desarrollar el estudio, se describen a continuación:

2.2.1. Materiales de campo

- Cinta métrica
- Forcípula
- Hipsómetro Blume – Leiss
- Clinómetro Florestal, aplicación móvil de Android
- Planilla de campo
- Tijera telescópica
- Flexómetro
- Wincha
- Cámara fotográfica

2.2.2. Equipo de orientación en campo

- Mapas cartográficos
- Imágenes satelitales
- Brújula
- Navegador GPS (Global Positioning System)
- Mobile Data Collection (MDC) de i-Tree Eco

2.2.3. Equipo de gabinete

- Software i-Tree Eco
- Software Arc GIS
- Software Excel
- Hardware (Laptop)

2.3. Metodología

2.3.1. Tipo de investigación

La presente investigación se basó en aplicar el método empírico - cuantitativo, ya que revela y explica las características fenomenológicas del objeto, caracterizando el objeto de estudio para elaborar el diagnóstico, subdividido en métodos de observación sistemática, la cual, consiste en la percepción directa del objeto de investigación y medición de variables, donde tiene el objetivo de obtener información numérica a cerca de una propiedad o cualidad de un objeto, proceso o fenómeno, donde se comparan magnitudes medibles y conocidas (Ramírez, 2018).

La investigación propuesta es de tipo **cuantitativa**, porque se utilizó datos numéricos para medir y analizar el valor ecosistémico del arbolado urbano en base al software *i-Tree Eco* llevando un acabo un análisis de los datos, lo que permitió obtener resultados precisos y confiables.

2.3.2. Diseño de investigación

La investigación que se llevó a cabo **no fue de tipo experimental**, es decir, no se manipuló ninguna variable para estudiar su efecto. En cambio, se realizó una descripción de una situación tal y como se presentó en su contexto natural.

2.3.3. Variables

Los tipos de variables son **cuantitativas**, basadas en variables de la estructura del árbol, como número de individuos, DAP, dimensiones de altura; dimensiones, forma y salud de copa, exposición solar, área basal, cobertura arbórea, área y biomasa foliar, biomasa arbórea, almacenamiento y secuestro de carbono, producción de oxígeno y escurrimiento evitado con sus respectivos valores económicos.

2.3.4. Población

Se consideró el **número total de árboles** censados y analizados, distribuidos en sus respectivas especies y familias filogenéticas.

2.3.5. Método de recopilación de información florística: Censo forestal

Para el presente estudio, el levantamiento preliminar de información florística estuvo basado en un **censo forestal** de la forma de vida arbórea en individuos vivos con un diámetro a la altura del pecho (DAP) \geq a 10 centímetros, en el área total de estudio, comprendido en transectos variables, lo cual según Foster *et al.* (1995), un transecto variable es para realizar evaluaciones rápidas de la vegetación que consiste en muestrear un número determinado de individuo a lo largo de un transecto con un ancho determinado y de largo definido por el número estándar de individuos a muestrearse. Por lo que según Mostacedo (2000), se pueden muestrear todas las plantas o clases de plantas, separadas en forma de vida (árboles, arbustos, herbáceas y mucinal).

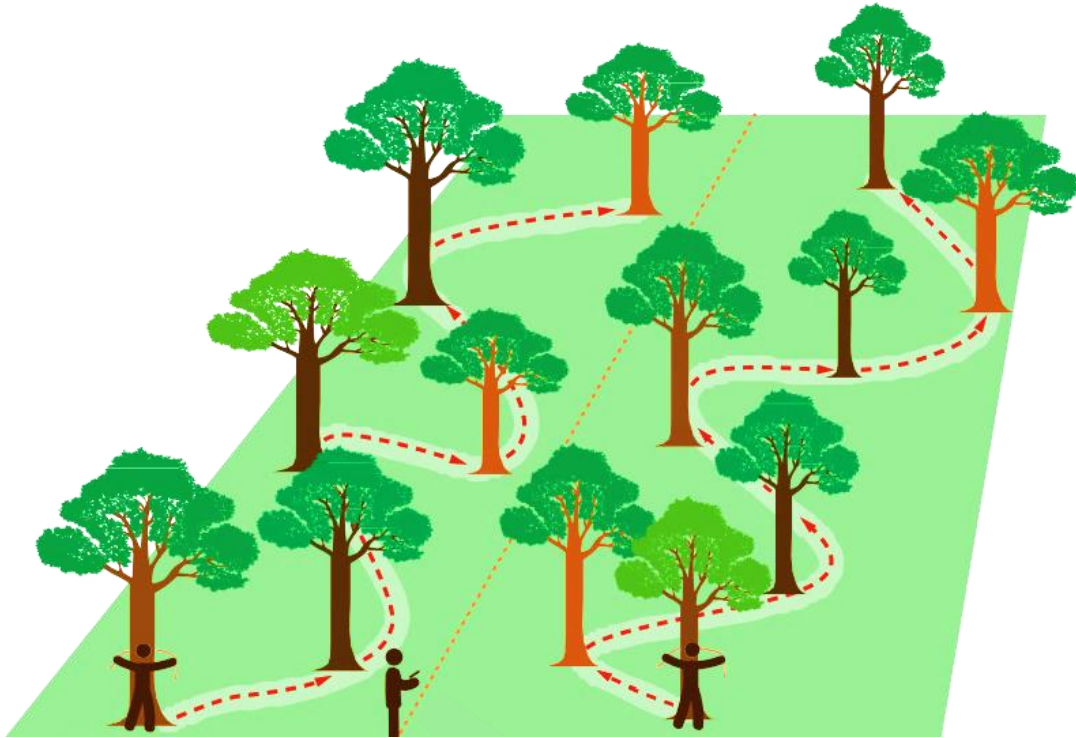
Para este caso se consideró a las jardineras como transectos variables, debido a que no presentan un ancho fijo y una longitud definida. Por lo que se procedió a dividir las jardineras en transectos. Para la Av. Jaime Paz Zamora se establecieron 2 transectos, para la Av. Víctor Paz Estensoro se dividió en 4 transectos), teniendo en cuenta que el censo se hizo en dirección Este a Noroeste, para ambas avenidas viarias (ver Mapa 2).

Tabla 2. Atributos de los transectos establecidos

ATRIBUTOS DE LOS TRANSECTOS VARIABLES						
Jardineras de la Av. Jaime Pas Zamora						
Transecto	Franjas	Ancho medio (m)	Longitud (m)	Azimut	Punto de inicio	
					X UTM	Y UTM
T1	Derecha	55-15	1847	280°	322979	7616664
T2	Izquierda	15	1862	280°	322992	7616639
Jardineras de la Av. Víctor Paz Estensoro						
T3	Derecha	10 - 30	945	279° - 298°	321114	7617045
T4	Derecha	30 - 10	720	275° - 316°	320304	7617409
T5	Izquierda	30 - 5	708	280° - 299°	321110	7617005
T6	Izquierda	30 - 5	920	298° - 317°	320345	7617317

FUENTE: Elaboración propia

Ilustración 2. Levantamiento florístico durante el censo forestal



FUENTE: Adaptado de (Molina, 2019)

Con un censo de todos los árboles, no hubo estimación de varianza o error de muestreo en el total de población ya que toda la población está inventariada.

2.3.6. Técnicas

Se aplicó la técnica de **observación sistemática**, la cual, consiste en la percepción directa de los atributos del árbol, donde tiene el objetivo de obtener información numérica ya sea medida o estimada de las variables de la estructura del árbol.

2.3.7. Método

La metodología utilizada se basó en la aplicación del modelo i-Tree Eco V6.0, que utilizó datos de la estructura arbórea obtenidos a través de un censo forestal realizado en el área de estudio y datos climáticos y de contaminantes obtenidos de la NASA, en comparación con los datos del SENAMHI, con el fin de determinar y valorar los principales servicios ecosistémicos proporcionados por los árboles en la zona.

2.3.8. Procedimiento

Con el propósito de alcanzar los objetivos propuestos en el marco de la presente investigación, se diseñó una estrategia metodológica que se estructuró en tres etapas secuenciales y complementarias entre sí.

En la primera fase de la investigación, se llevó a cabo un proceso exhaustivo de recolección y agregación de datos. Se recopilaron datos de ubicación del área de estudio y especies forestales que no estaban previamente registrados en la base de datos de i-Tree. Además, se obtuvieron y analizaron datos de contaminantes atmosféricos, como el material particulado de 2,5 micras ($PM_{2,5}$), ozono troposférico (O_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2), provenientes del Centro de Investigación en Fluidos de la NASA. También se recopilaron datos de precipitación pluvial para evaluar los efectos hidrológicos del arbolado urbano en la ciudad. Estos datos fueron comparados con la información proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (NASA) para asegurar la calidad y confiabilidad de los datos. Una vez que se recopiló y analizó toda esta información, se procedió a agregarla en la base de datos de i-Tree Eco con el objetivo de enriquecer la información disponible en esta plataforma y mejorar la precisión de los resultados obtenidos en las siguientes etapas de la investigación.

En la segunda etapa, se realizó un inventario completo en el campo para obtener datos precisos sobre las características del arbolado urbano en el área de estudio. Durante esta etapa, se recopilaron datos dasométricos y de estructura de los árboles.

En la etapa final del proyecto, se realizó un análisis exhaustivo de las diversas fórmulas y métodos disponibles en i-Tree Eco. Además, se analizaron los datos recopilados en el campo. Estos análisis fueron fundamentales para llevar a cabo la modelación correspondiente y obtener resultados precisos. Se utilizaron las herramientas y funciones de i-Tree Eco para analizar los datos recopilados y extraer conclusiones significativas.

Etapa I: Obtención e inclusión de datos de ubicación, especies forestales y precipitación pluvial.

2.3.8.1.1. Inclusión de datos de ubicación a la base de datos de i-Tree

Se identificó que la plataforma i-Tree Eco, originalmente desarrollada y calibrada en los Estados Unidos y algunos países de Norte América y Europa, carecía de datos actualizados de ubicación para Bolivia. Por lo tanto, se llevó a cabo la incorporación de información de ubicación específica de la ciudad de Tarija, por lo que se procedió a agregar datos de ubicación en la base de datos de i-Tree, en la página web (<https://database.itreetools.org/#/locations/add>), donde se describió las siguientes variables: continente (Sud América), país (Bolivia), estado/provincia (Tarija), condado/distrito (Cercado), ciudad (Tarija), divisa (boliviano), latitud (-21,53°), longitud (-64,83°), elevación (1866 m.s.n.m.), población (272692 habitantes (INE, 2020)), área (10 6000 000 m²(DOT,2019)), región climática (montañas), temperatura mínima (41° F (SENAMHI,2020)), foliación en días de año (243 días), días sin foliación (121 días), desplazamiento GMT(-4 horas), temperaturas cálidas (Si, (SENAMHI,2019)), lluvia abundante (No, (SENAMHI,2020)), vegetación abundante (No) y nieve (No, (SENAMHI, 2020)). Este proceso permitió contar con una base de datos actualizada y específica para la ciudad de Tarija.

La inclusión de datos de ubicación específicos en la base de datos de i-Tree fue un paso necesario para asegurar la representatividad y precisión de los resultados en el contexto de la ciudad de Tarija. Aunque el área de estudio abarca solo una parte de la ciudad, la plataforma i-Tree requiere la selección de una ubicación a nivel de ciudad como parte de su estructura de datos. Por lo tanto, se optó por incluir la información de la ciudad de Tarija en su totalidad para garantizar la integración adecuada de los datos recolectados en el análisis realizado. Esto permite tener una base de datos actualizada y específica para la ciudad de Tarija, que servirá como referencia para evaluar los diferentes aspectos relacionados con el análisis y la evaluación del arbolado urbano en el área de estudio.

2.3.8.1.2. Inclusión de datos de especies forestales

Se realizó un proceso de actualización de la base de datos de especies en i-Tree Eco con el objetivo de completar la información taxonómica y morfológica de las especies faltantes identificadas en el área de estudio.

Inicialmente, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la base de datos existente en i-Tree Eco y se comparó con las especies presentes en el área de estudio. Como resultado de esta revisión, se identificaron dos especies ausentes en la base de datos: *Pterogyne nitens* (tipa colorada) y *Podocarpus parlatoresi* (pino de cerro).

Posteriormente, se realizó una investigación detallada sobre las características taxonómicas y morfológicas de estas especies. Se consultaron diversas fuentes de información, como los estudios de Killeen *et al.* (1993), Gutiérrez *et al.* (2014) y Mostacedo *et al.* (2003), así como la base de datos de plantas del Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA, 2020).

Se recopilaron datos específicos para cada especie, incluyendo el nombre científico, la familia, el orden y la clase taxonómica. Además, se obtuvo información detallada sobre la forma de crecimiento, el tipo de hoja, la tasa de crecimiento, la longevidad y la altura esperada a la madurez de cada especie.

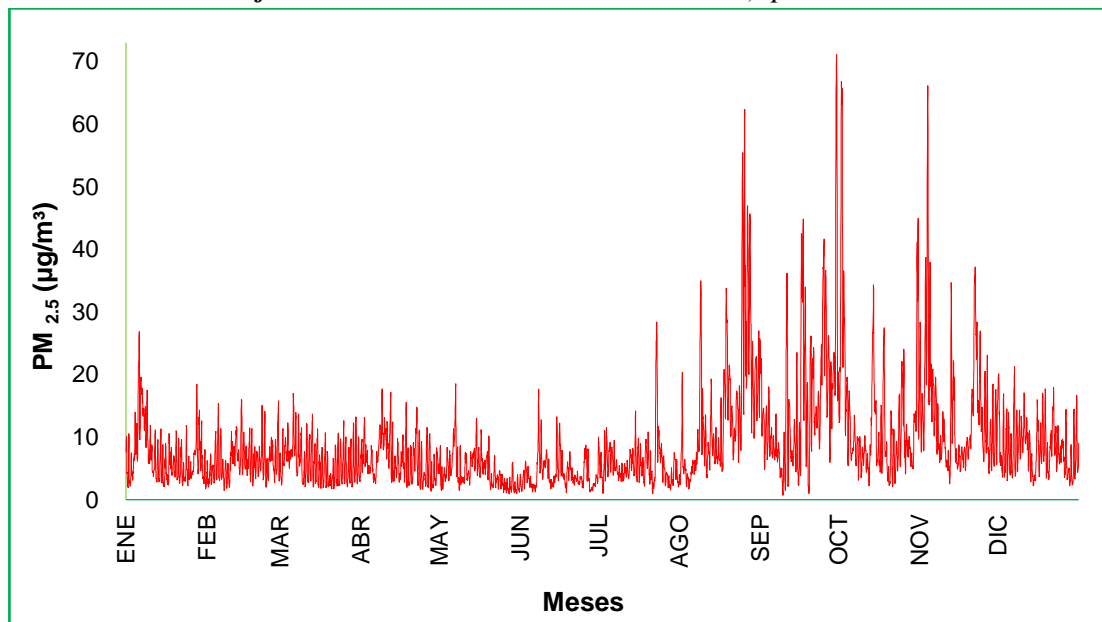
Una vez recopilada toda la información, se procedió a la inclusión de los datos en la base de datos de especies de i-Tree Eco. Se accedió a la página web correspondiente (<https://database.itreetools.org/#/species/add>). y se completaron los campos requeridos con la información recolectada para cada especie faltante.

Finalmente, se verificó la correcta inclusión de la información en la base de datos de i-Tree Eco. Se realizaron pruebas para asegurarse de que las especies faltantes ahora estuvieran disponibles y pudieran ser seleccionadas en futuros análisis. Con este procedimiento, se logró actualizar y completar la base de datos de especies en i-Tree Eco, garantizando así la exhaustividad y precisión de los análisis realizados en el software.

2.1.1.1.1. Obtención e inclusión de datos de contaminantes atmosféricos

Se identificó que las estaciones de monitoreo de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire (Red MONICA) no disponían de los datos necesarios de material particulado de 2,5 micras ($PM_{2,5}$), ozono (O_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2) a nivel horario durante un año 2019. Ante esta limitación, se decidió buscar fuentes alternativas de datos. Se recurrió a los sensores satelitales del Centro de Investigación en Fluidos de la NASA (NASA Center for Climate Simulation), especializado en el análisis y modelado de datos atmosféricos y climáticos. Estos sensores proporcionaban mediciones de contaminantes atmosféricos por hora, incluyendo $PM_{2,5}$, O_3 y NO_2 , en diferentes ubicaciones geográficas. A través del (https://fluid.nccs.nasa.gov/cf_map/index?product=no2&for_time=1230&for_date=20230527&cmap_scale=viridis), se accedió a datos confiables sobre la concentración de estos contaminantes. Los datos descargados correspondieron a la gestión 2019, para la ciudad de Tarija. A continuación de muestras los gráficos con los datos obtenidos, tanto para $PM_{2,5}$, O_3 y NO_2 :

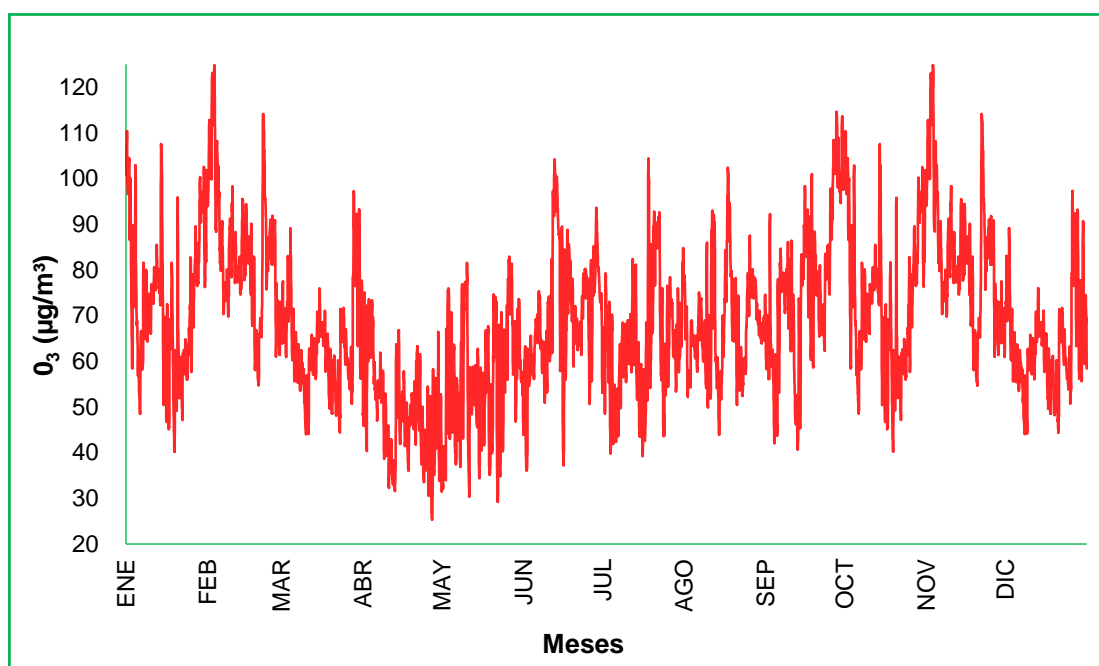
Gráfico 3. Concentración horaria de $PM_{2,5}$ para 2019.



FUENTE: Elaboración propia, graficado con datos de NASA.

El gráfico 3 muestra la concentración de $PM_{2.5}$ por hora durante el año 2019. En promedio, la concentración fue de alrededor de $8,63 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observa una variabilidad en los niveles de contaminación, con valores mínimos de $0,69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y máximos de $71,08 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores extremos resaltan los períodos de menor y mayor contaminación. Se puede apreciar un aumento significativo en las concentraciones durante los meses de septiembre, octubre y noviembre, posiblemente debido a los incendios forestales ocurridos en esa época.

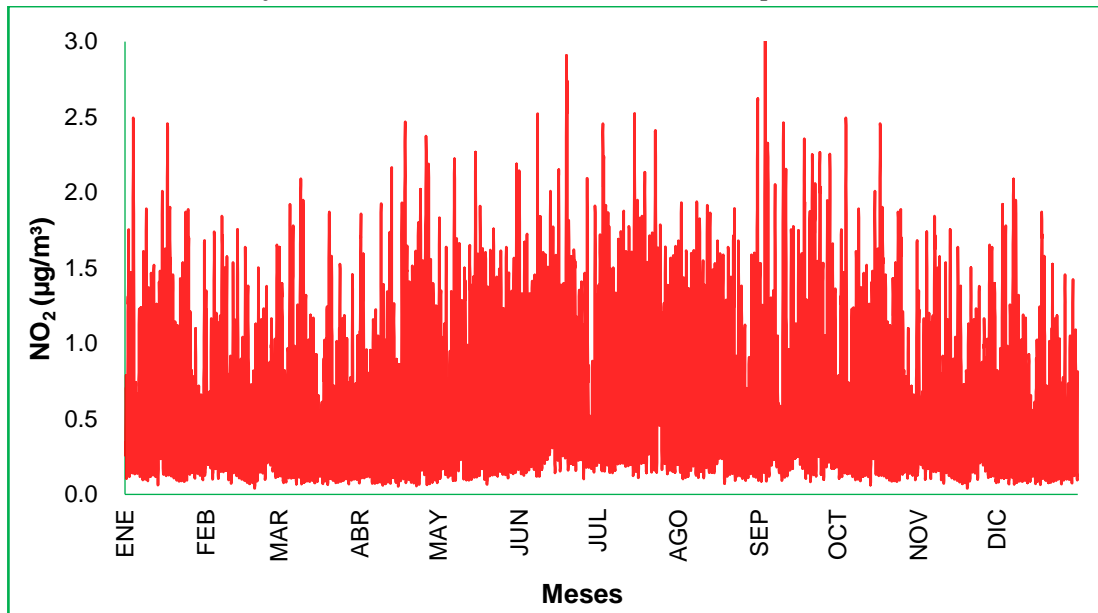
Gráfico 4. Concentración horaria de O_3 para 2019.



FUENTE: Elaboración propia, graficado con datos de NASA.

El gráfico 4 muestra la concentración horaria de O_3 (ozono troposférico) durante el año 2019. La concentración promedio de O_3 es de aproximadamente $68,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se observa una variabilidad en los niveles de O_3 a lo largo del período analizado, con valores que van desde un mínimo de $25,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$ hasta un máximo de $124,86 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos valores extremos indican momentos de menor y mayor concentración de ozono en la atmósfera. La elevada concentración de ozono puede atribuirse a factores como las condiciones climáticas, la contaminación urbana y la presencia de gases contaminantes.

Gráfico 5. Concentración horaria de NO₂ para 2019.



FUENTE: Elaboración propia, graficado con datos de NASA.

El gráfico muestra la concentración horaria de NO₂ (dióxido de nitrógeno) para el año 2019. La concentración promedio de NO₂ es de aproximadamente 0,699 µg/m³. Se observa que los niveles de NO₂ varían a lo largo del período analizado, con valores que van desde un mínimo de 0,040 µg/m³ hasta un máximo de 3,221 µg/m³. Estos valores extremos resaltan los momentos de menor y mayor concentración de dióxido de nitrógeno en la atmósfera. La distribución de los datos muestra cierta asimetría hacia la derecha, lo que indica una tendencia hacia concentraciones más altas de NO₂, durante los meses de septiembre y octubre.

Una vez descargados y analizados los datos de PM_{2,5}, O₃ y NO₂, se procedió a incluir esta información en una plantilla de Excel proporcionada por i-Tree. Los datos fueron ingresados en la plataforma web (<https://database.itreetools.org/#/pollution/add>), que permite recopilar y gestionar los datos de contaminación atmosférica. Se incluyeron la fecha, hora y ubicación geográfica correlacionada al área de estudio. Estos datos fueron agregados con el objetivo de estimar la capacidad de eliminación de contaminantes por parte del arbolado urbano. Es importante destacar que, debido al volumen de los datos, no se incluyen los registros horarios en los anexos.

2.1.1.1.2. Obtención e inclusión de datos de precipitación pluvial

El modelo de i-Tree Eco al igual que datos de contaminantes requiere datos de precipitación pluvial por hora durante un año, por lo que la Estación meteorológica Oriel Lea Plaza de la ciudad de Tarija manejada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) no cuenta con estos datos, mínimamente presenta datos diarios. En lo cual, se recurrió a obtener datos de los sensores satelitales de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA), desde la página web (<https://power.larc.nasa.gov/beta/data-access-viewer/>) (NASA/POWER CERES/MERRA2), con una resolución espacial de 0,5 de latitud x 0,625 grados de longitud y con una escala de tiempo horaria (mm/hr).

Los datos obtenidos corresponden a los años 2016 al 2020. Con el propósito de comparar la precipitación acumulada anual con los registros obtenidos del SENAMHI, se procedió a realizar un análisis estadístico para comparar la significancia de los datos de precipitación obtenidos por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) y la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) para validar los datos de la gestión 2019, que es la gestión objeto de estudio.

Se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar la relación entre las variables. Por último, se realizó una prueba t de Student para completar el análisis.

La hipótesis nula planteada fue que no había una diferencia significativa entre las medias de precipitación de SENAMHI y NASA.

La fórmula utilizada para calcular el coeficiente de correlación de (Pearson, 1895) es la siguiente:

$$r = \frac{n \sum XY - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{(n \sum X^2 - \sum X)^2 - (n \sum Y^2 - \sum Y)^2}}$$

Donde:

n = Número de pares de datos

X = Datos de precipitación de SENAMHI

Y = Datos de precipitación de NASA

Σ = Sumatoria de los valores

La prueba t de (Student, 1908) se utilizó para comparar las medias de dos muestras emparejadas. La fórmula para calcular la prueba t es la siguiente:

$$t = \frac{(\bar{X}d - \mu d)}{\frac{sd}{\sqrt{n}}}$$

Donde:

$\bar{X}d$ = Media de las diferencias entre las dos muestras emparejadas

μd = Media poblacional de las diferencias, bajo la hipótesis nula

sd = Desviación estándar de las diferencias entre las dos muestras emparejadas

n = Tamaño de la muestra de las diferencias

La fórmula para los grados de libertad en la prueba t para medias de dos muestras emparejadas es:

$$Df = n - 1$$

Donde:

Df = Grados de libertad

n = Número de pares de datos emparejados

2.3.6.3.1. Análisis estadístico de los datos

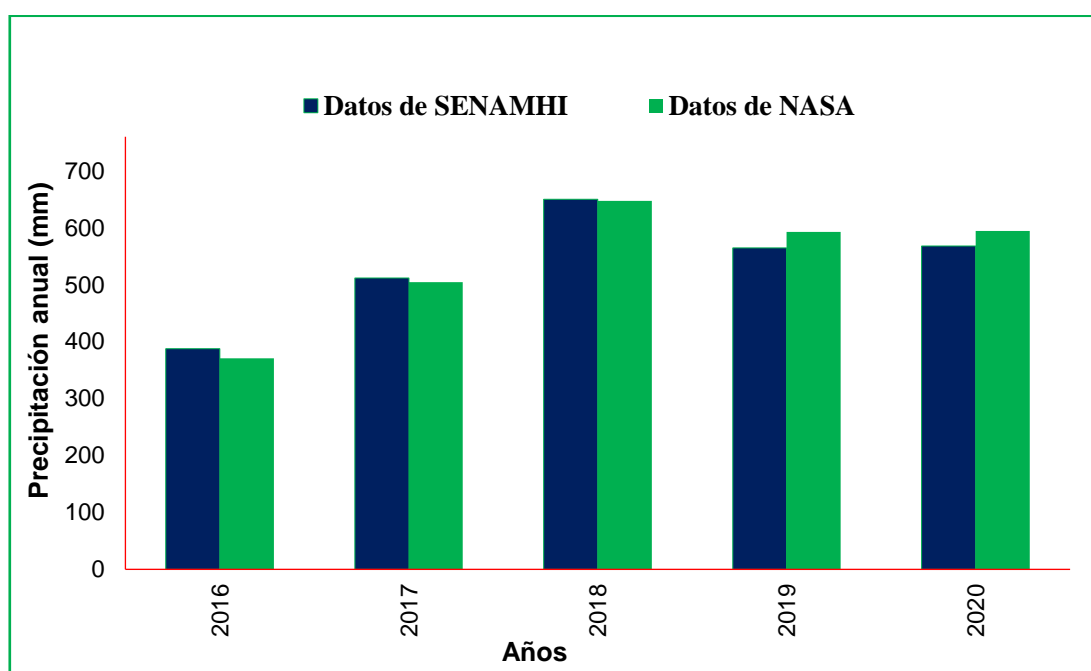
Tabla 3. Datos de precipitación anual de NASA y SENAMHI

Año	Datos de precipitación (mm/año) de SENAMHI	Datos de precipitación (mm/año) de NASA	Diferencia de precipitación (mm)	Diferencia de precipitación (%)
2016	387,40	370,87	16,53	4,27
2017	512,00	504,56	7,44	1,45
2018	650,00	647,54	2,46	0,38
2019	564,70	593,00	-28,30	5,01
2020	568,00	594,41	-26,41	4,65

FUENTE: *Elaboración propia, realizado con datos de NASA y SENAMHI.*

La Tabla 3 muestra los datos de precipitación (en mm/año) de dos fuentes diferentes, SENAMHI y NASA, para los años 2016-2020. Se observa que las diferencias absolutas entre las mediciones de SENAMHI y NASA en términos de precipitación anual son pequeñas en comparación con el promedio anual de precipitación para cada año. Por ejemplo, en 2016, la diferencia absoluta entre las mediciones de SENAMHI y NASA fue de 16,53 mm, lo que representa sólo el 4,27% del promedio anual de precipitación para ese año.

Gráfico 6. Comparación de datos de NASA con SENAMHI



FUENTE: Elaboración propia, realizado con datos de NASA y SENAMHI.

Según el Gráfico 3, en base a datos de la Tabla 3, en términos de tendencias a lo largo del tiempo, se observa que en algunos años (como 2019 y 2020) las diferencias absolutas entre las mediciones de SENAMHI y NASA son relativamente grandes, en comparación con los otros años. Además, se observa que, en estos mismos años, las diferencias relativas en términos de porcentaje son mayores que en otros años.

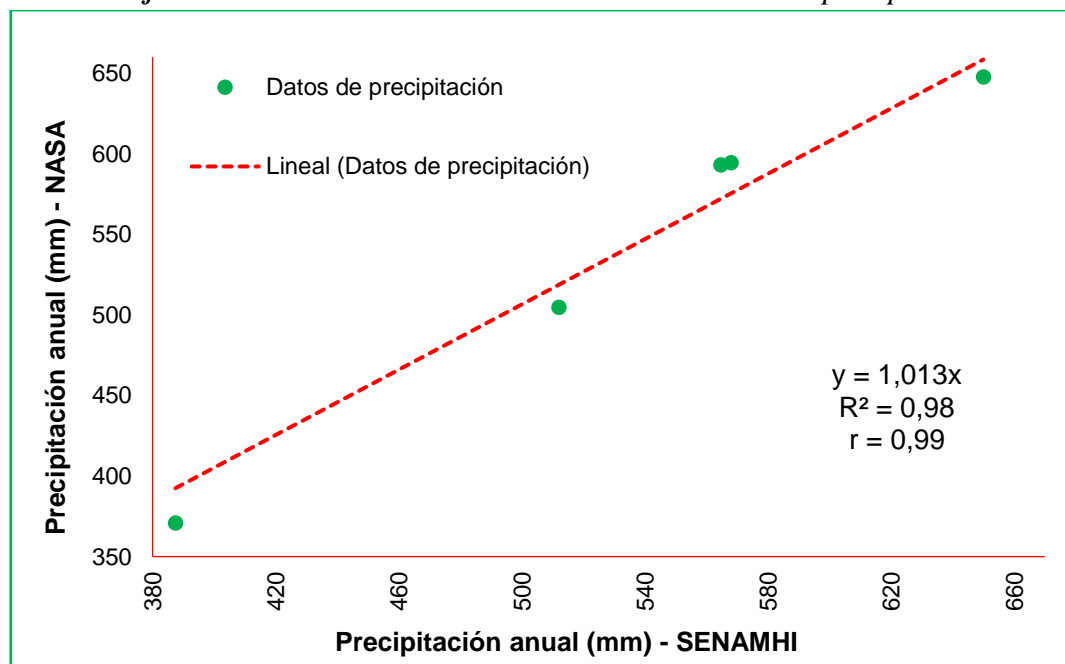
Sin embargo, en general, se puede decir que las diferencias absolutas y relativas entre las mediciones de SENAMHI y NASA son relativamente pequeñas y no parecen afectar significativamente las conclusiones que se pueden extraer de los datos.

Tabla 4. Análisis estadístico de los datos de precipitación

Estadísticos	SENAMHI	NASA
Media	536,42	542,08
Varianza	9375,19	11793,43
Observaciones	5	5
Coefficiente de correlación de Pearson	0,99	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	4	
Estadístico t	-0,6184	
P(T<=t) una cola	0,2849	
Valor crítico de t (una cola)	2,1318	
P(T<=t) dos colas	0,5698	
Valor crítico de t (dos colas)	2,78	

FUENTE: Elaboración propia, calculado en Excel.

Se indica que se encontró una alta correlación positiva fuerte utilizando el coeficiente de correlación de Pearson ($r = 0,99$) entre los datos de precipitación obtenidos por el SENAMHI y los obtenidos por NASA (ver Gráfico 4, graficado con datos en Tabla 3).

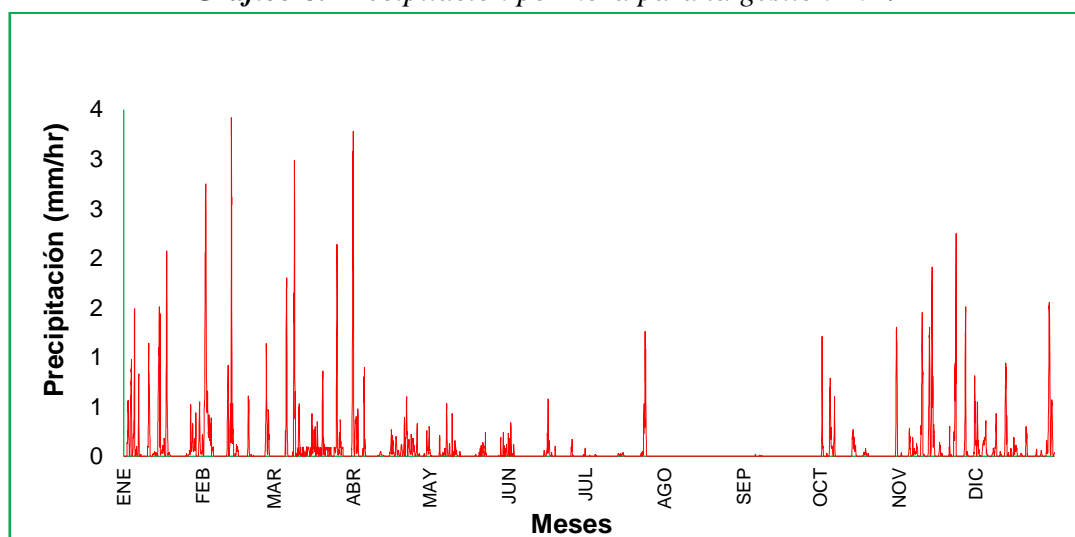
Gráfico 7. Análisis de correlación lineal de los datos de precipitación

FUENTE: Elaboración propia, con datos comparados de SENAMHI y NASA.

La prueba de la t de Student indicó que no hay una diferencia significativa entre las medias de las dos muestras emparejadas. El valor calculado del estadístico t (-0,6184) es menor que el valor crítico de la tabla t de Student (2,78) para un nivel de significancia del 5% o 95% de confianza y 4 grados de libertad, lo que significa que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula de que no hay diferencia significativa entre las medias de precipitación de SENAMHI y NASA. Por lo tanto, se puede concluir que las medias de precipitación de SENAMHI y NASA son similares o casi iguales en la muestra. Con esta información, se procedió a calibrar el modelo de i-Tree Eco con los datos de NASA, lo que sugiere que el modelo puede ser aplicado de manera confiable a la región en estudio.

Los datos utilizados para la modelación en i-Tree Eco correspondieron al año 2019, y consistieron en registros horarios de precipitación. Dada la naturaleza de estos datos, resulta impracticable y poco claro excluir la base de datos completa de la precipitación horaria en los anexos. Para proporcionar una visión adecuada de las características principales de la precipitación en el área de estudio, se incluyó en el informe el Gráfico 5, el cual representa la distribución de la precipitación acumulada a lo largo del año 2019. Este gráfico permite apreciar visualmente las fluctuaciones y patrones de la precipitación a lo largo de las diferentes estaciones y períodos del año.

Gráfico 8. *Precipitación por hora para la gestión 2019*



FUENTE: *Elaboración propia, realizado con datos de NASA.*

Tabla 5. Análisis estadístico de los datos de precipitación para la gestión 2019

Precipitación 2019 (mm/hr)	
Estadísticos	Valor
Media	0,07
Error típico	0,003
Mediana	0,00
Moda	0,00
Desviación estándar	0,24
Varianza	0,056
Curtosis	57,57
Coefficiente de asimetría	6,64
Rango	3,41
Mínimo	0,00
Máximo	3,41
Suma	593,00
Cuenta	8760
Nivel de confianza (95%)	0,0050

FUENTE: Elaboración propia.

La precipitación acumulada durante ese año fue de 593 milímetros, en comparación de SENAMHI donde se tiene una precipitación acumulada de 564,70 milímetros, lo que indica la cantidad total de lluvia que cayó en esa área durante el transcurso del año. Además, se registró una máxima precipitación por hora de 3,41 milímetros durante ese período. Por otro lado, la precipitación media por hora anual fue de 0,07 milímetros. La distribución de los datos es muy asimétrica y puntiaguda, con una curtosis y un coeficiente de asimetría muy altos.

2.1.6.3.1. Inclusión de precipitación pluvial a la base de datos de i-Tree

Una vez descargados, analizados y corregidos los datos de precipitación correspondientes a la gestión 2019, se procedió a cargarlos en la base de datos de i-Tree Eco a través de la página web <https://database.itreetools.org/#/precipitation/add>, donde, esta aplicación permitió agregar datos de precipitación por hora, en una plantilla Excel con el nombre de “Rain_2019.xlsx”, asociado la estación meteorológica Oriel Lea Plaza de la ciudad de Tarija manejada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI).

Los datos de precipitación, fueron proporcionados en metros/hora, por lo que así lo requiere la base de datos de i-Tree. Para convertir milímetros (mm) de precipitación a metros (m), se aplicó la siguiente fórmula:

$$\mathbf{Precipitación(m/hr)} = \frac{\mathbf{Precipitación (mm/hr)}}{\mathbf{1000 (mm/m)}}$$

Esta fórmula permite convertir adecuadamente los valores de precipitación de milímetros a metros, asegurando que los datos sean consistentes con los requisitos de la base de datos de i-Tree Eco.

Tabla 6. Ejemplo de plantilla de datos de precipitación (metros/hora)

Marca de tiempo	Precipitación (m/hr)
1/1/2019 0:00	0,00000
.....
2/1/2019 07:00	0,00000
2/1/2019 08:00	0,00014
.....
31/12/2019 23:00	0,00004

FUENTE: *i-Tree, 2022*

La Tabla 6 proporciona un ejemplo de la plantilla de datos de precipitación que se utilizó para cargar los registros de precipitación correspondientes al año 2019 en la base de datos de i-Tree Eco. La justificación para incluir esta tabla radica en su importancia para la correcta estructuración y formato de los datos de precipitación antes de ser cargados en la base de datos.

Los datos de ubicación, especies y precipitación fueron proporcionados al equipo de i-Tree para su revisión y validación. Se llevó a cabo un exhaustivo proceso de verificación para garantizar la precisión y confiabilidad de los datos, siguiendo los estándares y metodologías de i-Tree. Después de verificar la consistencia y coherencia de los registros, los datos fueron agregados exitosamente a la base de datos de i-Tree Eco. La revisión y validación garantizaron la calidad de los datos y su idoneidad para generar resultados significativos en el contexto de la ciudad de Tarija.

2.1.1.2. Etapa II: Obtención de datos dasométricos y de estructura del arbolado urbano

Los parámetros fueron medidos y estimados solo para individuos vivos con DAP \geq a 10 centímetros, recopilados por la aplicación Mobile Data Collection (MDC) en un teléfono Android para luego ser enviados al software de manera automática, por otro lado, también se procuró al uso de planillas establecidas por la guía de campo del software i-Tree Eco (Ver anexo 12), los cuales se describen a continuación:

2.1.1.2.1. Identificado del árbol (ID)

Se realizó la identificación con un número único para cada árbol de todo el arbolado censado.

2.1.1.2.2. Especie

Para la identificación de las especies forestales existen métodos de identificación como el método dendrológico, xilológico y botánico. Para el presente estudio se aplicó el método dendrológico-botánico, observando las diferentes características morfológicas de las especies en base a claves dicotómicas.

Las especies que resultaron difíciles de identificar, se procedió a tomar una muestra numerándola y registrándola de acuerdo a las normas, para luego ser llevada al Herbario de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Forestales de la U.A.J.M.S, para su posterior reconocimiento taxonómico en familia, género y especie.

2.1.1.2.3. Ubicación del árbol

Dentro de este criterio, se identificó si el árbol está localizado en la franja de la avenida, calle o en otro sitio.

2.1.1.2.4. Ubicación geoespacial

Se uso el colector de datos GPS de Mobile Data Collection (MDC) para ubicar automáticamente la posición geográfica en latitud y longitud (ver Anexo 10).

2.1.1.2.5. Estado/Condición

Se describió en base a su asociación del árbol, si es implantado o natural de semilla propia, principalmente a través de datos de censos e inventarios municipales. Los tres estados posibles de un árbol son: plantados (P), crecimiento interno (I) o desconocido (U). En futuros censos e inventarios de la misma parcela, solo los árboles nuevos se identificarán como P, I o U, recomendado hacer lo posible para identificar las clases P o I, con el fin de mejorar la precisión de los resultados.

2.1.1.2.6. Uso de Suelo

Se procedió a describir el uso de suelo en el cual se encuentra localizado el árbol, en función de las impresiones durante la colección de datos de campo (es decir, no de mapas de uso de la tierra).

Esta variable de datos describe cómo la tierra está siendo utilizada, que no es necesariamente la misma que la propiedad de la tierra. i-Tree Eco tiene 14 clases de uso de la tierra predeterminadas.

Se incluyen los siguientes tipos de uso de la tierra predeterminados:

- **Agricultura (A):** Tierras de cultivo, pastos, huertas, viñedos, viveros, alquerías y edificios relacionados, lotes de alimentación, pastizales y bosques/plantaciones que muestran evidencia de actividad de manejo para un cultivo específico o producción de árboles.
- **Cementerio (E):** Incluye cualquier área pequeña sin mantenimiento dentro de los terrenos del cementerio.
- **Comercial/Industrial (C):** Terreno que se utiliza para actividades comerciales, incluido el comercio minorista, servicios y negocios profesionales. También incluye usos industriales estándar de la tierra, tales como fabricación o procesamiento, y áreas de almacenamiento/escenario al aire libre, así como estacionamientos en áreas céntricas que no estén conectadas con un uso institucional o residencial.

- **Campo de golf (G):** Incluye terrenos completos, estén o no mantenidos.
- **Bosque (F):** La tierra que rodea la parcela debe tener al menos un 10% de cobertura de dosel y no estar sujeto a usos que impiden la regeneración y sucesión normal de los árboles, como siega, pastoreo intensivo o actividades recreativas. En algunos casos, las áreas con menos del 10 % de la cubierta de dosel puede calificar como bosque, si los árboles fueron talados, muertos o fueron de lo contrario, se eliminará, pero se espera que la tierra se regenere naturalmente hasta al menos un 10 % cubrir.
- **Institucional (I):** Incluye escuelas, hospitales/complejos médicos, colegios, edificios religiosos, edificios gubernamentales, etc.
- **Residencial multifamiliar (M):** Estructuras que contienen más de cuatro unidades residenciales.
- **Parque (P):** Incluye parques en áreas no desarrolladas (sin mantenimiento) así como en áreas desarrolladas áreas. (Nota: Los árboles o las parcelas en rodales arbolados se clasifican mejor como si estuvieran en el uso de suelo baldío.)
- **Residencial (R):** Estructuras independientes que sirven de una a cuatro familias.
- **Transporte (T):** Incluye caminos de acceso limitado y espacios verdes relacionados (como como carreteras interestatales con rampas de entrada y salida, a veces cercadas), así como vías férreas estaciones, vías y patios, astilleros, aeropuertos, etc.
(Nota: Si la parcela recae sobre cualquier otro tipo de camino, o franja mediana asociada, clasifique de acuerdo con el uso del suelo adyacente más cercano).
- **Servicios públicos (U):** Incluye instalaciones de generación de energía, instalaciones de tratamiento de aguas residuales, cubiertas y embalses descubiertos y áreas de retención de escorrentía de aguas pluviales vacías, control de inundaciones canales y conducción.
- **Baldío (V):** Incluye terrenos sin uso previsto claro.
(Nota: Edificios abandonados y las estructuras vacantes deben clasificarse en función de su uso previsto original).

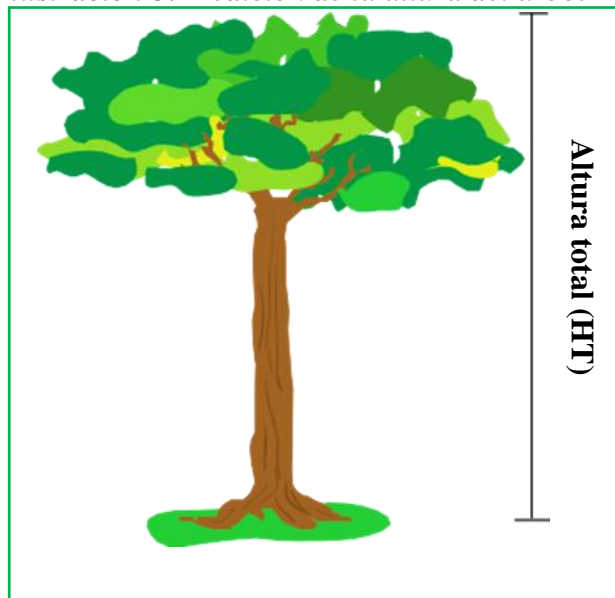
- **Agua/humedal (W):** Arroyos, ríos, lagos y otros cuerpos de agua, naturales o construido.
- **Otro (O):** Usos de la tierra que no caen en una de las categorías enumeradas. (Nota: esta designación debe usarse con moderación, ya que proporciona poca información útil para el modelo) (i-Tree Eco, 2022).

Por lo que, analizando el área de estudio se procedió a clasificar el uso de tierra, como Transporte (T), debido a que las franjas de jardinera se encuentran dentro de avenidas viales.

2.1.1.2.7. Altura total del árbol

Según Juárez (2014), es la altura correspondiente a la distancia vertical entre el suelo y el ápice del árbol.

Ilustración 3. Medición de la altura del árbol



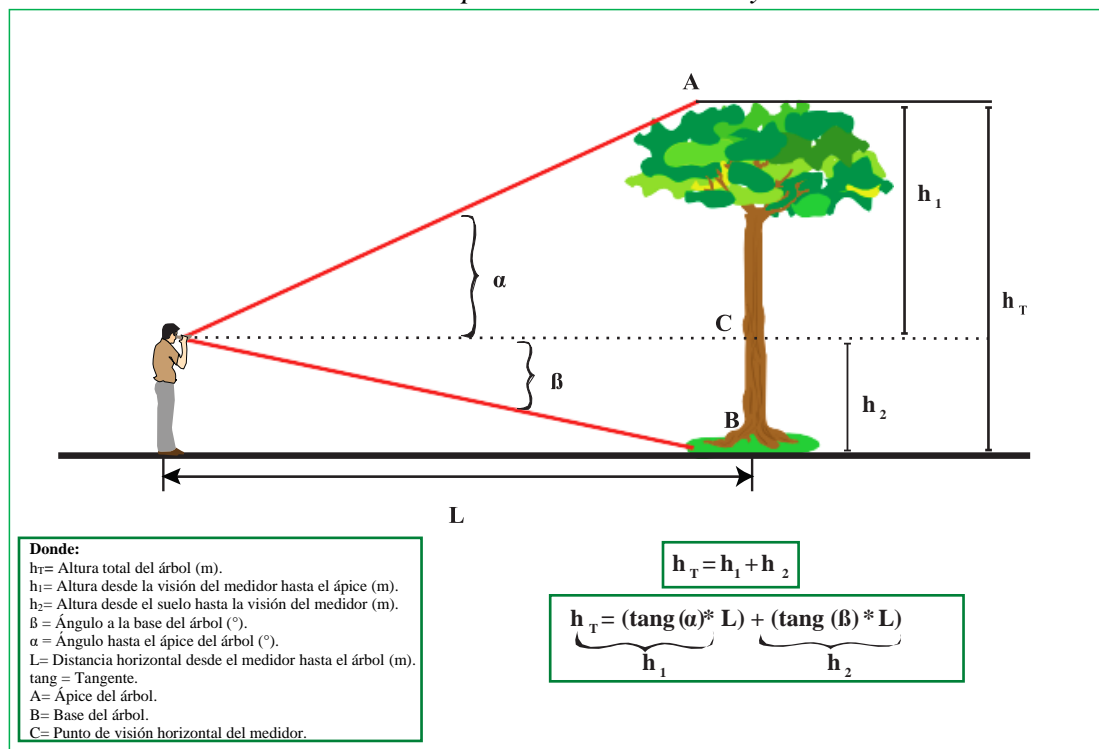
FUENTE: PGFC adaptado de (Gutiérrez, 2013).

Debido a la dificultad de emplear instrumentos de contacto o de medición directa como varas o reglas cuando las alturas sobrepasan los 8 a 10 metros, se usan principios geométricos y trigonométricos (Muller 199; Tischendorf, 1927) citado por (Prodan *et al.*, 1997).

Las mediciones se efectuaron en base al uso del hipsómetro de Blume – Leiss. Donde este instrumento mide el ángulo de elevación entre el operador y los puntos medidos. Las alturas de los árboles se leen directamente desde el dispositivo dependiendo de las distancias fijas de 15 m, 20 m, 30 m y 40 m. Para áreas montañosas, los factores de corrección de pendiente se pueden leer directamente desde el dispositivo dependiendo de la pendiente.

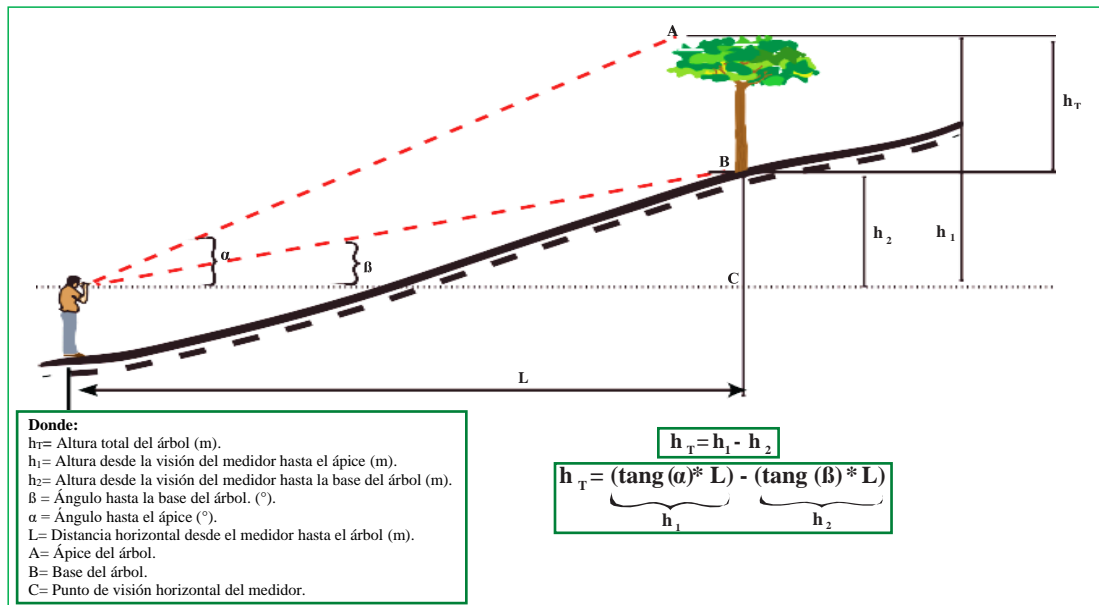
También se procedió a comparar las mediciones, con una aplicación de Android “Clinómetro Florestal”, el cual solo se requiere conocer la distancia horizontal hasta el árbol, para luego medir el ángulo en la base y el ápice, arrojando la altura total. A continuación, se muestran las diferentes formas de medir la altura dependiendo de la pendiente de terreno:

Ilustración 4. Visual del operador entre la cima y la base del árbol.



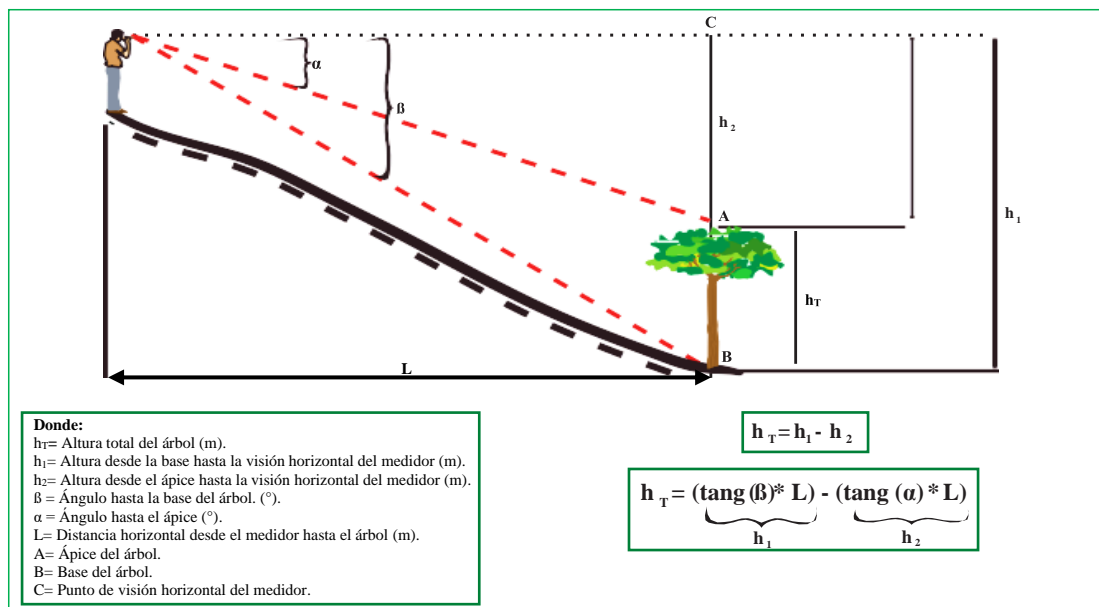
FUENTE: (Gutiérrez Á., 1977) adaptado de (Gutiérrez, 2013).

Ilustración 5. Visual del operador por debajo de la base del árbol.



FUENTE: (Gutiérrez Á., 1977) adaptado de (Gutiérrez, 2013).

Ilustración 6. Visual del operador por encima del ápice del árbol.

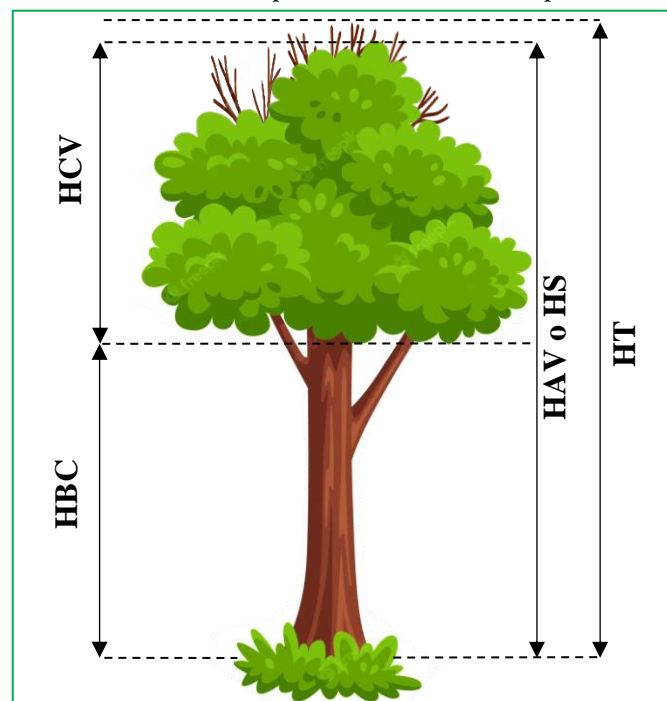


FUENTE: (Gutiérrez Á., 1977) adaptado de (Gutiérrez, 2013).

2.1.1.2.8. Dimensiones de copa

- a) **Altura del árbol vivo (HAV):** Es la longitud desde el suelo hasta la copa viva del árbol. Esta altura será la misma que la altura total del árbol, a menos que el árbol esté vivo. Si la parte superior de la copa esté muerta, la altura del árbol vivo no puede ser mayor que la altura total del árbol.
- b) **Altura superior (HS):** Es la longitud igual que la altura del árbol vivo (HAV), son estos datos que se usaron como entrada para la modelación. Esta altura puede ser \leq la altura total del árbol, pero nunca mayor (i-Tree Eco, 2022).
- c) **Altura de la copa viva (HCV):** Es la longitud desde la base de la copa hasta la altura de ápice del árbol vivo (i-Tree Eco, 2022).
- d) **Altura a la base de la copa viva (HBC):** Es la longitud desde el suelo hasta la base de la copa viva. La base de la copa viva es el punto en el tronco principal perpendicular al follaje vivo más bajo en la última rama que se incluye en el vivo de la copa. La copa viva está determinada por el follaje vivo y no por el punto donde una rama se cruza con el tronco principal (i-Tree Eco, 2022).

Ilustración 7. Variables para la medida de copa de un árbol



FUENTE: Elaboración propia, imágenes de Pngtree y Freepik (Adaptado).

2.1.1.2.9. Diámetro de copa

Para determinar el diámetro de copa (D_c), se realizaron mediciones del ancho de la copa en dos direcciones: norte-sur (N/S) y este-oeste (E/W). Utilizando una cinta métrica, se midieron ambas distancias proyectándolas debajo de la copa, de manera perpendicular al eje del árbol y en un ángulo de 90° . En caso de que el árbol estuvo caído o inclinado, se tomó la medida perpendicular al tronco. Para calcular el diámetro medio de copa (D_c), se utilizó la siguiente fórmula:

$$D_c = \frac{(D_c N/S + D_c E/W)}{2}$$

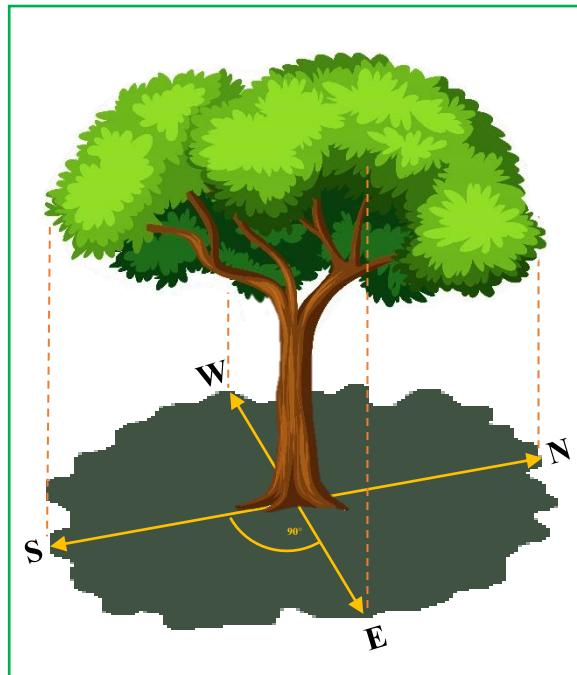
Donde:

D_c = Diámetro medio de copa

D_c N/S = Ancho de copa en dirección norte-sur

D_c E/W = Ancho de copa en dirección este-oeste

Ilustración 8. Toma de medidas para el diámetro de copa.



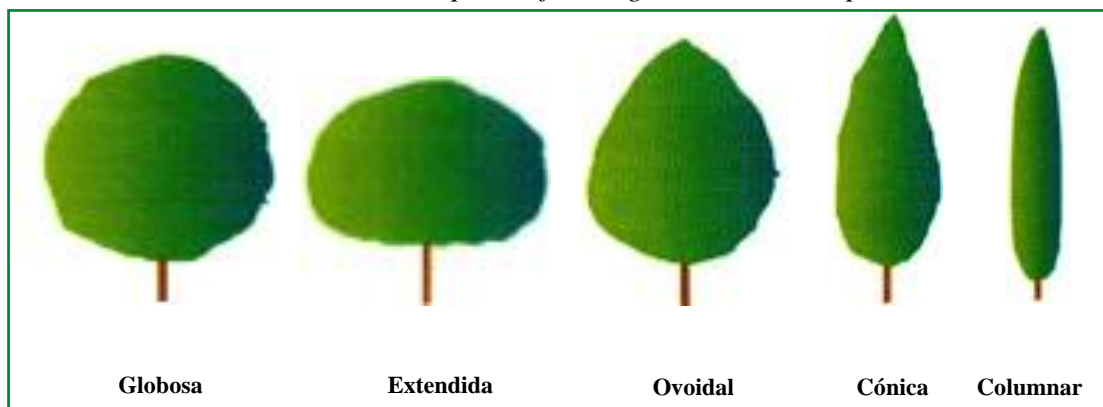
FUENTE: *Elaboración propia, imagen de Freepik (Adaptado).*

2.1.1.2.10. Forma geométrica de la copa

La forma de la copa del árbol se ve influenciada por diversos factores, como la especie del árbol, las condiciones ambientales en las que se desarrolla, su edad y tamaño. Puede presentar diversas formas geométricas, como cónica, esférica o irregular, entre otras. Comprender la forma de la copa resulta útil para llevar a cabo labores de poda y mantenimiento, así como para planificar el crecimiento y desarrollo del árbol. La forma de la copa está determinada principalmente por las condiciones de sombra en las que el árbol crece, lo que se conoce como competencia. Se considera que un árbol tiene una copa equilibrada cuando ocupa al menos un tercio de su altura total. La aplicación de técnicas adecuadas de poda puede contribuir a mantener una copa equilibrada y promover un crecimiento saludable.

Durante la evaluación de los árboles, resultaba necesario conocer la forma geométrica específica de cada especie para poder estimar de manera precisa el porcentaje de dosel faltante y evaluar el estado fitosanitario de la copa, ya sea en términos de porcentaje de ramas muertas o su condición general. Además, la forma de la copa tenía un impacto significativo en la capacidad del árbol para capturar la luz solar, lo que determinaba la exposición de la copa a la radiación solar. Esta información resultó fundamental para comprender la vitalidad del árbol y su capacidad para llevar a cabo la fotosíntesis de manera eficiente.

Ilustración 9. Tipos de forma geométrica de copa



FUENTE: Adaptado de Moglia, 2006.

2.1.1.2.11. Dosel faltante

Consiste en estimar el porcentaje del volumen de la copa que no está ocupado por ramas y hojas. La copa faltante se estimó tomando dos medidas de pie en ángulos perpendiculares al árbol, para luego sacar un promedio. Se visualizó el "contorno típico de la copa" esperado como una silueta creada por la copa viva, medidas de ancho, altura total y altura hasta la base de la copa viva (i-Tree Eco, 2022).

Imaginando que la silueta se encuentra como una copa simétrica formada alrededor del punto central del ancho medido del árbol y llena con hojas como si fuera un árbol sano en excelente estado, luego se procedió a estimar el porcentaje de follaje que está ausente debido a la poda, muerte regresiva, defoliación, copa desigual u hojas enanas o escasas, tomando en cuenta que esto no incluye los vacíos interiores normales de la copa debido al sombreado de las hojas y que la forma de la copa es variable geoméricamente para todas las especies.

Para tener una referencia, 0% sería una copa llena o saludable y un 100% representa una copa muerta o con una alta incidencia de daños y deterioro debido a la poda u otros factores.

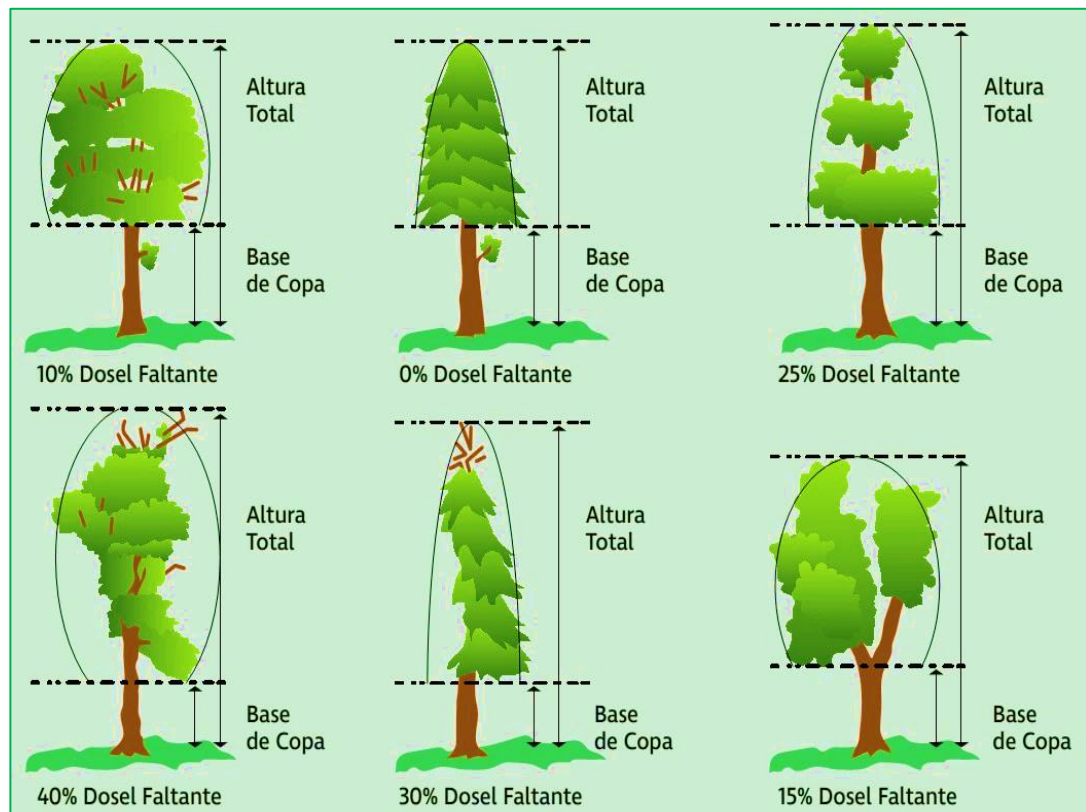
Para garantizar la precisión, según las recomendaciones de la guía de campo de i-Tree, en cuanto a la distancia del árbol, se intentó mantenerse al menos a la mitad de la longitud de la altura total del árbol que está siendo evaluado. Todas las evaluaciones se realizaron a nivel (la misma elevación que la base del árbol) o pendiente arriba del árbol, recomendando nunca evaluar los árboles desde el lado de la pendiente descendente. Para la vista de la copa y toma de las dos estimaciones, se posó en un ángulo de 90° de separación en superficie plana. por lo que, en áreas con mayores cubiertas de dosel, se vuelve algo complicado obtener una buena perspectiva.

Por otro lado, durante la defoliación intensa, se puede sobrestimar la muerte regresiva de la copa. El uso de binoculares puede ayudar en la separación de ramitas muertas de ramitas deshojadas.

Las condiciones climáticas también influyen, por lo que, los cielos nublados, la niebla, la lluvia y los malos ángulos del sol pueden afectar las estimaciones. Recomendando moverse alrededor del árbol para obtener otra vista, incluso si la vista parece adecuada en un momento dado.

Las enredaderas en la copa del árbol no se tomaron como un agregado al área foliar durante la estimación del dosel faltante y porcentaje de muerte regresiva, lo cual no se tiene que medir como si fuera copa, por otro lado, los brotes epicórmicos fueron manejados en base a los siguientes métodos: la primera opción es no considerar los brotes epicórmicos como parte de la base de la copa viva (si se encuentran debajo de la base de la copa de las ramas reales). El follaje que producen los epicórmicos para el árbol se consideraría para el porcentaje de dosel faltante, proporcionalmente disminuyendo la cantidad de porcentaje de dosel faltante (i-Tree Eco, 2022).

Ilustración 10. Medición de copa faltante.



FUENTE: (i-Tree Eco, 2022), adaptado de (Barra, 2019).

2.1.1.2.12. Salud de la copa

La salud de la copa se basa en una evaluación fitosanitaria visual de la cantidad de ramas muertas en la copa de un árbol y se puede estimar como muerte regresiva o condición (i-Tree Eco, 2022).

Para registrar la muerte regresiva, se estimó el porcentaje de la copa que se compone de ramas muertas, el cual tiene un valor de 0% significa que es excelente y 100% que el árbol está muerto y la condición de copa es la inversa de muerte regresiva, es decir, que un 100% indica un árbol en condiciones excelentes y 0% un árbol muerto. i-Tree Eco tiene 22 muertes regresivas predeterminadas o clases de condición.

Tabla 7. Rangos de clasificación de la salud de copa

Id	Descripción	Muerte regresiva (%)	Condición (%)
1	Excelente	0	100
2	Buena	10	90
3	Aceptable	25	75
4	Mala	50	50
5	Crítica	75	25
6	Muriendo	99	1
7	Muerto	100	0

FUENTE: i-Tree Eco, 2022.

Fórmula para el cálculo de muerte regresiva (MR):

$$\text{Muerte regresiva (\%)} = 100 \% - \text{Condición (\%)}$$

FUENTE: i-Tree Eco, 2021.

Fórmula para el cálculo de condición de copa (C):

$$\text{Condición (\%)} = 100 \% - \text{Muerte regresiva (\%)}$$

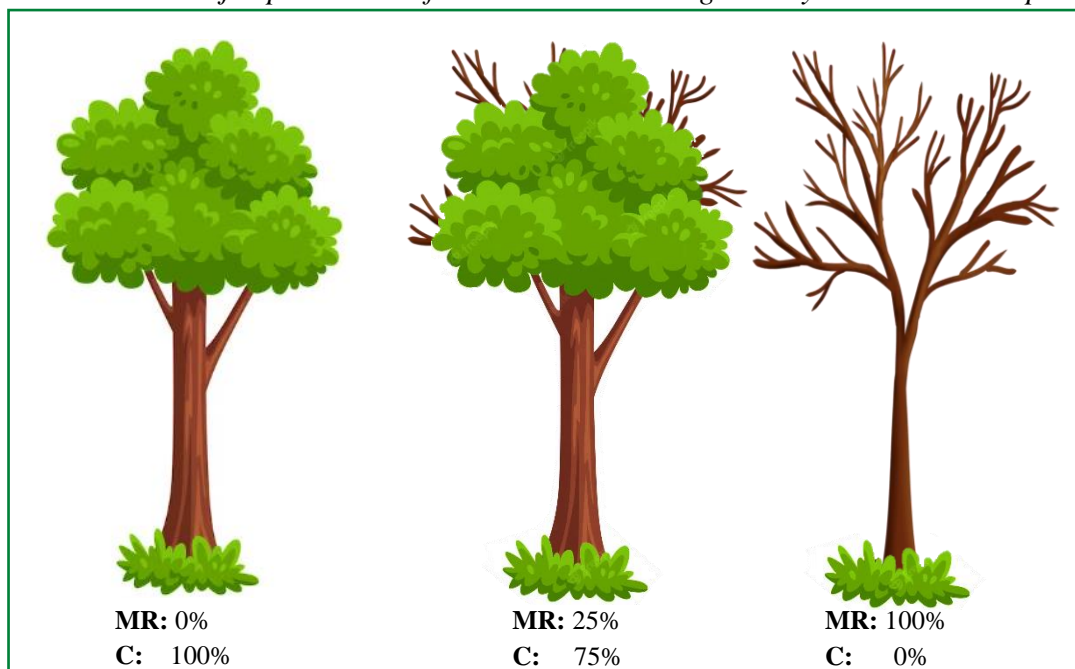
FUENTE: i-Tree Eco, 2021.

Por ejemplo, si se estima un 15% de muerte regresiva la condición será del 85% ($100\% - 15\% = 85\%$).

El porcentaje de muerte regresiva no incluye la muerte regresiva normal y natural de las ramas, es decir, la autopoda debido a la competencia de copas o sombreado en la parte inferior de la copa (i-Tree Eco, 2022). Sin embargo, la muerte regresiva de las ramas en los costados y en la parte superior del área de la copa debido a la sombra de un edificio o de otro árbol estarían incluidos. Se suponió que el perímetro de la copa es un contorno bidimensional desde la base hasta el ápice de la copa, excluyendo los enganches, ramas y grandes agujeros o huecos en la copa, donde se dibujó mentalmente un contorno de copa bidimensional, bloqueando la muerte regresiva y para luego estimar la misma.

Se recomienda tomar dos estimaciones promediadas, teniendo en cuenta las condiciones de iluminación y cómo la luz afecta las observaciones del día, tomándose un tiempo adicional en condiciones de luz limitada (i-Tree Eco, 2022).

Ilustración 11. Ejemplos de clasificación de muerte regresiva y condición de copa.

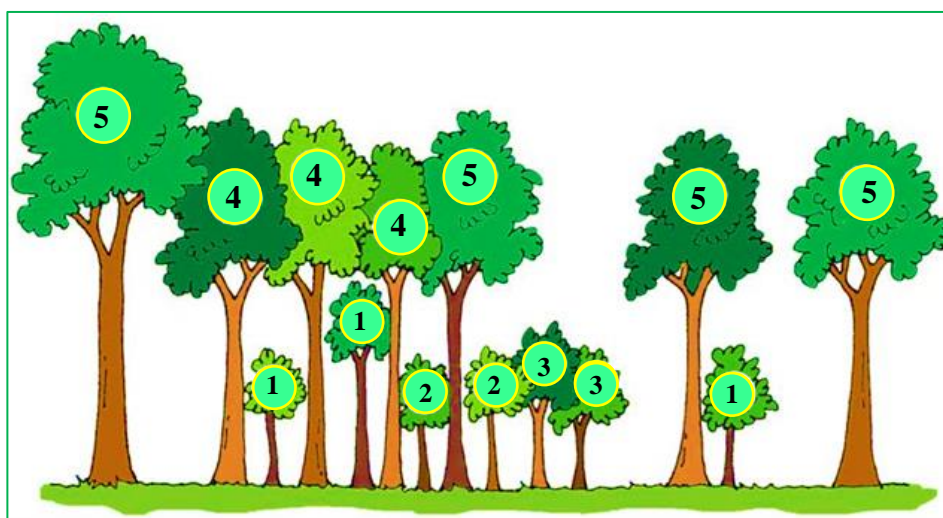


FUENTE: Elaboración propia, imágenes de Freepik y Pngtree (Adaptado).

2.1.1.2.13. Exposición de copa a la luz solar

Se determinó el número de lados del árbol que reciben luz solar, asumiendo que el sol estuviera directamente encima del árbol. Se dividieron la copa del árbol en cuatro lados iguales y se contó la cima del árbol como un quinto lado. De estos cinco lados, se calificaron solo aquellos donde al menos una tercera parte recibió luz plena. No se calificó el lado que recibió solo una mínima parte de luz.

Ilustración 12. Ejemplos de grados de exposición de la copa hacia la luz solar



FUENTE: Adaptado de (Molina, 2019).

Tabla 8. Valoración de los árboles según los lados por los que recibe luz solar

Valor	Descripción
0	El árbol no recibe luz plena por estar sombreado por otros árboles, enredaderas, edificios u otros.
1	El árbol recibe luz plena del lado superior o un lateral.
2	El árbol recibe luz plena del lado superior y un lateral o solo dos lados laterales.
3	El árbol recibe luz plena del lado superior y dos laterales o tres lados.
4	El árbol recibe luz plena del lado superior y tres laterales.
5	El árbol recibe luz plena por todos sus lados.
-1	Árbol muerto.

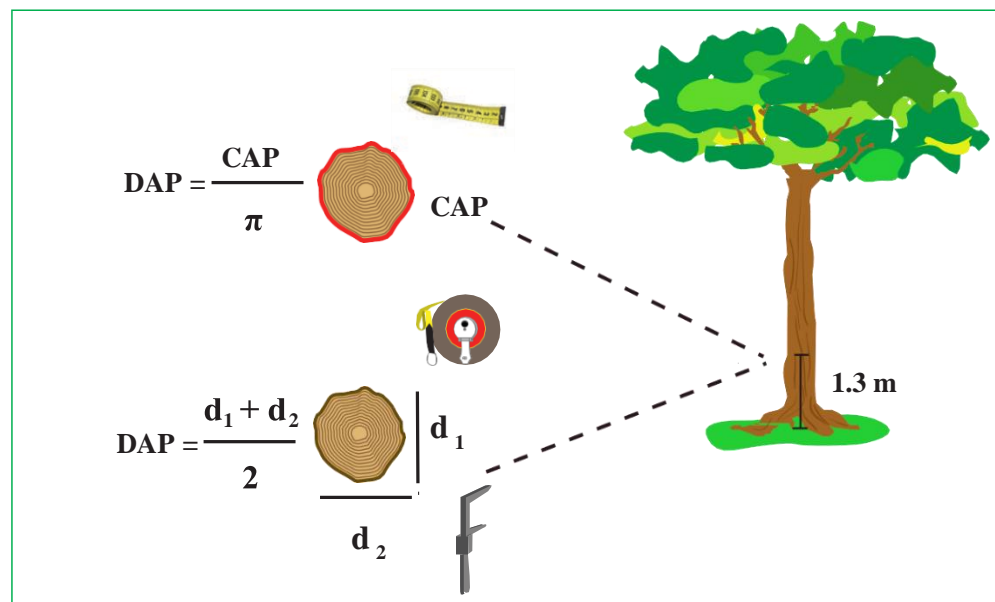
FUENTE: (i-Tree Eco, 2022).

2.1.1.2.14. Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)

El Diámetro Normal (d) o Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) del árbol se midió a 1,3 metros sobre el nivel del suelo, dependiendo del tipo de terreno y la forma del fuste, mediante el uso de la forcípula finlandesa la consiste en un brazo recto y otro parabólico, graduado de forma tal que el diámetro se puede leer directamente en el punto de contacto de árbol, esta se usó para árboles con troncos irregulares, tomando dos mediciones a 90° del eje del fuste, el DAP se estimó en base al promedio de estas mediciones.

También se procuró al uso del flexómetro, ya que es un instrumento de fácil transporte y de comprobación de estado, el amplio rango de dimensiones para las cuales es útil y la precisión con que permite efectuar las mediciones (Prodan *et al.*, 1997), el cual arroja dato de Circunferencia a la Altura del Pecho (CAP), donde para convertir en DAP se hizo la división entre la constante pi ($\pi = 3,1416$). Solo se utilizó este instrumento para secciones de fuste circulares, debido a que, en secciones contrarias, sobreestima sistemáticamente el diámetro.

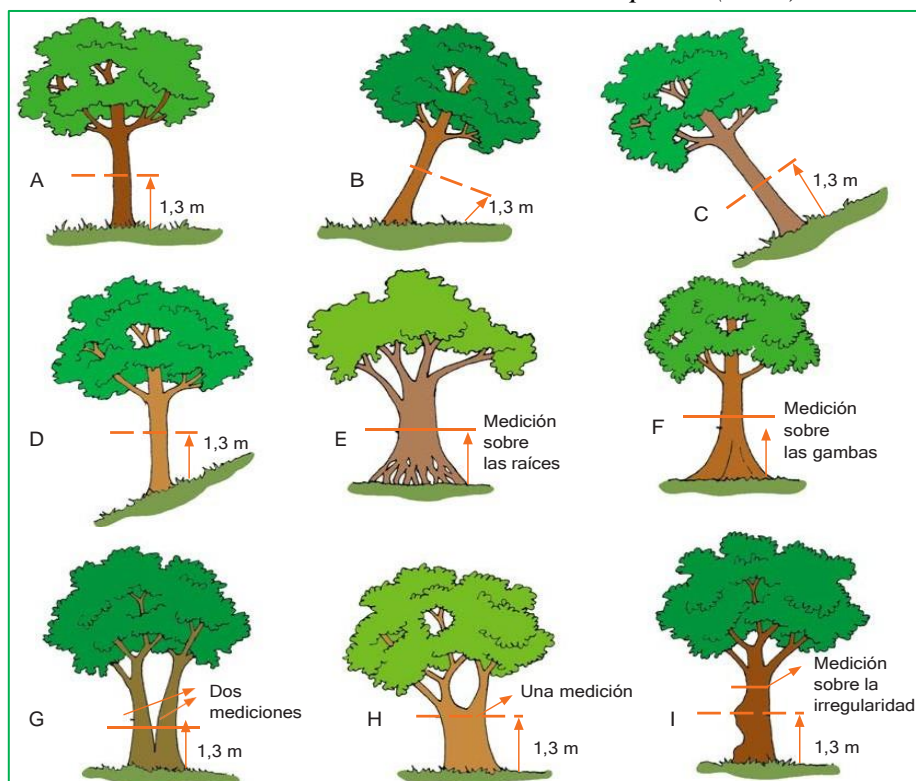
Ilustración 13. Medición del Diámetro a la Altura de Pecho (DAP) a 1,3 metros



FUENTE: PGFC adaptado de (Gutiérrez, 2013).

Casos especiales de medición del Diámetro a la Altura del Pecho (DAP)

Ilustración 14. Medición del diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles



FUENTE: Adaptado de (Molina, 2019).

- ✓ **Árbol en planicie (A):** Uno de los casos generales, se tomó las medidas a 1,3 metros, de cualquier de los lados del tronco del árbol.
- ✓ **Árbol inclinado en planicie (B):** Se tomó la medida el diámetro a 1,3 metros del suelo a lo largo del tronco, tomando la medida ubicándose por debajo de la base en la que se inclina el árbol, formando un ángulo.
- ✓ **Árbol inclinado en pendiente (C):** Para estos casos se mensuró el DAP a 1,3 metros, ubicando por encima de la base del árbol.
- ✓ **Árbol recto en pendiente (D):** En este caso se mensuró el DAP a 1,3 metros, ubicando por encima de la base del árbol.
- ✓ **Árbol con raíz aérea (E):** La medición del diámetro se realizó a 1,3 metros, a partir del límite entre el tronco y las raíces.

- ✓ **Árboles con la base del tronco ensanchada o árbol con contrafuertes (F):** La medición del diámetro se realiza a 30 centímetros por encima del ensanche, gamba, cuello de botella o anchura principal de los contrafuertes, si el contrafuerte/ensanche llega más arriba de 90 centímetros de altura sobre el terreno (FAO, 2004).
- ✓ **Árbol con bifurcaciones o con múltiples tallos (G - H):**
 - Si la bifurcación comienza por debajo de 1,3 metros de altura teniendo cada tronco el diámetro requerido será considerado como un árbol. La medición del diámetro de cada tronco se tomó a 1,3 metros de altura.
 - Si la bifurcación comienza entre 30 centímetros y 1,3 metros, se consideró cada tronco como un árbol independiente y se mensuró en consecuencia, a 1 metro por encima del origen de la horquilla.
 - Si la horquilla comienza a 1,3 metros o un poco más arriba, el árbol se contó como uno solo, midiendo por debajo del punto de intersección de la horquilla, justo debajo de la protuberancia que podría influir en el DAP (FAO, 2004).
 - Según i-Tree Eco, si el árbol tiene más de seis tallos con DAP ≥ 1 pulgada, se baja la altura de medición a 1 pie sobre el suelo y se registró el diámetro de hasta seis tallos (seleccionando el más grande e ignorando cualquier otro).
- ✓ **Árboles con tronco irregular situados a 1,3 metros (I):** Los árboles con protuberancias heridas, huecos y ramas, etc. a la altura del pecho, fueron medidos justo por encima del punto irregular, allí donde la forma irregular no afecte al tronco (FAO, 2004).
- ✓ **Árbol vivo derribado por el viento:** Se mensuró desde la parte superior del cuello de la raíz a lo largo de 1,3 metros (i-Tree Eco, 2022).

2.1.1.3.Etapa III: Cuantificación y Evaluación de Servicios, Beneficios y Valores Ecosistémicos.

Esta etapa consistió en evaluar la estructura del arbolado urbano, cuantificar y evaluar los servicios, beneficios y valores ecosistémicos que proporcionan los árboles. Se llevó a cabo a través de una serie de cálculos y análisis que permitieron estimar los beneficios y valores ecosistémicos.

2.1.1.3.1. Estimación y cálculo de variables de estructura secundarias

Las variables estructurales secundarias derivadas por el software i-Tree Eco, son:

2.1.1.3.1.1.Cobertura arbórea

Eco determinó la cobertura arbórea para cada especie en base al diámetro de copa, con la siguiente fórmula:

$$Ca = \sum \frac{\pi}{4} \frac{((NS) + (EW))^2}{10000}$$

Donde:

Ca= Cobertura arbórea (has)

(NS): Longitud de la copa en dirección cardinal de norte a sur (m)

(EW): Longitud de la copa en dirección cardinal de este a oeste (m)

2.1.1.3.1.2.Área basimétrica

Eco determinó el AB para cada especie en base a DAP, con la siguiente fórmula.

$$AB = \sum \frac{\pi}{4} \left(\frac{DAP}{100}\right)^2$$

Donde:

AB= Área basimétrica (m²)

DAP= Diámetro a la Altura del Pecho (cm)

2.1.1.3.1.3. Área foliar e índice de área foliar

El área foliar es la cantidad de área superficial (haz) de las hojas en un árbol, arbusto u hierba. El área foliar acumulada en el dosel de un bosque urbano es una variable importante que influye estimaciones de biomasa, eliminación de la contaminación del aire, almacenamiento y secuestro de carbono, y otros servicios de ecosistema, por lo que, esta medida se “amplía” para cubrir todo el bosque urbano (Nowak D. J., 2021) i-Tree Eco, calcula el área foliar de árboles individuales de crecimiento abierto, mediante la siguiente regresión (Nowak 1996), citado por (Nowak D. J., 2021):

$$\ln Y = -4,3309 + 0,2942HCV + 0,7312Dc + 5,7217S + -0,0148C$$

Dónde:

Y es el área foliar (m^2), HCV es la altura de la copa viva (metros), Dc es el diámetro promedio de la copa (metros), S es el factor de sombreado promedio para las especies individuales (porcentaje de intensidad de luz interceptado por copas de árboles foliadas (ver datos **Apéndice 3**, dirigirse al enlace proporcionado después del Índice en Apéndices) y C se basa en el área de la superficie exterior de la copa del árbol, en base a la siguiente fórmula: $(\pi Dc (HCV+Dc) /2)$.

El área foliar por unidad de superficie del suelo proyectada se conoce como índice de área foliar (LAI), calculado en base a la siguiente ecuación (Nowak D. J., 2021):

$$LAI = \frac{\text{Área foliar (m}^2\text{)}}{\text{Área del terreno (m}^2\text{)}}$$

Para una evaluación de la población de árboles, se calcularon dos tipos de índices de área foliar:

- 1) **LAIp:** El área foliar de la población total dividida por el tamaño total del área de estudio.
- 2) **LAIc:** El área foliar estandarizada por unidad de cobertura arbórea: $LAIc = LAIp /$ porcentaje de cobertura arbórea (Nowak D. J., 2021).

2.1.1.3.1.4. Biomasa foliar

El peso de las hojas secas, conocido como biomasa foliar, proporciona información valiosa sobre el crecimiento y la salud de los árboles urbanos, lo que permite desarrollar estrategias adecuadas para su cuidado y manejo.

i-Tree Eco calculó a partir de las estimaciones del área foliar utilizando factores de conversión específicos de la especie (ver en **Apéndice 4**, dirigirse al enlace proporcionado después del Índice en Apéndices) y los factores de biomasa de hojas o densidad, para especies individuales (i-Tree Eco, 2022; Nowak D. J., 2021).

2.1.1.3.1.5. Biomasa arbórea

La biomasa (unidad de materia orgánica) de peso seco total para cada árbol medido. i-Tree Eco calculó usando ecuaciones alométricas (ver en **Apéndice 10**, dirigirse al enlace proporcionado después del Índice en Apéndices) predispuestas en el software para cada especie en particular, en base a datos de todas las mediciones y estimaciones de variables en campo, conjuntamente con datos de densidad de madera seca, derivadas de Global Wood Density Database (Chave et al., 2005; McPherson, 1991), (ver datos en **Apéndice 11**, dirigirse al enlace proporcionado después del Índice en Apéndices).

Si se están utilizando múltiples ecuaciones que no están alineadas con la realidad, se pueden utilizar las especies que se midieron, las densidades de madera de esas especies reales y las ecuaciones de las especies que se usaron para estimar la biomasa. Para calcular la biomasa arbórea estimada, se basó en la siguiente fórmula:

$$BA = \frac{Biom eq * WDspp}{WDeq}$$

Dónde:

BA = Biomasa arbórea estimada (kg)

Biom eq = Estimaciones de biomasa derivadas de ecuaciones (kg)

WDspp = Densidad de la madera de la especie medida (ton/m³)

WDeq = Densidad media de la madera a partir de las ecuaciones del carbono (ton/m³)

Los árboles mantenidos y de crecimiento abierto tienden a tener menos biomasa aérea que la predicha por las ecuaciones de biomasa derivadas del bosque para árboles del mismo DAP (Nowak 1994b). Para ajustar esta diferencia, los resultados de biomasa para árboles abiertos con un valor de exposición a la luz de la copa de 4-5 se multiplicaron por un factor de 0,8 (Nowak 1994b) citado por (Nowak D. J., 2021).

Dado que los árboles de hoja caduca pierden sus hojas anualmente, solo se calcula el carbono almacenado en la biomasa de madera para estos árboles. Al no encontrar una ecuación de biomasa para una especie individual, se utilizó el promedio de los resultados de las ecuaciones del mismo género. Si no existen coeficientes de género, entonces se utilizó el promedio del siguiente nivel filogenético según esté disponible (Nowak D. J., 2021). Las estimaciones de los nutrientes de las hojas y los valores asociados con la caída anual de las hojas se calculan con base en los métodos detallados en Nowak et al. (2019) citado por (Nowak D. J., 2021).

2.1.1.3.2. Diversidad y gama de especies de árboles

2.1.1.3.2.1. Valor de importancia

La ecuación utilizada para calcular el valor de importancia (VI) de cada especie de árbol se basa en i-Tree Eco, donde representa la suma de su contribución a la población total de árboles y al área foliar. Esta medida permitió evaluar la relevancia de cada especie del arbolado arbóreo.

$$VI = \left(\frac{IS}{NTI} * 100 \right) + \left(\frac{AFS}{AFT} * 100 \right)$$

Donde:

VI= Valor de importancia de la especie

IS = Número de individuos por especie

NTI= Número total de individuos de todas las especies

AFS = Área foliar de la especie

NTI= Área foliar total de los individuos de todas las especies

2.1.1.4. Determinación y valoración de los servicios ecosistémicos

Para valorar los servicios ecosistémicos que brinda el arbolado en el área de estudio actual, se utilizó la herramienta i-Tree Eco, que permitió estimar el secuestro y almacenamiento de carbono, la producción de oxígeno, los efectos hidrológicos y la producción de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVBs) que estos árboles proporcionan.

2.1.1.4.1. Almacenamiento y secuestro de carbono

Para la estimación del almacenamiento y secuestro anual de carbono, i-Tree Eco utilizó datos sobre la especie de árbol, biomasa, diámetro a la altura del pecho, altura total del árbol, la muerte regresiva de la copa y la exposición de la copa a la luz. De esta manera, se pudo evaluar el papel que los árboles juegan en la eliminación del dióxido de carbono de la atmósfera y su almacenamiento, lo que es esencial para el bienestar del medio ambiente y el mantenimiento del equilibrio climático. i-Tree Eco estimó el almacenamiento de carbono, en base a la siguiente ecuación (Nowak D. J., 2021):

$$CA = BA * 0,5$$

Dónde

CA = Carbono estimado (kg)

BA = Biomasa arbórea estimada (kg)

0,5= Contante, aludiendo que el 50% de la biomasa del árbol es carbono

Para evitar la sobreestimación del almacenamiento de carbono para árboles muy grandes, la captura total de carbono se limitó a un máximo de 40 kg de C/cm de DAP en crecimiento una vez que un árbol alcanza los 7500 kg de carbono en i-Tree Eco. Al estimar el secuestro bruto anual de carbono, el DAP se incrementa progresivamente en el modelo basado en una tasa de crecimiento anual estimada. El almacenamiento de carbono en el año actual (año 0) se contrastó con el almacenamiento de carbono en el próximo año (año 1) para estimar el secuestro anual (Nowak D. J., 2021).

Valoración económica de carbono

La valoración del almacenamiento y secuestro de carbono se realizó teniendo en cuenta el costo social del carbono, el cual fue establecido por el Grupo de trabajo interinstitucional sobre el costo social del carbono en 2016. El costo social del carbono es una medida del daño económico global causado por el aumento de un contaminante como el CO₂ en un año específico. El valor actual del CO₂ equivalente, se estima en \$51,23 por tonelada, basado en los costos sociales del carbono de 2020 con una tasa de descuento del 3% para reflejar los dólares de 2018, según el Grupo de trabajo interinstitucional sobre el costo social del carbono de 2016 (Nowak D. J., 2021).

Debido a que en Bolivia no existe un precio estandarizado para la tonelada de carbono, el valor utilizado en este caso fue asociado según el Grupo de trabajo interinstitucional, basado en los pesos moleculares del dióxido de carbono y el carbono. Este valor equivale a **13,98 dólares por tonelada de carbono**, lo que se traduce en **97,44 pesos bolivianos** (se determinó en este valor ya que así lo requiere el software i-Tree Eco y no en valor de dólares (\$)). Es importante mencionar que este valor está sujeto a cambios según la oferta y la demanda en el mercado.

2.1.6.3.4.2. Absorción de dióxido de carbono (CO₂)

La absorción de dióxido de carbono equivalente al secuestro de carbono, ya que un bono de carbono equivale a una tonelada de CO₂ eliminado, se puede calcular utilizando factores de conversión estándar que convierten las emisiones de otros gases de efecto invernadero (GEI) a su equivalente en CO₂. Por lo que por fines prácticos se determinó en base a la siguiente ecuación, modificada de (Nowak D. J., 2021):

$$CO_2A = CA * \left(\frac{44,01}{12,0} \right)$$

Dónde

CO₂A = Dióxido de carbono absorbido (kg)

CA = Carbono almacenado estimado (kg)

3,67 = Relación entre el peso molecular del CO₂ (44,01 g/mol) y C (12,01 g/mol).

2.1.1.4.2. Producción de oxígeno

A medida que los árboles capturan dióxido de carbono durante el proceso de fotosíntesis, emiten oxígeno. Asimismo, cuando se libera dióxido de carbono a través de la descomposición, se consume oxígeno. Las estimaciones de producción de oxígeno se relacionan directamente con las estimaciones de secuestro de carbono, en base a datos de especies arbóreas, DAP, altura total y muerte regresiva.

La cantidad de oxígeno producido se estima a partir del secuestro de carbono en función de los pesos atómicos, modificado de (Nowak D. J., 2021):

$$O_2 = C * \left(\frac{31,9988}{12,01} \right)$$

Donde:

O_2 = Liberación neta de oxígeno molecular (kg/año)

C = Secuestro neto de carbono (kg/año)

2,67 = Relación entre el peso molecular del O_2 (31,9988 g/mol) y C (12,01 g/mol)

Valoración económica

Según i-Tree, el valor de la producción de oxígeno de los árboles se estima en **\$0/tonelada**. Esto se debe a que la cantidad de oxígeno en la atmósfera es muy grande, representando alrededor del 21% del volumen total de la atmósfera, y también porque se cree que las especies de algas marinas son las principales productoras de oxígeno en el mundo, reemplazando alrededor del 90% del oxígeno utilizado. Por lo tanto, aunque los árboles producen cantidades significativas de oxígeno, su contribución no es considerada un beneficio ecológico significativo. Además, es importante recordar que la producción de oxígeno de los árboles no es su función principal en el ecosistema, sino más bien el almacenamiento y la eliminación del dióxido de carbono. En consecuencia, el valor ecológico de los árboles se mide principalmente en términos de su capacidad para reducir los efectos del cambio climático mediante la captura de carbono y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (Nowak D. J., 2021).

2.1.1.4.3. Eliminación de contaminantes atmosféricos

En el presente estudio, se enfocó específicamente en los contaminantes atmosféricos como el material particulado de 2,5 micras ($PM_{2.5}$), ozono (O_3) y dióxido de nitrógeno (NO_2), debido a la falta de disponibilidad de datos para otros contaminantes como desóxido de azufre (SO_2) y monóxido de carbono (CO). Como se mencionó en la primera etapa, se obtuvieron datos de sensores satelitales para complementar la información necesaria. Aunque la investigación se centró en estos tres contaminantes específicos, se considera que proporcionan una representación significativa de la calidad del aire en el área de estudio. La ausencia de datos para otros contaminantes no afecta la validez de los resultados obtenidos para $PM_{2.5}$, O_3 y NO_2 . Ya que i-Tree Eco analiza todos los contaminantes atmosféricos antes citados.

La eliminación de contaminantes, o el flujo descendente de contaminantes (F) se calcula de la siguiente manera (Nowak D. J., 2021):

$$F = Vd * C$$

Donde:

Vd representa la velocidad de deposición (en m/s), y C representa la concentración del contaminante (en g/m^3). La velocidad de deposición (Vd) se calcula utilizando la siguiente fórmula (Baldocchi *et al.*, 1987), citado por (Nowak D. J., 2021):

$$Vd = 1 / (Ra + Rb + Rc)$$

Donde:

Ra representa la suma de los efectos de la capa límite aerodinámica, Rb representa los efectos de la capa límite cuasi-laminar, y Rc representa las resistencias del dosel vegetal.

Las estimaciones horarias de Ra y Rb se obtienen utilizando fórmulas estándar de resistencia (Killus *et al.*, 1984; Nowak *et al.*, 1998; Pederson *et al.*, 1995) citado por (Nowak D. J., 2021) y datos meteorológicos horarios. Es importante tener en cuenta que los efectos de Ra y Rb son relativamente pequeños en comparación con los efectos de Rc , que representan las resistencias del dosel vegetal.

Los límites de eliminación total de árboles para O₃ y NO₂, i-Tree Eco estimó utilizando el rango típico de velocidades de deposición seca en las hojas publicadas (Lovett 1994) citado por (Nowak D. J., 2021). La capacidad de los árboles individuales para eliminar contaminantes se estima para cada clase de diámetro utilizando la fórmula (Nowak 1994a) citado por (Nowak D. J., 2021):

$$Ix = Rt x (LAx / LA_t)$$

Donde:

I_x = eliminación de contaminantes por el árbol individual x (kg), R_t = contaminantes totales eliminados por todos los árboles (kg), L_{Ax} = área total de las hojas del árbol x (m²) y L_{At} = área total de las hojas de todos los árboles (m²).

Esta fórmula proporciona una estimación de la eliminación de contaminantes por árboles individuales basada en el área superficial de las hojas (LA), que es la principal superficie para la eliminación de contaminantes.

Valoración económica

La valoración económica de la eliminación de la contaminación i-Tree Eco lo realizó de dos maneras:

- **Valores de externalidad:** Estos valores representan el costo estimado de la contaminación para la sociedad que no se refleja en el precio de mercado de los bienes o servicios que generaron la contaminación. i-Tree Eco utiliza estimaciones de valores de externalidad para evaluar el CO, y estos valores se actualizan según el índice de precios al productor (Nowak D. J., 2021).
- **Valores de salud:** i-Tree estima el número de incidentes evitados y el valor monetario total de varios factores de salud asociados con diferentes contaminantes. Estas estimaciones se basan en gastos médicos, pérdidas de productividad y el valor de una vida estadística en caso de mortalidad, utilizando modelos específicos (Nowak D. J., 2021).

Por lo que para el área de estudio se estandarizó a un precio de **7,47 \$/kg para PM_{2,5}** y **11,20 \$/kg para O₃ y NO₂**.

2.1.1.4.4. Emisión de compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVBs)

Las entradas requeridas para este cálculo fueron: especie, altura total, altura de la copa, diámetro de copa y porcentaje de dosel faltante.

Las emisiones de COVBs de los árboles se calcularon según los procedimientos utilizados en el Sistema de Inventario de Emisiones Biogénicas (BEIS) de la EPA (U.S. EPA 2017a). Las emisiones de COVBs dependen de las especies de árboles, la biomasa de las hojas, la temperatura del aire y otros factores ambientales. i-Tree Eco estimó la emisión por hora de **isopreno (C₅H₈)** y **monoterpenos (C₁₀H₁₆)**, las dos categorías dominantes de COVBs emitidas por los árboles. Las estimaciones de biomasa foliar se derivaron de los datos de campo y se multiplican por factores de emisión específicos de género o familia (Nowak et al. 2002b citado por (Nowak D. J., 2021)), para producir niveles de emisión estandarizados a 30° C y un flujo de radiación fotosintéticamente activa (PAR) de 1000 μmol/m²/s. Los factores de emisión específicos de género o familia se derivaron de la literatura (ver datos en **Apéndice 12**, dirigirse al enlace proporcionado después del Índice en Apéndices). Si no se disponía de información específica del género, se utilizó los valores medios de emisión para la familia, el orden o el superorden. Las emisiones estandarizadas se convierten en emisiones reales en función de factores de corrección de luz y temperatura (Geron *et al.* 1994 citado por (Nowak D. J., 2021)) y datos meteorológicos locales.

La emisión de COVBs (E) en μgC/árbol/h para isopreno y monoterpenos se estima como (Nowak D. J., 2021):

$$E = B_E * B * \gamma$$

Dónde:

BE= Es la tasa de emisión del género base en μgC/g de peso seco de hoja/h a 30°C y el flujo de PAR de 1000 μmol/m²/s.

B = Es la biomasa de peso seco de la hoja de la especie (g).

γ = Emisión de isopreno.

Para la emisión de isopreno i-Tree Eco calculó como (Nowak D. J., 2021):

$$\gamma = \left[\frac{\alpha * c_{T1} L}{(1 + \alpha^2 * L^2)^{\frac{1}{2}}} \right] * \left[\frac{EXP \left[\frac{c_{T1}(T - T_s)}{T * T_s * T} \right]}{(0,961 + EXP \left(\frac{c_{T1}(T - T_M)}{T * T_s * T} \right))} \right]$$

Dónde:

$\alpha = 0,0027$, $c_{T1} = 1,066$, L es flujo PAR, R es la constante de los gases ideales (8,314 J/K/mol), $T(^{\circ}K)$ es la temperatura de la hoja, que se supone que es la temperatura del aire, T_s es la temperatura estándar (303 °K), $T_M = 314$ °K, $C_{T1} = 95\ 000$ J/mol, y $C_{T2} = 230\ 000$ J/mol (Geron et al. 1994, Guenther 1997, Guenther et al. 1995 citado por (Nowak D. J., 2021)).

Como la PAR controla fuertemente la tasa de emisión de isopreno, la PAR se estima en 30 niveles de dosel como una función de la PAR por encima del dosel utilizando el modelo ambiental de dosel sunfleck con el LAI derivado de las mediciones de campo.

Para monoterpenos (Nowak D. J., 2021):

$$\gamma = \exp[\beta(T - T_s)]$$

Dónde:

$T(^{\circ}K)$ es la temperatura de la hoja, que se supone que es la temperatura del aire,

$T_s = 303$ °K, y $\beta = 0,09$.

Las entradas por hora de la temperatura del aire provienen de los datos meteorológicos medidos del Centro Nacional de Datos Climáticos (NCDC). La radiación solar total se calcula con base en el Modelo Meteorológico/Estadístico de Radiación Solar del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (METSTAT) con entradas del conjunto de datos NCDC (Maxwell 1994 citado por (Nowak D. J., 2021)).

El PAR (Photosynthetically Active Radiation) es la radiación electromagnética que se encuentra en el rango de longitud de onda de 400 a 700 nanómetros, y que es absorbida

por los pigmentos fotosintéticos de las plantas para realizar la fotosíntesis, el cual se calcula como el 46 por ciento de la entrada total de radiación solar (Monteith y Unsworth 1990 citado por (Nowak D. J., 2021)). Las estimaciones de COVBs por hora se suman para producir una tasa de emisión de COVBs por género.

Para estimar las emisiones de COVBs de árboles individuales, la emisión total de géneros se prorratea de nuevo al nivel de árbol o especie proporcional a la biomasa de árboles o especies individuales en los géneros. Se proporcionan métodos más detallados en Hirabayashi (2012, 2016) citado por (Nowak D. J., 2021)).

2.1.6.3.6.1. Valoración económica

La valoración económica de las emisiones de COVBs no ha sido evaluada en este estudio, debido a que se debe convertir estas emisiones en impactos de ozono (O₃) antes de poder realizar una valoración económica.

2.1.6.3.6.2. Ventajas, incertidumbres y limitaciones

Los valores de emisión de COVBs producidos por i-Tree Eco están estrechamente alineados con los valores estandarizados producidos por el inventario de uso de la tierra de EE. UU. (Kinnee et al. 1997 citado por (Nowak D. J., 2021)). El patrón modelado de radiación fotosintéticamente activa (PAR) también coincide estrechamente con las medidas de radiación PAR.

2.1.1.4.5. Efectos hidrológicos

i-Tree Eco permitió estimar la cantidad de lluvia interceptada, almacenada, transpirada y evaporada por las copas de los árboles, con un enfoque principal en el **volumen de escorrentía evitado**, en función de factores como especies, altura total, altura a la base de la copa, ancho de copa, porcentaje de dosel faltante, área foliar y cortical; conjuntamente con los datos adicionados de precipitación por hora para la gestión 2019.

El software simuló cada proceso individualmente y luego se vincularon con otros procesos para obtener una estimación de la intercepción de lluvia por hora, la evaporación de las superficies de las hojas, la evapotranspiración potencial, la transpiración y los valores de escorrentía evitada. Por ejemplo, la intercepción se simula utilizando una metodología Rutter mejorada (Valente et al. 1997), mientras que la evaporación se basó en el trabajo de Deardorff (1978) y Noilhan y Planton (1989). Para generar las estimaciones, se consideraron las **condiciones actuales de los árboles** y se realizó una simulación **sin la presencia de árboles** para evaluar el impacto de su presencia en la **escorrentía superficial**. Para estimar los efectos de árboles individuales, los impactos del agua en toda la población de árboles se distribuyeron proporcionalmente al área de la hoja del árbol individual, a escala de árbol. i-Tree Eco realizó numerosos cálculos para estimar los valores de interceptación, evaporación, transpiración, evapotranspiración potencial y escorrentía evitados por hora. Estas ecuaciones y métodos se detallan en Hirabayashi et al. (2015), Hirabayashi (2013, 2016), Wang et al. (2008) y Yang et al. (2011) citado por (Nowak D. J., 2021).

Valoración económica

i-Tree Eco, por defeco utilizó el valor promedio nacional en dólares de los Estados Unidos, de **\$2,36/m³** (16,42 Bs/m³) para estimar el valor de la escorrentía evitada debido a los árboles.

El cual se basa en varios estudios, donde toma en cuenta el costo de control de aguas pluviales.

2.1.1.4.6. Simulación individual de especies para determinar su capacidad en la producción de servicios ecosistémicos

Con el fin de identificar qué árboles individuales de las especies identificadas en el área de estudio almacenan, secuestran mayor cantidad de carbono y eliminan más contaminantes atmosféricos, se realizó una simulación para todas las especies utilizando el software i-Tree Eco. La simulación se basó en colocar el diámetro a la altura del pecho (DAP) estandarizado para todas las especies a 31,70 centímetros, el cual es la media estadística de todos los individuos medidos en el área, asumiendo que se encontraban en condiciones óptimas (100%) y que todos los lados estaban expuestos a la luz solar (5 lados) (ver Tabla 9). Las demás variables como la altura total y dimensiones de copas fueron modeladas mediante el software.

Tabla 9. Ejemplo de datos para la simulación individual de especies

ID	Especies	DAP (cm)	Condición (%)	Exposición (lados)
1	<i>Acacia visco</i>	31,7	100%	5
2	<i>Acer negundo</i>	31,7	100%	5
3	<i>Araucaria bidwillii</i>	31,7	100%	5
4	<i>Bauhinia candicans</i>	31,7	100%	5
5	<i>Brachychiton populneus</i>	31,7	100%	5
6	<i>Caesalpinia pluviosa</i>	31,7	100%	5
7	<i>Casuarina cunninghamiana</i>	31,7	100%	5
8	<i>Chorisia speciosa</i>	31,7	100%	5
9	<i>Cupressus macrocarpa</i>	31,7	100%	5
10	<i>Cupressus sempervirens</i>	31,7	100%	5
11	<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	31,7	100%	5
12	<i>Eriobotrya japonica</i>	31,7	100%	5
13	<i>Erythrina crista-galli</i>	31,7	100%	5
14	<i>Eucalyptus spp.</i>	31,7	100%	5
..
45	<i>Ulmus pumila</i>	31,7	100%	5

FUENTE: Elaboración propia.

CAPÍTULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Análisis y caracterización de la estructura arbórea

3.1.1. Composición florística y cantidad de la población

Según la Tabla 10, en el área de estudio se pudo identificar 45 especies arbóreas.

Tabla 10. Especies forestales identificadas dentro del área de estudio

Nombre común	Nombre científico	Familia
Jarca	<i>Acacia visco</i> Griseb.	Leguminosae
Arce	<i>Acer negundo</i> L.	Sapindaceae
Araucaria	<i>Araucaria bidwillii</i> Gancho.	Araucariáceae
Pata de vaca	<i>Bauhinia candicans</i> Benth.	Leguminosae
Brachichito	<i>Brachychiton populneus</i> (Schott & Endl.) R.Br.	Malvaceae
Momoqui	<i>Caesalpinia pluviosa</i> DC.	Leguminosae
Casuarina	<i>Casuarina cunninghamiana</i> Miq.	Casuarinaceae
Toborochoi rosado	<i>Chorisia speciosa</i> St.Hil.	Bombacaceae
Ciprés de Monterrey	<i>Cupressus macrocarpa</i> (Hartw.) Bartel	Cupressaceae
Pino vela	<i>Cupressus sempervirens</i> L.	Cupressaceae
Timboy	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	Leguminosae
Níspero	<i>Eriobotrya japonica</i> (Thunb.) Lindl.	Rosaceae
Ceibo	<i>Erythrina crista-galli</i> L.	Leguminosae
Eucalipto	<i>Eucalyptus</i> spp.	Mirtaceae
Fresno americano	<i>Fraxinus americana</i> L.	Oleaceae
Fresno europeo	<i>Fraxinus excelsior</i> L.	Oleaceae
Chañar	<i>Geoffroea decorticans</i> (Gillies ex Hook. & Arn.) Burkart	Leguminosae
Coronillo	<i>Gleditsia triacanthos</i> L.	Leguminosae
Grevilla	<i>Grevillea robusta</i> A. Cunn. ex R. Br.	Proteaceae

Lapacho amarillo	<i>Tabebuia serratifolia</i> (Vahl) G. Nicholson	Bignoniaceae
Lapacho rosado	<i>Tabebuia avellanedae</i> (Lorentz ex Griseb.) Mattos.	Bignoniaceae
Tarco	<i>Jacaranda mimosifolia</i> D. Don	Bignoniaceae
Leucaena	<i>Leucaena leucocephala</i> (Lam.) de Wit	Leguminosae
Ligustre	<i>Ligustrum lucidum</i> WT Aiton	Oleaceae
Paraíso	<i>Melia azedarach</i> L.	Meliaceae
Mora negra	<i>Morus nigra</i> L.	Moraceae
Pino canario	<i>Pinus canariensis</i> C.	Pinaceae
Pino piñotero	<i>Pinus pinea</i> L.	Pinaceae
Pino patula	<i>Pinus patula</i> Schiede	Pinaceae
Pino de cerro	<i>Podocarpus parlatorei</i> Pilg.	Podocarpaceae
Álamo plateado	<i>Populus alba</i> L.	Salicaceae
Álamo americano	<i>Populus deltoides</i> W. Bartram ex Marshall	Salicaceae
Álamo negro	<i>Populus nigra</i> L.	Salicaceae
Algarrobo	<i>Prosopis alba</i> Griseb.	Leguminosae
Clavelina	<i>Pseudobombax ellipticum</i> (Kunth) Dugand	Bombacaceae
Tipa colorada	<i>Pterogyne nitens</i> Tul.	Leguminosae
Roble europeo	<i>Quercus robur</i> L.	Fagaceae
Alcornoque	<i>Quercus suber</i> L.	Fagaceae
Sauce llorón	<i>Salix babylonica</i> L.	Salicaceae
Sauce criollo	<i>Salix humboldtiana</i> Willd.	Salicaceae
Molle	<i>Schinus molle</i> L.	Anacardiaceae
Carnaval	<i>Cassia carnaval</i>	Leguminosae
Tipa blanca	<i>Tipuana tipu</i> (Benth.) Kuntze	Leguminosae
Olmo	<i>Ulmus pumila</i> L.	Ulmaceae

FUENTE: Herbario Universitario (T.B.) (2023); Killeen et al. (1993) y (USDA, 2020)

La Tabla 11 muestra el número de especies forestales por familia en el área de estudio. Se identificaron un total de 45 especies. La familia con el mayor número de especies es Leguminosae con 12 especies, seguida de Pinaceae con 4 especies, Salicaceae con 5 especies y Oleaceae con 4 especies. Otras familias presentes incluyen Bignoniaceae con 3 especies, Anacardiaceae con 1 especie, Bombacaceae con 2 especies, Fagaceae con 2 especies, Cupressaceae con 2 especies y Mirtaceae con 1 especie. Además, se identificaron 9 especies pertenecientes a otras familias.

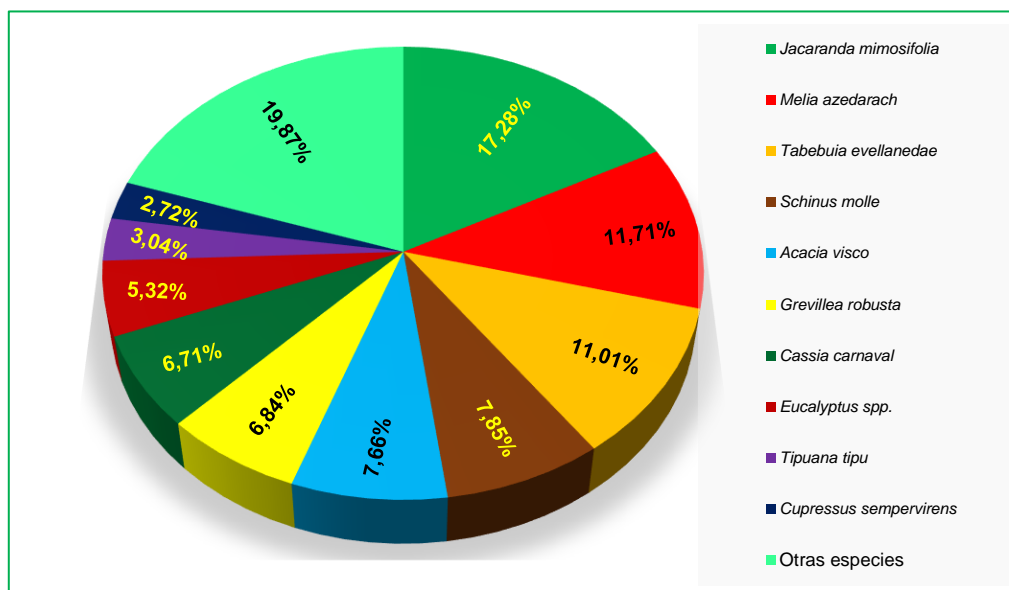
Tabla 11. Número de especies forestales por familia

Familias	Nº de especies
Leguminosae	12
Pinaceae	4
Salicaceae	5
Oleaceae	4
Bignoniaceae	3
Anacardiaceae	1
Bombacaceae	2
Fagaceae	2
Cupressaceae	2
Mirtaceae	1
Otras familias	9
TOTAL	45

FUENTE: Elaboración propia

El número de individuos evaluados fue de **1580 árboles** de un diámetro a la altura al pecho (DAP) mayor a 10 centímetros, con una densidad de **163 individuos/hectárea**, ocupando una cobertura de 8,76 hectáreas en el estrato arbóreo en base a la modelación con i-Tree Eco. Las tres especies más abundantes son *Jacaranda mimosifolia* (tarco) con 17,28%, *Melia azedarach* (paraíso) ocupando un 11,71% y *Tabebuia avellaneda* (lapacho rosa) con un valor de 11,01%, del total de todos los individuos (ver Gráfico 9 y datos en Anexo 1). Cabe recalcar, que la simplificación de los nombres científicos a género y especie en posteriores resultados y gráficas se justifica por facilitar la comprensión y comunicación de los datos a un público más amplio, evitar confusión y abrumar a aquellos no familiarizados con la taxonomía científica. Además, que así lo requiere el software i-Tree Eco para llevar a cabo la modelación.

Gráfico 9. Composición de especies en la valoración ecosistémica

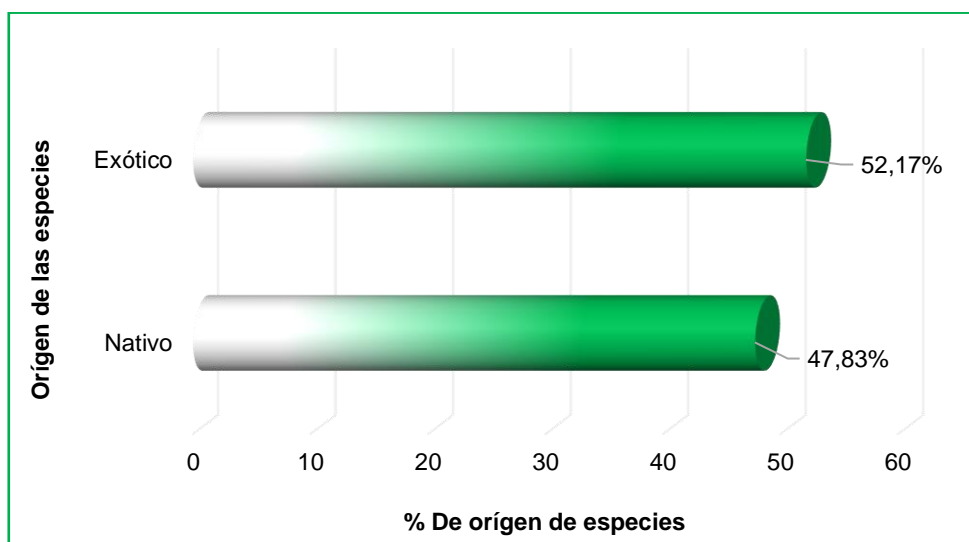


FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.1.2. Estado de origen de las especies

Se determinó que el 47,83% son especies nativas, principalmente de las familias Leguminosae y Bignoniaceae. El 52,17% corresponde a especies introducidas o exóticas. La descripción del origen de la es especies está en base al conocimiento y experiencia adquirida (ver Gráfico 10 y datos en Anexo 1, en el apartado de “origen”).

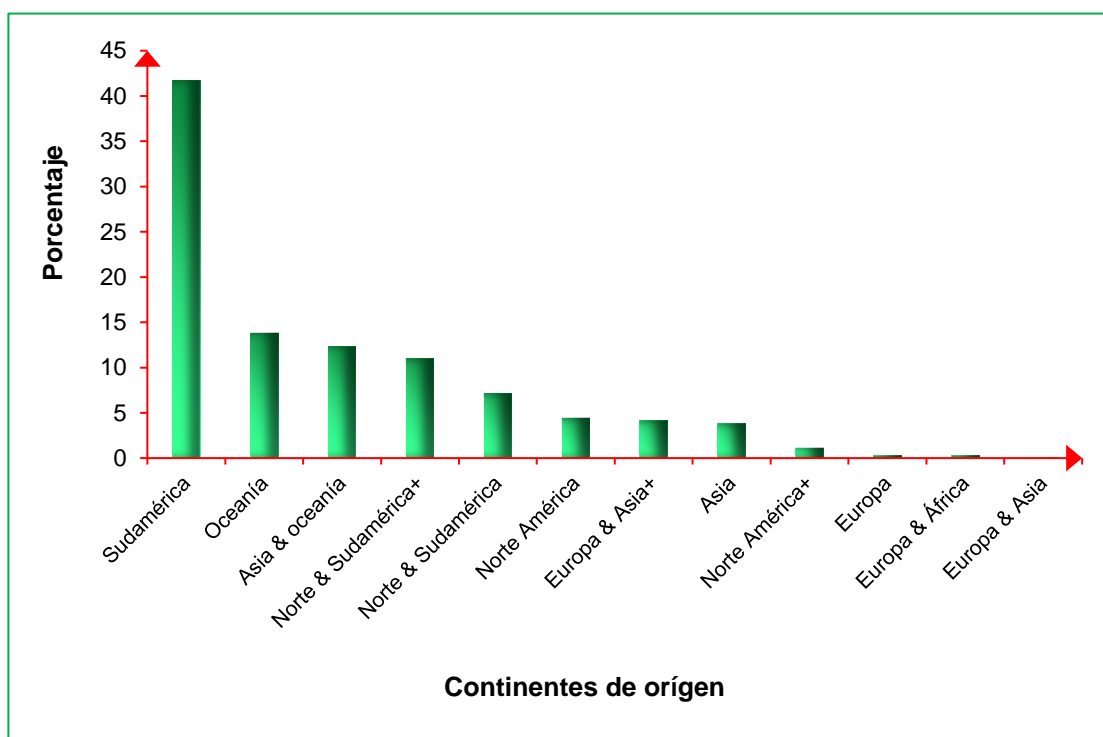
Gráfico 10. Origen nativo o exótico



FUENTE: Elaboración propia.

Según la modelación con i-Tree eco, en cuanto al origen por continente, se determinó que el 41,7% de las especies son originarias de Sudamérica, el 13,8% son originarias de Oceanía, el 12,3% pertenecen a América del Norte y del Sur, y las restantes tienen un origen europeo y asiático (ver Gráfico 11).

Gráfico 11. Estatus de origen de la especie por continente



FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

El símbolo '+' indica que la especie es originaria de otro continente que no aparece en la lista de continentes de la agrupación. Por ejemplo, Europa & Asia + indicaría que la especie es originaria de Europa, de Asia y de otro continente más nativas (i-Tree Eco, 2022). Los bosques urbanos están compuestos de una mezcla de especies de árboles nativos y exóticos. Por ello, tienen una diversidad de árboles que es más alta a la de los paisajes nativos que los rodean. El aumento en la diversidad de árboles puede minimizar el impacto general o la destrucción por un insecto o enfermedad específica de una especie, pero también puede presentar un riesgo para las plantas nativas si algunas de las especies exóticas son plantas invasivas con el potencial de ser más competitivas y desplazar a las especies nativas (i-Tree Eco, 2022).

3.1.3. Diversidad y gama de especies de árboles

3.1.3.1. Valor de importancia (VI)

Según modelación con i-Tree Eco, las especies más dominante en términos de área foliar son *Jacaranda mimosifolia* (tarco), *Eucalyptus spp.* (eucalipto), y *Melia azedarach* (paraíso). Las 17 especies con los valores de importancia más altos son enumeradas en la Tabla 12 y datos extendidos en Anexo 2. Los valores de importancia (VI) se calculan como la suma del porcentaje de la población y porcentaje del área de las hojas.

Tabla 12. Valor de importancia de las especies arbóreas

Especies forestales	Árboles por especie (%)	Área foliar (%)	VI
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	17,3	16,6	33,9
<i>Eucalyptus spp.</i>	5,3	19,1	24,4
<i>Melia azedarach</i>	11,7	7,5	19,3
<i>Schinus molle</i>	7,8	10,4	18,3
<i>Grevillea robusta</i>	6,8	9,7	16,6
<i>Tabebuia avellanae</i>	11,0	4,3	15,4
<i>Acacia visco</i>	7,7	7,5	15,1
<i>Cassia carnaval</i>	6,7	3,2	9,9
<i>Tipuana tipu</i>	3,0	2,3	5,3
<i>Ulmus pumila</i>	2,3	1,9	4,3
<i>Cupressus sempervirens</i>	2,7	1,4	4,2
<i>Geoffroea decorticans</i>	2,4	1,7	4,1
<i>Pinus canariensis</i>	1,1	2,1	3,2
<i>Gleditsia triacanthos</i>	1,3	1,3	2,6
<i>Enterolobium contortisiliquum</i>	1,3	1,2	2,5
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	1,3	1,0	2,2
<i>Erythrina crista-galli</i>	1,3	0,5	1,8

FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

Los valores de importancia altos no quieren decir que los árboles deben procurarse necesariamente a futuro; sino que dichas especies dominan actualmente la estructura del bosque urbano.

3.1.4. Características estadísticas de los parámetros dasométricos del arbolado

Durante el censo forestal del arbolado urbano, se mensuraron diversos parámetros dasométricos, tales como el diámetro a la altura del pecho (DAP), la altura total del árbol, la altura a la base de la copa, la altura de la copa viva, el diámetro promedio de la copa y la exposición de luz de la copa, entre otros. Esto para los 1580 individuos censados dentro del área de estudio, distribuido en todas las especies.

Tabla 13. Estadística descriptiva de los parámetros dasométricos del censo forestal

Estadísticos	DAP (cm)	Altura total (m)	Copa: Altura a la base (m)	Copa: Altura de copa viva (m)	Copa: Diámetro promedio (m)	Copa: Exposición de luz (Lados)
Promedio	31,70	11,14	2,38	8,76	7,86	3
Error típico	0,43	0,13	0,02	0,12	0,07	
Mediana	27,69	9,97	2,10	7,70	7,65	3
Moda	31,83	8,10	1,30	7,70	8,00	3
Desviación estándar	17,11	5,28	0,94	4,77	2,97	1
Varianza	292,79	27,93	0,89	22,75	8,82	2
Mínimo	10,19	2,93	1,30	1,50	0,55	0
Máximo	155,97	41,70	6,80	37,80	24,30	5

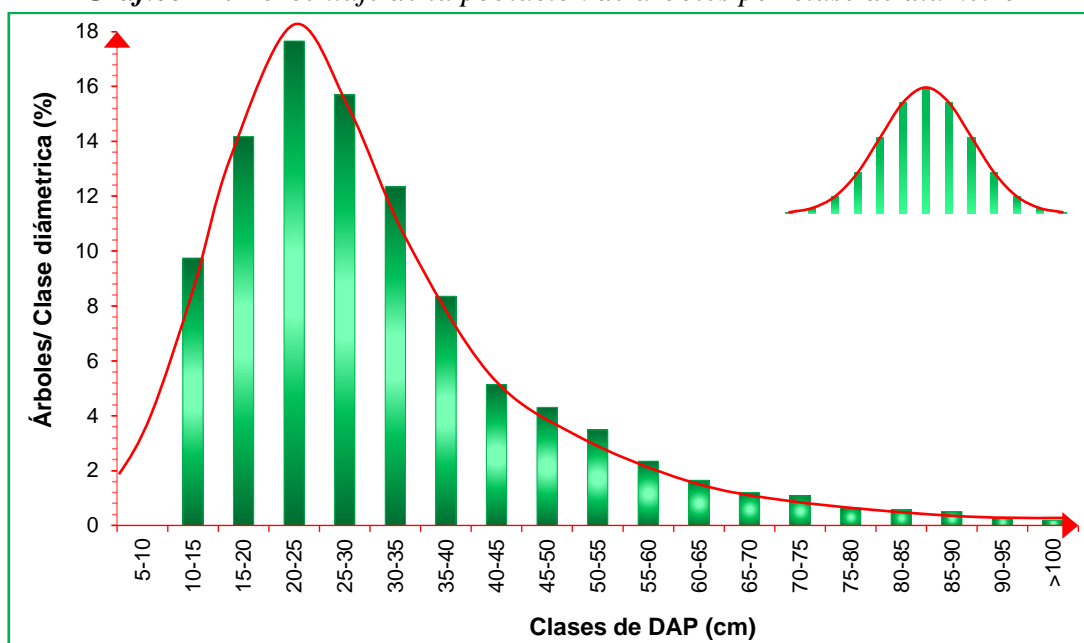
FUENTE: Elaboración propia, calculado en Excel.

La Tabla 13 muestra los estadísticos para dichas variables medidas que comprende para todos los individuos censados, el promedio del DAP presenta, de 31,7 cm, con una desviación estándar de 17,11 cm. La altura total promedio fue de 11,14 m, con una desviación estándar de 5,28 m. La altura a la base de la copa tuvo un promedio de 2,38 m, con una desviación estándar de 0,94 m. La altura de la copa viva tiene un promedio de 8,76 m, con una desviación estándar de 4,77 m. El diámetro promedio de la copa es de 7,86 m, con una desviación estándar de 2,97 m y una varianza de 8,82 m. Finalmente, la exposición de luz de la copa en promedio tuvo 3 lados expuestos. El mínimo valor encontrado para el DAP es de 10,19 cm y la altura total mínima fue de 2,93 m. En contraste, el máximo DAP es de 155,97 cm y la altura total máxima fue de 41,70 m.

3.1.5. Población de árboles por clase diamétrica

De acuerdo a la distribución diamétrica de los 1580 individuos identificados, se evidencia en el Gráfico 9, que el 69,62% de la población total, que equivale a 1100 individuos, se encuentra comprendido en las clases diamétricas que van desde 15 cm hasta 35 cm. A medida que aumenta la clase diamétrica, se reduce el porcentaje de individuos con un mayor diámetro a la altura del pecho (DAP), distribuyéndose en forma de campana de Gauss (ver Gráfico 12 y datos en Anexo 3).

Gráfico 12. Porcentaje de la población de árboles por clase de diámetro



FUENTE: Elaboración propia, calculado en Excel.

Las especies forestales más relevantes en términos de porcentaje de individuos en la mayor clase de Diámetro a la Altura del Pecho (DAP) son *Jacaranda mimosifolia* (34,1%), *Melia azedarach* (44,9%), *Tabebuia avellanadae* (49,4%), y *Schinus molle* (46,8%). También destacan *Acacia visco* (42,1%), *Grevillea robusta* (37,0%), *Cassia carnival* (49,1%), *Tipuana tipu* (37,5%), y *Geoffroea decorticans* (42,1%) por su presencia significativa en la muestra.

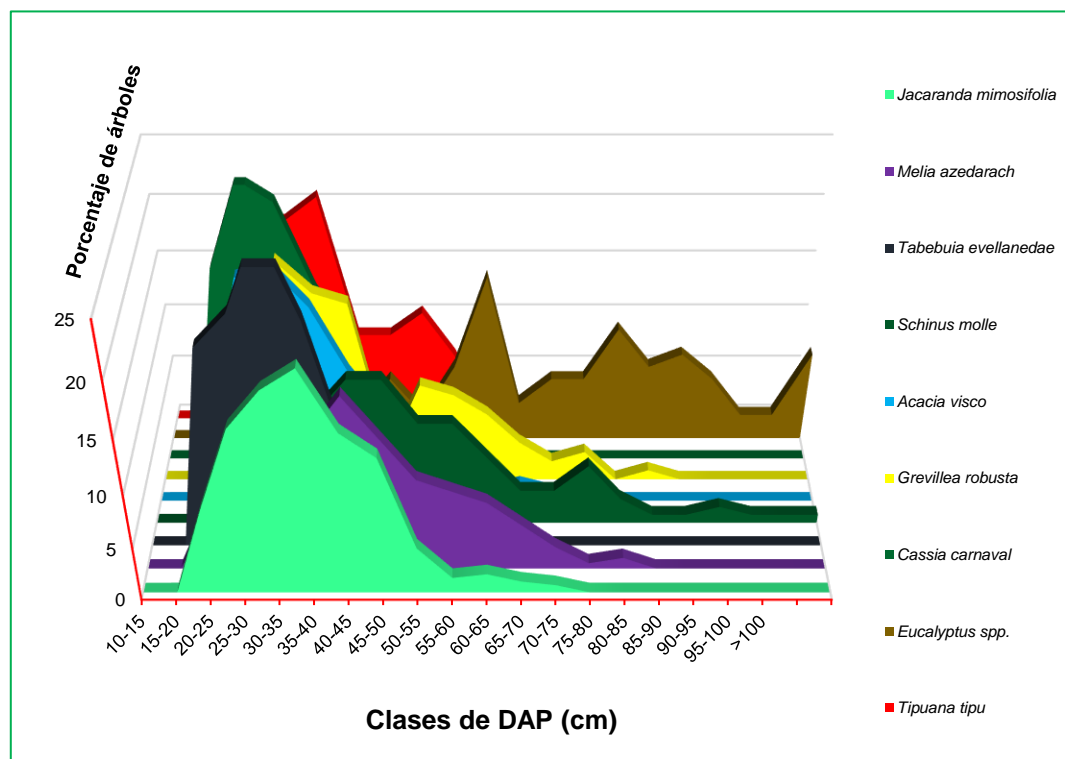
En cuanto a *Eucalyptus spp.*, los individuos se concentran en clases diamétricas mayores a 30 cm de DAP (ver Tabla 14 y Gráfico 13).

Tabla 14. Las 10 especies más pobladas en el área de estudio

Especie forestal	Clase de DAP (cm)							
	10 - 15	15 - 25	25 - 30	30 - 50	50 - 75	75 - 90	90 - 100	>100
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	8,1	34,1	20,5	33,7	3,7	0,0	0,0	0,0
<i>Melia azedarach</i>	5,9	22,2	12,4	44,9	14,6	0,0	0,0	0,0
<i>Tabebuia avellanedae</i>	18,4	49,4	20,7	11,5	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Schinus molle</i>	1,6	14,5	10,5	46,8	21,0	3,2	1,6	0,8
<i>Acacia visco</i>	9,9	42,1	18,2	26,4	3,3	0,0	0,0	0,0
<i>Grevillea robusta</i>	0,9	28,7	17,6	37,0	14,8	0,9	0,0	0,0
<i>Cassia carnaval</i>	17,9	49,1	16,0	17,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Eucalyptus spp.</i>	0,0	1,2	4,8	17,9	41,7	21,4	4,8	8,4
<i>Tipuana tipu</i>	8,3	37,5	20,8	33,3	0,0	0,0	0,0	0,0
<i>Geoffroea decorticans</i>	5,3	34,2	10,5	42,1	7,9	0,0	0,0	0,0

FUENTE: Elaboración propia, calculado en Excel.

Gráfico 13. Distribución de las especies por clase de DAP

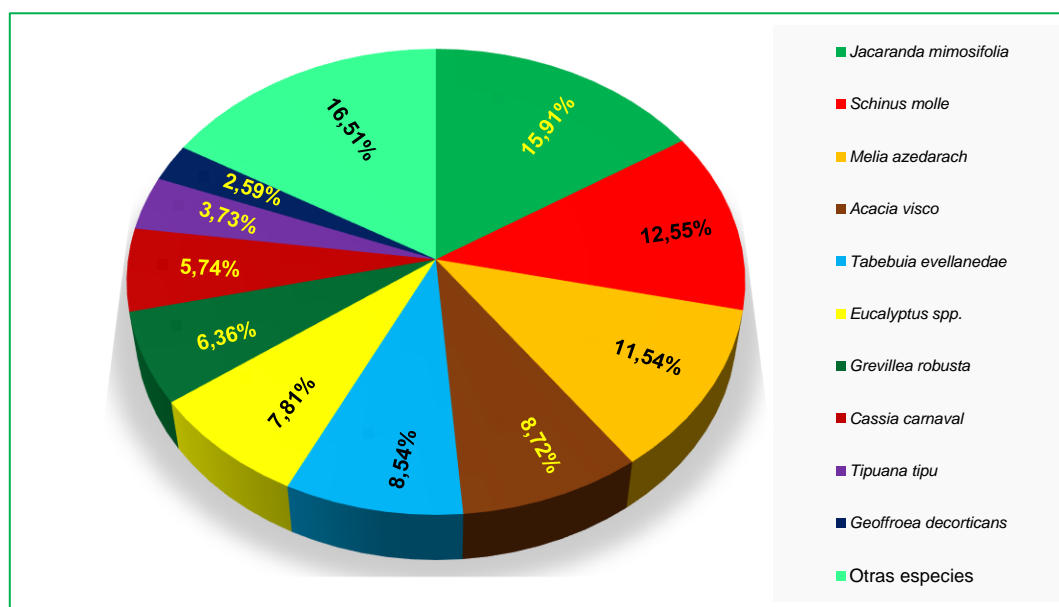


FUENTE: Elaboración propia, calculado en Excel.

3.1.6. Cobertura arbórea de dosel

La cobertura total estimada para el área de estudio, según modelación con i-Tree Eco, es de 8,76 hectáreas, donde las especies con mayor cobertura son *Jacaranda mimosifolia* con 1,40 hectáreas equivalente el 15,91%, *Schinus molle* presenta una cobertura de 1,10 hectáreas representando el 12,55%, *Melia azedarach* con valor de 1,01 hectáreas equivalente al 11,54% y *Acacia visco* presta una cobertura de dosel de 7638,40 m² con un 8,72% (ver Gráfico 14 y datos en Anexo 4).

Gráfico 14. Cobertura de dosel del estrato arbóreo

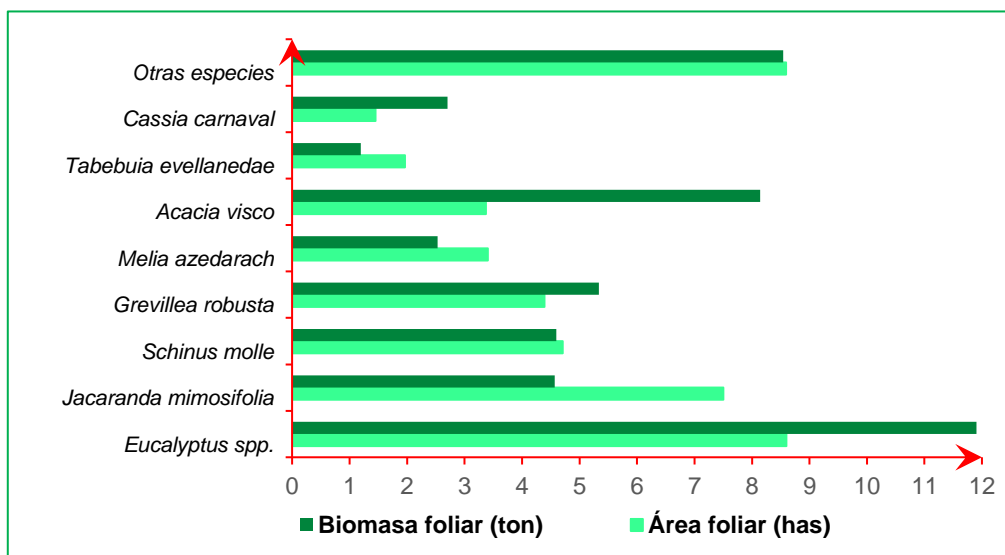


FUENTE: Modelado con i-Tree Eco.

3.1.7. Biomasa y área foliar

El área foliar comprendida para todos los árboles en el área de estudio, según i-Tree Eco, es de 45,11 hectáreas, equivalente a una biomasa de 51,06 toneladas (1,13 ton/ha). Donde *Eucalyptus spp.* presenta un calor de 8,60 hectáreas de área foliar, equivalente a 11,90 toneladas de biomasa, *Jacaranda mimosifolia* presenta un área foliar de 7,50 hectáreas y 4,57 toneladas de biomasa, *Schinus molle* con 4,71 hectáreas de área foliar y 4,60 toneladas de biomasa y finalmente la especie *Grevillea robusta* presenta un valor de 4,39 hectáreas, equivalente a 5,34 toneladas (ver Gráfico 15 y datos en Anexo 4).

Gráfico 15. Composición de área y biomasa foliar

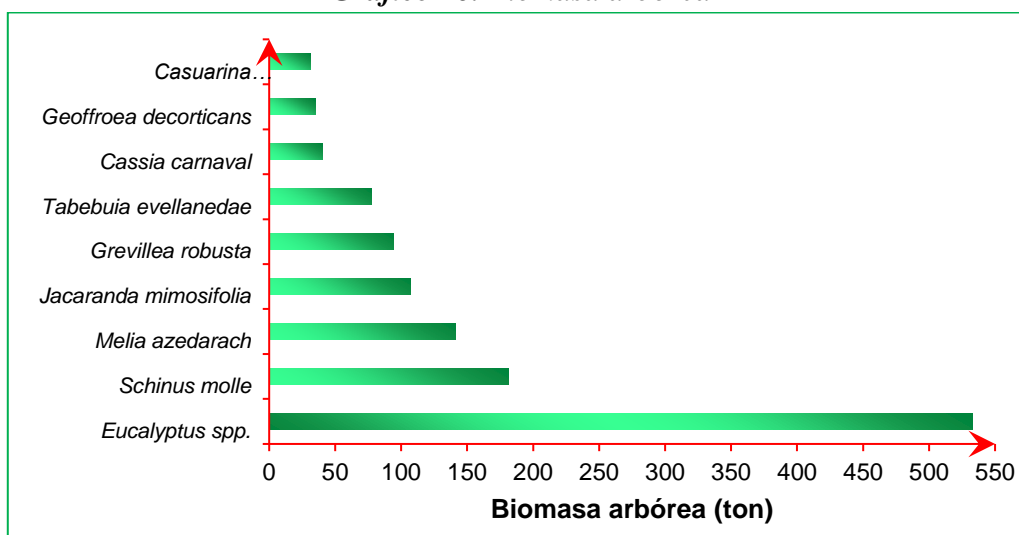


FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.1.8. Biomasa arbórea

La biomasa arbórea estimada según i-Tree Eco es de 1448,75 toneladas. Donde *Eucalyptus spp.* presenta una biomasa de 532,68 toneladas, *Schinus molle* con 181,21 toneladas, seguida de *Melia azedarach* con 141,17 toneladas y *Jacaranda mimosifolia* presenta una biomasa de 106,91 toneladas (ver Gráfico 16 y datos en Anexo 5).

Gráfico 16. Biomasa arbórea



FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

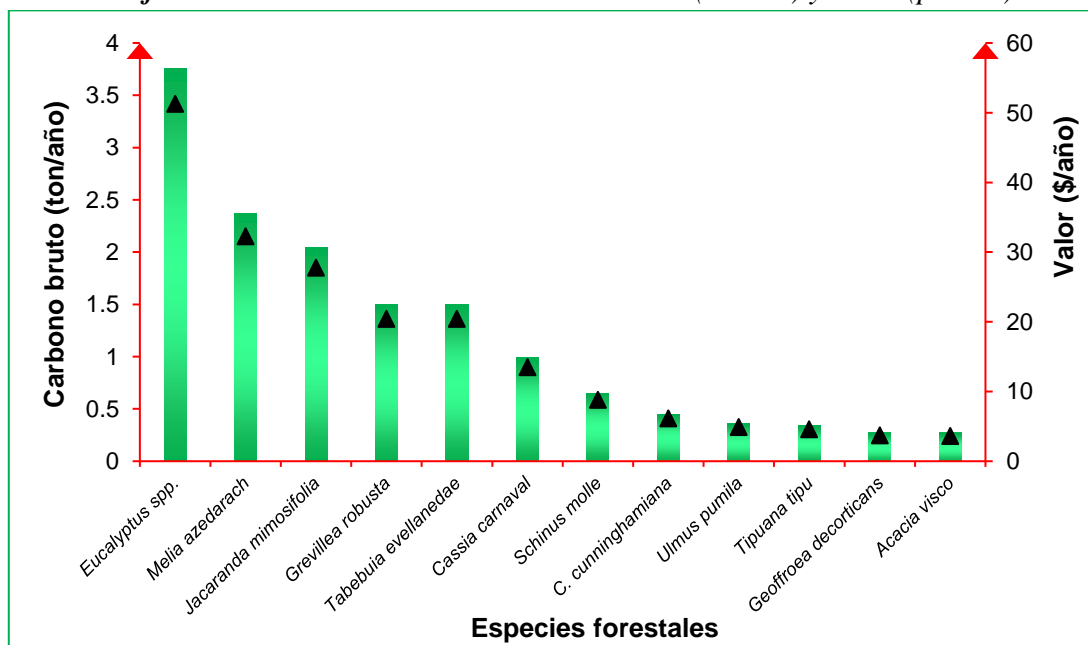
3.2. Determinación y valoración de los servicios ecosistémicos

3.2.1. Almacenamiento y secuestro de carbono

3.2.1.1. Secuestro bruto de carbono

Es importante tener en cuenta que los árboles desempeñan un papel crucial en la mitigación de los efectos del cambio climático al absorber dióxido de carbono de la atmósfera. Al almacenar carbono en su biomasa y suelo, los árboles pueden ayudar a reducir la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera. Los árboles reducen la cantidad de carbono en la atmósfera al secuestrar el carbono en el crecimiento nuevo cada año. La cantidad de carbono secuestrado anualmente aumenta con el tamaño y la salud de los árboles. El secuestro bruto es aproximadamente **16,18 toneladas métricas de carbono por año**, equivalente a un valor asociado de **\$226,53/año**. El gráfico 17 muestra la relevancia de las mayores especies para secuestrar carbono, donde se observa que *Eucalyptus spp.* secuestra 3,76 ton/año, *Melia azedarach* con un dato de 2,37 ton/año y *Jacaranda mimosifolia* secuestra 2,04 ton/año (ver Gráfico 17 y datos en Anexo 5).

Gráfico 17. Secuestro bruto anual de carbono (barras) y valor (puntos)



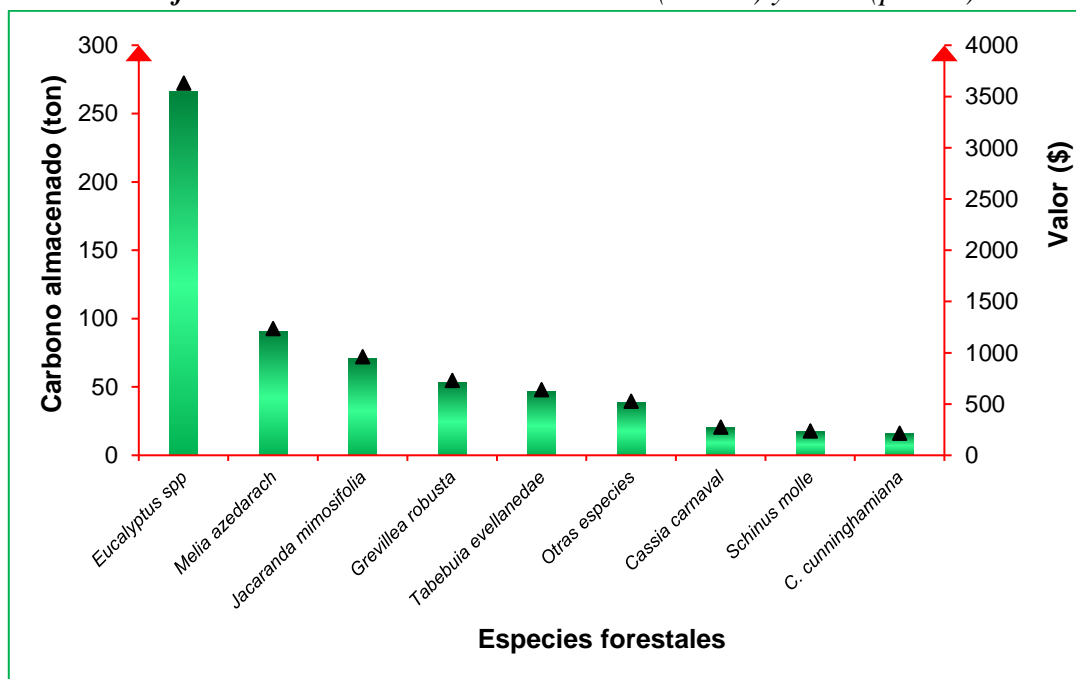
FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.2.1.2. Almacenamiento de carbono

Se evaluó la cantidad de carbono almacenado y su valor económico en varias especies de árboles. El carbono almacenado se mide en toneladas (ton) y se ha calculado su valor económico en dólares estadounidenses (\$). Las especies de *Eucalyptus spp.* almacenan la mayor cantidad de carbono, con un total de 266,34 toneladas y un valor de \$3728,73, le sigue *Schinus molle* con 90,60 toneladas y un valor de \$1268,47. La especie *Melia azedarach* almacena 70,59 toneladas y un valor de \$988,21, mientras que *Jacaranda mimosifolia* almacena 53,46 toneladas con un valor de \$748,37. Por otro lado, las demás especies almacenan menor cantidad debido a su número de individuos. En general la población evaluada, almacena **724,53 toneladas** de carbono con un valor económico total de **\$10141,24** (75 ton/ha) (ver Gráfico 18 y datos en Anexo 5).

Es importante destacar que el almacenamiento de carbono en los árboles es una forma efectiva de reducir la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera, contribuyendo así a la mitigación del cambio climático y mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad.

Gráfico 18. Almacenamiento de carbono (barras) y valor (puntos)



FUENTE: Elaboración propia, modelado con *i-Tree Eco*.

3.2.1.3. Simulación de la capacidad de capturar carbono de los árboles

En cuanto a la simulación para determinar que especies de árboles en su nivel individual almacenan y secuestran mayor y menor carbono, se identificó que la especie *Tabebuia serratifolia* es una especie destacada en la captura y retención de carbono, con un almacenamiento de carbono de 379,80 kg y un secuestro bruto de carbono de 17,70 kg/año. *Tabebuia avellanedae* también muestra una capacidad notable, con valores similares de almacenamiento y secuestro de carbono. *Eucalyptus spp.* es otra especie destacada, con un almacenamiento de carbono de 359,10 kg y un secuestro bruto de carbono de 23,30 kg/año. *Caesalpinia pluviosa*, *Geoffroea decorticans* y *Pterogyne nitens* también muestran una capacidad significativa en la captura y retención de carbono. *Quercus suber*, *Chorisia speciosa* y *Cassia carnaval* y las demás especies presentan valores ligeramente más bajos en términos de almacenamiento y secuestro de carbono (ver Tabla 15 y datos extendidos en Anexo 9).

Tabla 15. Influencia individual para la captura y secuestro de carbono

Especies forestales	Almacenamiento de carbono (kg)	Secuestro bruto de carbono (kg/año)
<i>Tabebuia serratifolia</i>	379.80	17.70
<i>Tabebuia avellanedae</i>	379.80	17.70
<i>Eucalyptus spp.</i>	359.10	23.30
<i>Caesalpinia pluviosa</i>	341.80	17.70
<i>Geoffroea decorticans</i>	332.90	17.20
<i>Pterogyne nitens</i>	332.90	12.30
<i>Quercus suber</i>	320.00	8.90
<i>Chorisia speciosa</i>	317.80	16.20
<i>Cassia carnaval</i>	308.20	21.30
<i>Eriobotrya japonica</i>	289.20	14.70
<i>Casuarina cunninghamiana</i>	278.10	18.40
<i>Morus nigra</i>	258.50	17.30
<i>Cupressus sempervirens</i>	258.10	10.20

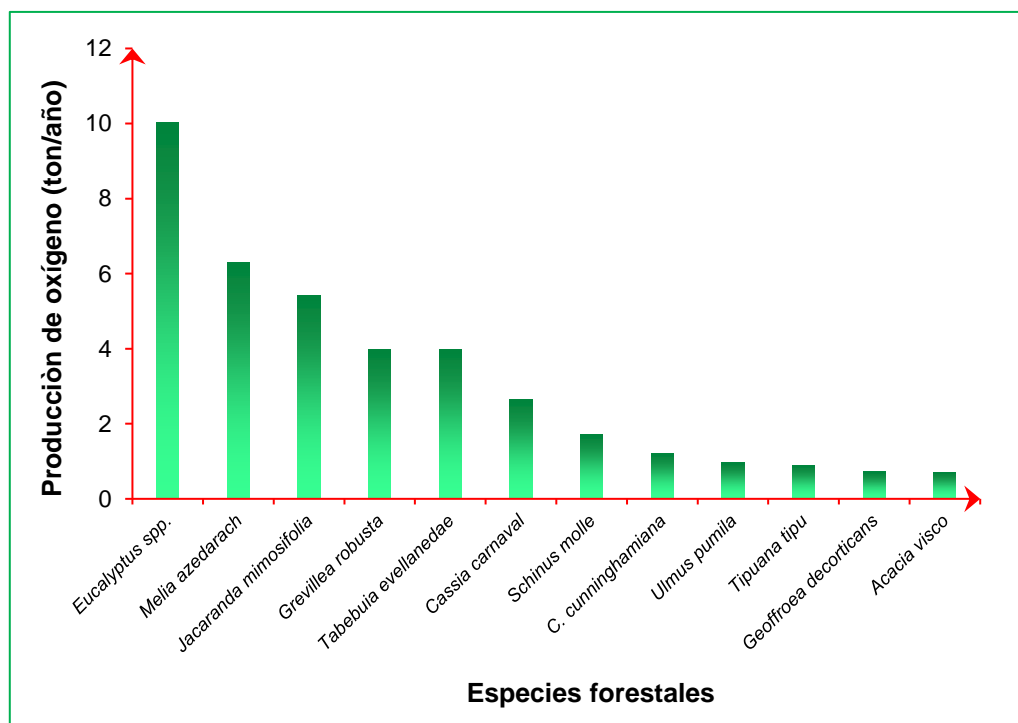
FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.2.2. Producción de oxígeno

Según la modelación de i-Tree Eco, en el Gráfico 19, se observa que los árboles dentro de la valoración ecosistémica, producen **43,14 toneladas métricas de oxígeno al año**, donde las especies que prestan mayor producción *Eucalyptus spp.* con 10,02 toneladas, *Melia azedarach* produce 6,31 toneladas y *Jacaranda mimosifolia* produce 5,43 toneladas anuales, sin embargo, este beneficio de los árboles es relativamente insignificante debido a la gran y relativamente estable cantidad de oxígeno en la atmósfera y extensa producción por los sistemas acuáticos.

Nuestra atmósfera tiene una enorme reserva de oxígeno. Si se consumieran todas las reservas de combustibles fósiles, todos los árboles y toda la materia orgánica en el suelo, el oxígeno de la atmósfera sólo se reduciría en un mínimo porcentaje (Broecker 1970) citado por (Nowak D. J., 2021). (ver datos ampliados en Anexo 5).

Gráfico 19. Especies que más oxígeno producen al año

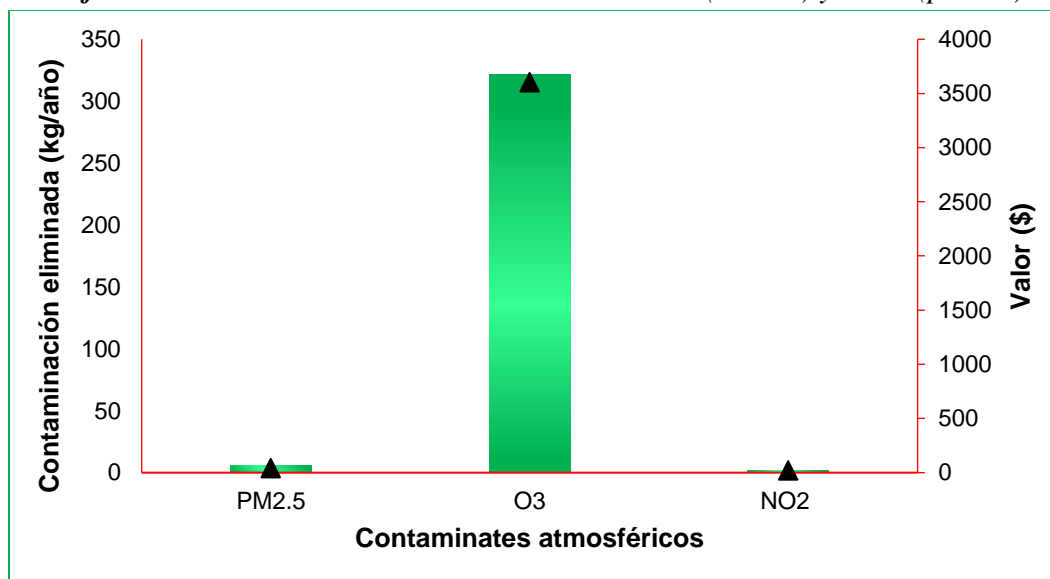


FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.2.3. Eliminación de la contaminación del aire por parte del arbolado urbano

Según modelación con i-Tree Eco, en el Gráfico 20 se muestra la cantidad de contaminantes eliminados en kilogramos y su valor monetario correspondiente, para la gestión 2019. En cuanto a los contaminantes, se muestra que se eliminaron 5,39 kg de PM_{2.5}, con un valor de \$40,24/año. En el caso del O₃, se eliminaron 32,83 kg/año, con un valor de \$3603,03/año. Por último, en relación al NO₂, se eliminaron 1,80 kg/año, con un valor de \$20,10/año. La cantidad total de contaminantes eliminados es de **329,01 kg/año**, con un valor monetario total de **\$3952,17 por año**. Este valor representa la suma de la eliminación de los contaminantes PM_{2.5}, O₃ y NO₂, y refleja el impacto positivo del arbolado urbano en la reducción de la contaminación atmosférica y los beneficios económicos asociados a esta disminución.

Gráfico 20. Eliminación anual de la contaminación (barras) y valor (puntos)

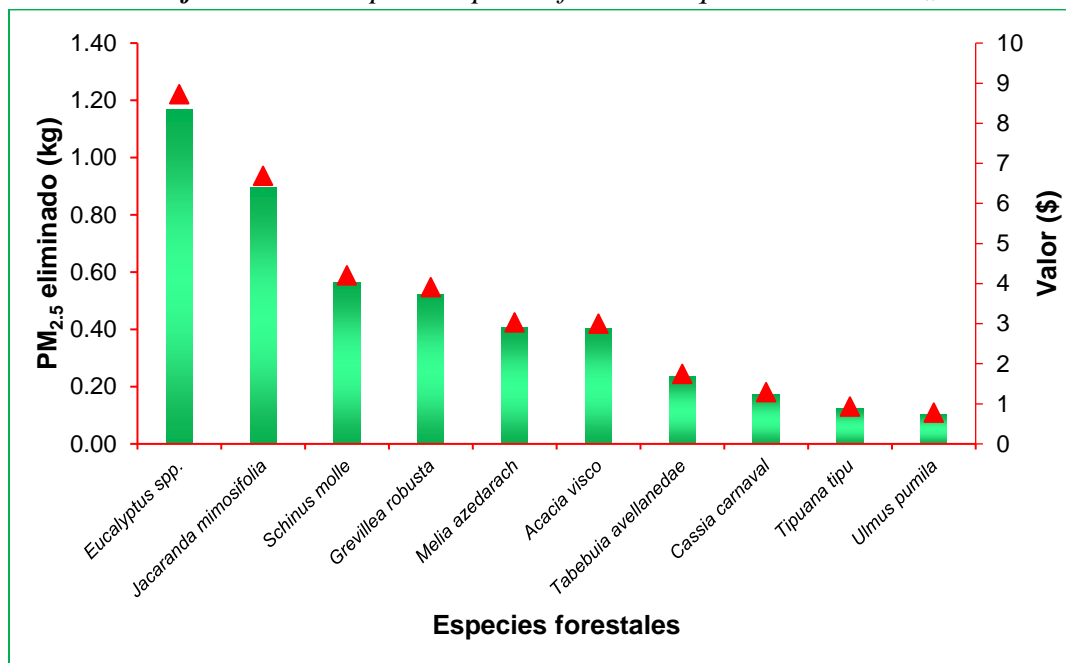


FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

Las cinco principales especies en términos de eliminación de PM_{2.5} y su valor monetario anual son: *Eucalyptus spp.* con una eliminación de 1,17 kg/año de PM_{2.5} y un valor de \$8,73/año, *Jacaranda mimosifolia* con una eliminación de 0,90 kg/año de PM_{2.5} y un valor de \$6,69/año, *Schinus molle* con una eliminación de 0,56 kg/año de PM_{2.5} y un valor de \$4,21/año, *Grevillea robusta* con una eliminación de 0,52 kg/año de PM_{2.5} y un valor de \$3,91/año, y *Melia azedarach* con una eliminación de 0,41

kg/año de $PM_{2.5}$ y un valor de \$3,04/año. En total, se ha eliminado un total de 5,39 kg/año de $PM_{2.5}$, con un valor monetario total de \$40,24/año. Estos valores representan la contribución de todas las especies forestales mencionadas en la eliminación de $PM_{2.5}$ y los beneficios económicos asociados a esta reducción de contaminantes atmosféricos (ver Gráfico 21 y ver datos en Anexo 6).

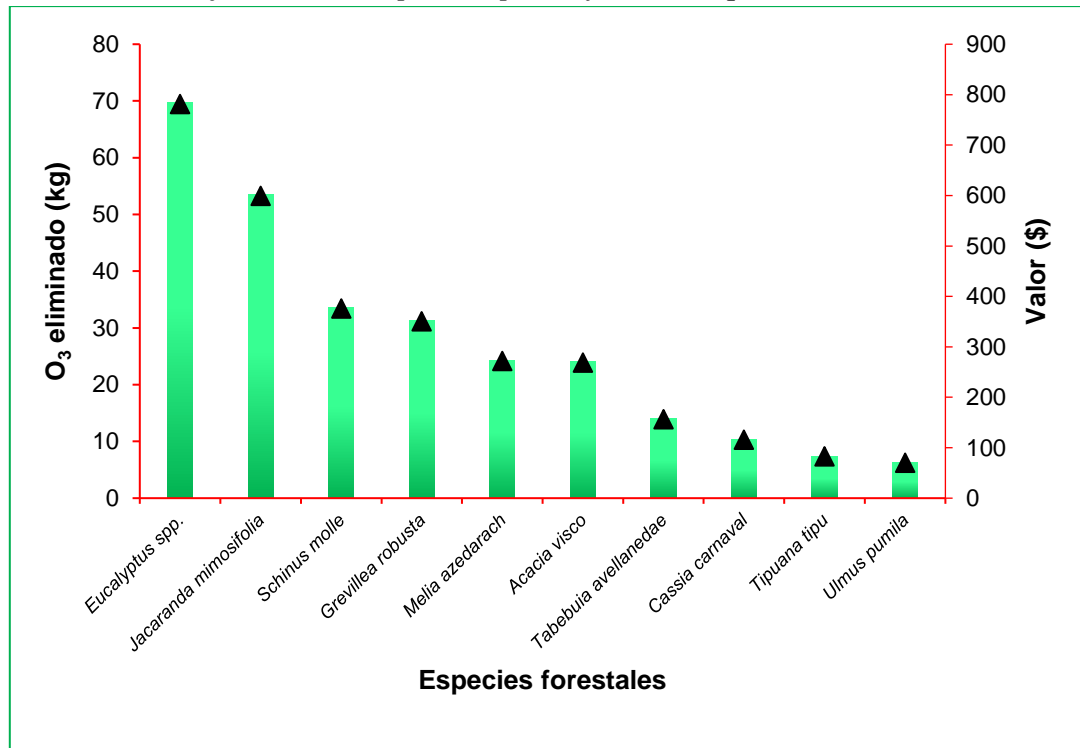
Gráfico 21. Principales especies forestales que eliminan $PM_{2.5}$



FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

El análisis muestra la cantidad de O_3 (ozono) eliminado y el valor monetario anual correspondiente para varias especies forestales. Entre las especies principales, *Eucalyptus spp.* lidera con una eliminación de 69,77 kg/año de O_3 , lo que representa un valor de \$781,16/año. *Jacaranda mimosifolia* sigue de cerca con 53,54 kg/año de O_3 eliminado, equivalente a \$599,39/año. Otras especies como *Schinus molle*, *Grevillea robusta* y *Melia azedarach* también contribuyen significativamente a la eliminación de O_3 . Además de las especies mencionadas, hay una variedad de árboles que contribuyen en menor medida a la eliminación de O_3 . En conjunto, estas especies han logrado eliminar un total de 321,83 kg/año de O_3 , lo que equivale a un valor monetario total de \$3603,05/año (ver Gráfico 22 y datos en Anexo 6).

Gráfico 22. Principales especies forestales que eliminan O₃

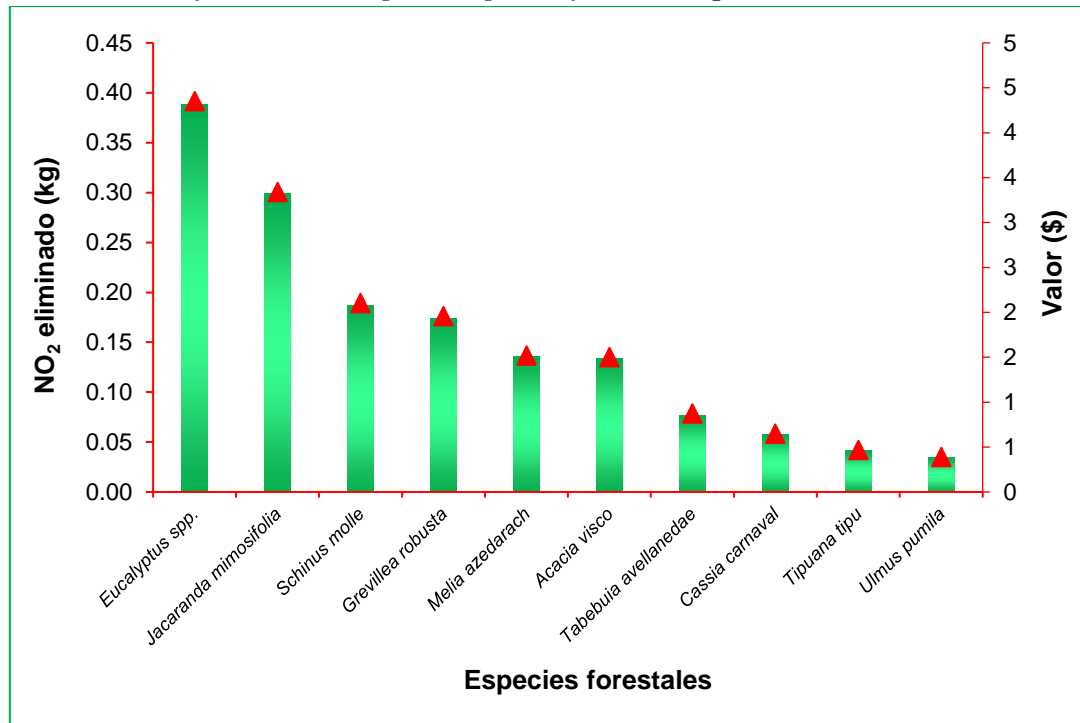


FUENTE: Elaboración propia, modelado con *i-Tree Eco*.

Las especies forestales que contribuyen en mayor medida a la eliminación de NO₂ (dióxido de nitrógeno) y sus valores monetarios correspondientes anuales son *Eucalyptus spp.* con 0,389 kg/año (\$4,352/año), *Jacaranda mimosifolia* con 0,299 kg/año (\$3,341/año), *Schinus molle* con 0,187 kg/año (\$2,102/año), *Grevillea robusta* con 0,174 kg/año (\$1,958/año) y *Melia azedarach* con 0,135 kg/año (\$1,520/año). En total, todas las especies forestales mencionadas eliminan aproximadamente 1,792 kg de NO₂ anualmente, lo que equivale a un valor monetario de \$20,103/año (ver Gráfico 23 y datos en Anexo 6).

La contribución de las especies forestales en la eliminación de PM_{2.5}, O₃ y NO₂ es crucial para mejorar la calidad del aire en áreas urbanas. Además, se destaca que el aumento en la cobertura arbórea ayuda a disminuir la formación de ozono, contrarrestando así los posibles efectos negativos de los compuestos orgánicos volátiles emitidos por los árboles.

Gráfico 23. Principales especies forestales que eliminan NO₂.



FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

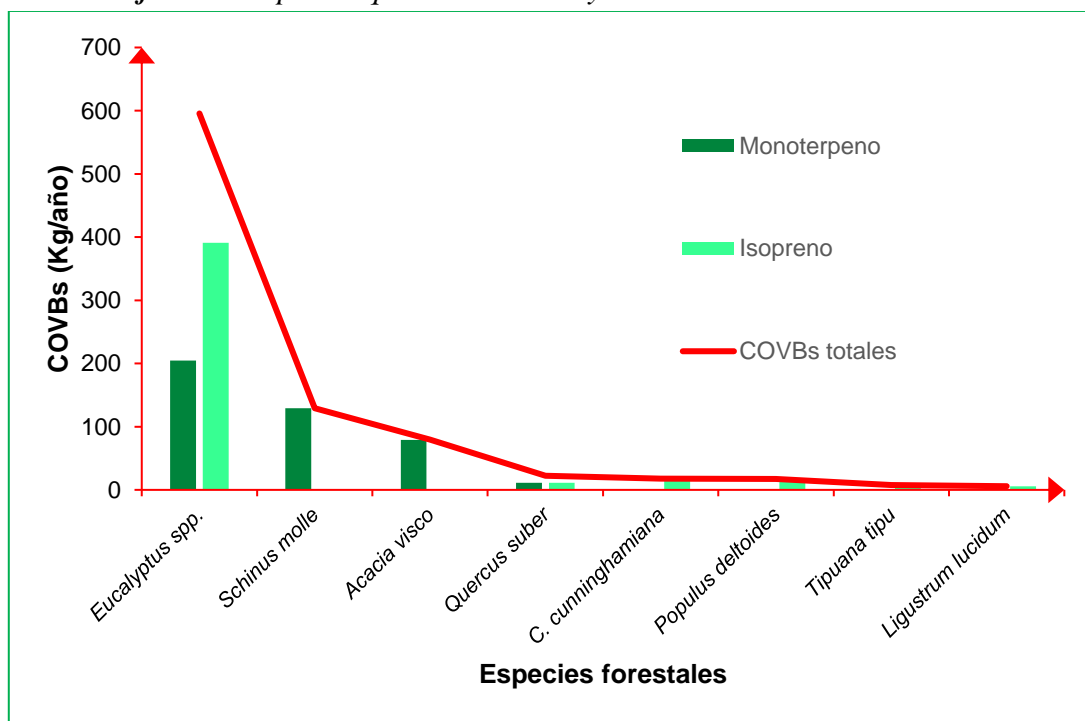
De acuerdo a la simulación individual con i-Tree Eco, con el fin de determinar que especies forestales contribuyen en mayor medida en la eliminación de contaminación atmosférica en términos de PM_{2.5}, O₃ y NO₂, se identificó a las siguientes. *Fraxinus excelsior* encabeza la lista con un potencial de eliminación de 324,90 kg/año de contaminación, seguido de cerca por *Fraxinus americana* con 310,60 kg/año. *Ligustrum lucidum* se ubica en el tercer lugar con 296,80 kg/año, mientras que *Quercus suber* y *Populus deltoides* ocupan el cuarto y quinto lugar respectivamente, con 295,90 kg/año y 278,60 kg/año de contaminación que puede eliminar. Otros árboles destacados incluyen a *Acer negundo* (265,90 kg/año), *Pinus canariensis* (256,50 kg/año), *Acacia visco* (253,40 kg/año), *Pinus patula* (252,90 kg/año) y *Quercus robur* (248,20 kg/año). Estas especies arbóreas son reconocidas por su capacidad para reducir la contaminación atmosférica y mejorar la calidad del aire en términos de partículas finas (PM_{2.5}), ozono (O₃) y dióxido de nitrógeno (NO₂) (ver datos en Anexo 9).

3.2.4. Emisión de Compuestos Orgánicos Volátiles Biogénicos (COVB's)

Según modelación con i-Tree Eco, el arbolado emite aproximadamente 923,60 kilogramos de COVBs por año, donde 466,00 kilogramos corresponde a monoterpenos y 458,00 kilogramos a isoprenos. En cuanto a las especies que más contribuyeron en estas emisiones, *Eucalyptus spp.* emite la mayor cantidad de COVBs, con 204,50 kilogramos de monoterpenos y 391,30 kilogramos de isopreno con un total de 595,80 kilogramos, seguida de *Schinus molle* que contribuye con 129,10 kilogramos de monoterpenos y *Acacia visco* con 79,40 kilogramos de COVBs totales. Por otro lado, *Prosopis alba*, *Fraxinus americana*, *Jacaranda mimosifolia*, *Podocarpus parlatorei*, *Pseudobombax ellipticum*, *Chorisia speciosa*, *Eriobotrya japonica*, *Brachychiton populneus* y *Bauhinia candicans* son las especies que menos COVBs emiten, sin presentar emisiones significativas de COVBs (ver Gráfico 24 y datos en Anexo 8).

Estos hallazgos son importantes para la planificación urbana y la selección de especies vegetales en la reducción de la contaminación ambiental.

Gráfico 24. Especies que más contribuyen a la emisión de COVBs anual



FUENTE: Modelado con i-Tree Eco.

3.2.5. Efectos hidrológicos

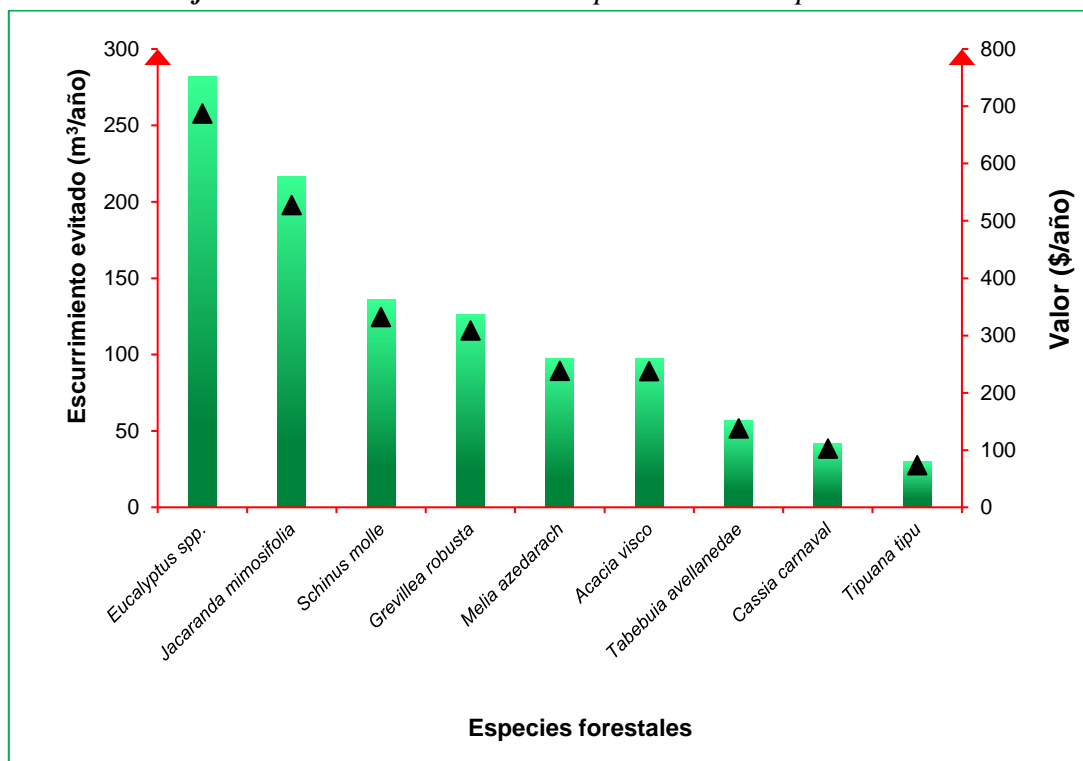
3.2.5.1. Esgurrimiento evitado

El esgurrimiento evitado por los árboles urbanos se refiere a la capacidad de los árboles y su estructura arbórea para reducir el flujo de agua superficial que se produce durante las lluvias o precipitaciones en entornos urbanos. En lo cual, con el objetivo de obtener datos más precisos, se planteó la necesidad de corregir los datos proporcionados por i-Tree Eco al notar que existe una gran cantidad de superficie impermeable en el área de estudio, lo cual tenía un impacto en el aumento de la esgorrentía. Para llevar a cabo esta corrección, se utilizó un Sistema de Información Geográfica (SIG), específicamente ArcGIS, para cuantificar el área permeable. Los resultados obtenidos mostraron una superficie permeable de 5 hectáreas aproximadamente y con una pendiente media del 1%. La cobertura determinada por i-Tree Eco es de 8,76 hectáreas. Esta diferencia entre la superficie permeable y la cobertura equivalía a un 57% (factor de corrección 0,57). Con esta información en cuenta, se procedió a corregir los datos proporcionados por i-Tree Eco utilizando el factor de corrección mencionado anteriormente. Es importante destacar que i-Tree Eco no había tenido en cuenta la superficie permeable, la pendiente del terreno y otros factores que influyen en el ciclo hidrológico, como la intercepción por la superficie cortical.

i-Tree Eco simula la esgorrentía que se produciría en un área específica sin la presencia de árboles, y luego compara esos resultados con la esgorrentía cuando se introducen árboles en el área. Esta herramienta considera la precipitación anual registrada, que en este caso fue de 593 milímetros. La diferencia entre la cantidad de esgorrentía en ambos escenarios representa el esgurrimiento evitado por los árboles, es decir, la cantidad de agua adicional que se retiene y evita que fluya superficialmente debido a la presencia de los árboles. Los resultados indicaron que los árboles ayudaron a reducir el esgurrimiento en aproximadamente **1300,74 m³ por año**, en línea con las correcciones aplicadas. Inicialmente, el modelo i-Tree Eco había estimado un esgurrimiento evitado de 2282 m³ por año. Este resultado demostró cómo la presencia de árboles en entornos urbanos contribuyó a mitigar el flujo de agua superficial.

Asimismo, se asoció un valor económico de **\$3173,81 por año** a este escurrimiento evitado. Esta cifra reflejaba los beneficios económicos derivados de la reducción del escurrimiento, como la prevención de daños por inundaciones, la protección de infraestructuras y la disminución de los costos relacionados con la gestión de aguas pluviales. En el área de estudio, se encontraron diversas especies forestales que desempeñaron un papel significativo en la reducción del escurrimiento y generaron un valor económico asociado. Entre las especies más destacadas se encuentran el *Eucalyptus spp.*, *Jacaranda mimosifolia*, *Schinus molle*, *Grevillea robusta*, *Melia azedarach* y *Acacia visco*. Estas especies contribuyeron de manera significativa al escurrimiento evitado corregido, alcanzando valores que van desde 281,75 m³/año hasta 97,47 m³/año, con valores económicos asociados que oscilan entre \$687,47/año y \$237,83/año. También es importante mencionar que existen otras especies presentes en el área de estudio, las cuales también jugaron un papel en la reducción del escurrimiento superficial (ver Gráfico 25 y datos extendidos en Anexo 6).

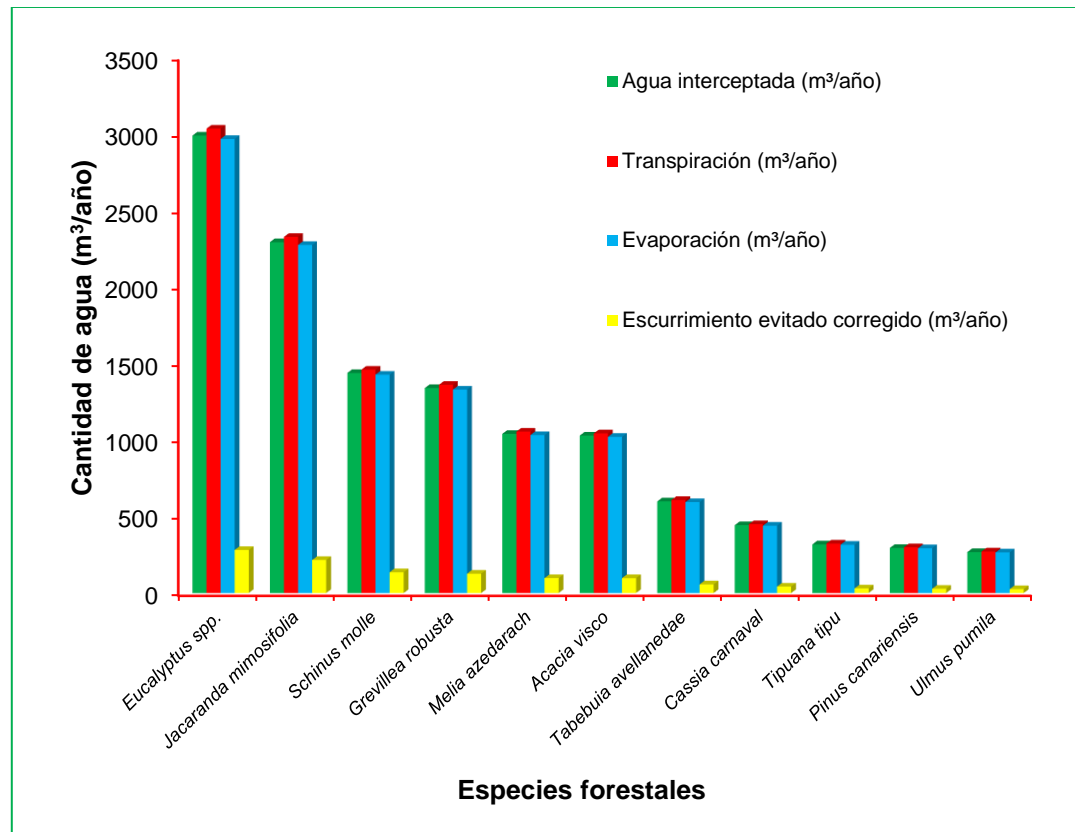
Gráfico 25. *Escurrecimiento evitado por los árboles para el 2019*



FUENTE: *Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.*

Es importante notar que *Eucalyptus spp.* muestra un mayor valor en el escurrimiento evitado y otros efectos hidrológicos, como la evapotranspiración. Esto se debe a su capacidad de absorción de agua, la forma de sus hojas que reduce la velocidad de la lluvia y su amplia cobertura en el área de estudio. Asimismo, cabe mencionar que esta especie presenta un alto valor de área foliar en el área de estudio.

Gráfico 26. Efectos hidrológicos del arbolado urbano



FUENTE: Elaboración propia, modelado con i-Tree Eco.

3.2.5.2. Agua interceptada

La interceptación se refiere al proceso en el cual los árboles capturan y retienen el agua de lluvia en sus superficies, como hojas, ramas y troncos, antes de que alcance el suelo. Según modelación con i-Tree Eco, los árboles interceptaron 13802,90 m³/año de agua. La especie *Eucalyptus spp.* presentó una mayor cantidad de agua interceptada, con 2991,30 m³/año (ver Gráfico 26 y datos en Anexo 7).

3.2.5.3. Transpiración

La transpiración es la cantidad de agua que se traslada a través de las plantas y se libera a la atmósfera. En este caso, los árboles transpiraron un total de 14022,40 m³/año, con la especie *Eucalyptus spp.* predominando con la mayor cantidad de agua transpirada, con 3037 m³/año (ver Gráfico 26 y datos en Anexo 7).

3.2.5.4. Evaporación

La evaporación es la cantidad de agua que se libera a la atmósfera desde la superficie de las plantas. Los árboles de la valoración ecosistémica, evaporaron un total de 13697,60 m³/año durante el año 2019. *Eucalyptus spp.* predomina con la mayor cantidad de agua evaporada, con 2969,00 m³/año (ver Gráfico 26 y datos en Anexo 7).

3.2.5.5. Posible evapotranspiración

La suma de la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas, que ocurriría si estuviera disponible una cantidad limitada de agua, es de 44949,16 m³/año. Se destaca que la gestión fue el factor clave en todos los efectos hidrológicos analizados (ver Gráfico 26).

3.3. Discusión

3.3.1. Sobre el secuestro y almacenamiento de carbono

Los resultados obtenidos del presente estudio revelan que el secuestro bruto de carbono anual es de 16,18 toneladas métricas, lo que se traduce en un valor asociado de \$226,53año⁻¹. Estos hallazgos son de gran importancia, ya que destacan el papel crucial de las especies evaluadas en la captura y almacenamiento de carbono.

El análisis reveló que estas especies en conjunto almacenan un total de 724,38 toneladas de carbono. Esto demuestra el potencial que tienen estas especies en la mitigación del cambio climático y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Es importante destacar el valor económico asociado al almacenamiento de carbono por parte de estas especies. Donde el valor económico asciende a \$10141,24. Estos resultados resaltan la importancia de considerar el valor económico de los servicios ecosistémicos en las decisiones relacionadas con la conservación y cuidado del arbolado urbano.

Sin embargo, es importante señalar que este estudio se enfocó únicamente en un conjunto específico de especies evaluadas. Sería interesante realizar investigaciones adicionales que abarquen un espectro más amplio de especies y de todo el arbolado de la ciudad de Tarija, para tener una comprensión más completa del potencial de secuestro de carbono y su valor económico.

Un estudio realizado por Benegas *et al.* (2021) en Turrialba, Costa Rica, analizó 18 especies de árboles y encontró que estos generan más de \$60 000 anuales a través de tres servicios ecosistémicos clave: secuestro y almacenamiento de carbono, y valor estructural. En lo cual destacan el valor económico que estos servicios representan y la necesidad de conservar y aumentar las áreas arboladas, especialmente las zonas ribereñas, para maximizar los beneficios ecosistémicos en las ciudades y avanzar hacia la sostenibilidad urbana.

3.3.2. Sobre la producción de oxígeno

Los árboles son conocidos por su capacidad de producir oxígeno a través del proceso de fotosíntesis, el cual está estrechamente relacionado con la cantidad de carbono que se acumula en su biomasa. Por lo cual, en el presente estudio se ha calculado que los árboles dentro del área evaluada son responsables de la producción de 43,13 toneladas métricas de oxígeno al año.

Sin embargo, es importante destacar que, en términos generales, el beneficio del oxígeno producido por los árboles es relativamente insignificante, ya que la atmósfera tiene una gran reserva de oxígeno y hay otros sistemas naturales, como los acuáticos, que también contribuyen significativamente a la producción de oxígeno. De hecho, se ha demostrado que incluso si se consumieran todas las reservas de combustibles fósiles, todos los árboles y toda la materia orgánica en el suelo, el oxígeno en la atmósfera solo se reduciría en un mínimo porcentaje (Broecker 1970, citado por Nowak D.J., 2021).

En conclusión, considero, aunque la producción de oxígeno por los árboles es relativamente insignificante en comparación con la gran reserva de oxígeno en la atmósfera y la producción de oxígeno por otros sistemas naturales, no debemos subestimar la importancia de este servicio ecosistémico que nos brinda los árboles.

3.3.3. Sobre el escurrimiento evitado

Los resultados de la evaluación del escurrimiento evitado por los árboles en áreas urbanas demuestran su capacidad para reducir significativamente el flujo de agua. Según los datos obtenidos, los árboles ayudan a reducir el escurrimiento en un promedio de 1300,74 metros cúbicos al año, lo que equivale a un valor económico de \$3173,81/año. Sin embargo, se destaca la importancia de realizar mediciones específicas en el sitio y utilizar modelos más detallados de hidrología urbana para obtener una estimación más precisa del escurrimiento evitado en la superficie corteza.

En este sentido, diversos estudios han demostrado que la presencia de árboles en áreas urbanas puede disminuir el flujo de agua de escorrentía y reducir el riesgo de

inundaciones. Según Nowak y Crane (2002), los árboles pueden reducir el flujo de agua de escorrentía en un 10-20% en comparación con áreas sin vegetación. Asimismo, Zhang et al. (2016) encontraron que la presencia de árboles puede reducir el escurrimiento superficial en un 31-38% en áreas urbanas.

No obstante, es importante destacar que la evaluación del escurrimiento evitado en la superficie corteza requiere un análisis más detallado y específico, que considere múltiples factores y herramientas especializadas. Según Kjaerulff et al. (2018), los modelos hidrológicos pueden ser útiles para estimar el escurrimiento evitado por los árboles en áreas urbanas, pero su aplicación requiere conocimientos técnicos y datos específicos del sitio. De esta manera, se puede obtener una estimación precisa y detallada del impacto de los árboles en el escurrimiento de agua en áreas urbanas.

El escurrimiento superficial es algo que puede ser preocupante en muchas áreas urbanas, ya que puede contribuir a la contaminación de cuerpos de agua como arroyos, humedales, ríos, lagos y océanos. Durante las lluvias, parte del agua es retenida por la vegetación, como los árboles y arbustos, mientras que el resto llega al suelo. Esta agua que llega al suelo puede arrastrar contaminantes y llevarlos a los cuerpos de agua cercanos, lo que representa un riesgo para el medio ambiente. La cantidad de la precipitación que llega al suelo y no se filtra se vuelve escurrimiento superficial (Hirabayashi, 2012 citado por (Nowak D. J., 2021)). En las áreas urbanas, la gran extensión de superficies impermeables aumenta la cantidad de escurrimiento superficial. Sin embargo, los árboles y matorrales urbanos son benéficos al reducir el escurrimiento superficial. Los árboles y matorrales interceptan la precipitación, mientras que sus sistemas de raíces promueven la infiltración y el almacenamiento en el suelo (Nowak D. J., 2021).

3.3.4. Sobre los compuestos orgánicos volátiles biogénicos (COVBs)

Los resultados obtenidos muestran que diferentes especies de árboles en áreas urbanas emiten compuestos orgánicos volátiles (COVBs) a la atmósfera, con una emisión total de aproximadamente 923,30 kilogramos por año, donde los monoterpenos representan 32 kilogramos y los isoprenos 457 kilogramos. Esta información es valiosa para los planificadores urbanos, quienes pueden utilizarla para seleccionar especies de árboles con menor emisión de COVBs y, de esta manera, reducir los impactos negativos sobre la calidad del aire y la salud pública, así como mejorar la calidad de vida de los ciudadanos. Además, la disminución de las emisiones de COVBs también puede proporcionar beneficios ecosistémicos adicionales como la regulación de la temperatura, la reducción del ruido, la captura de carbono y la biodiversidad.

Es importante destacar que los COVBs son sustancias químicas precursoras de la formación de ozono y otros contaminantes, lo que sugiere que las emisiones de COVBs pueden ser perjudiciales para la calidad del aire. La tasa de emisión varía según la biomasa de las hojas y las condiciones meteorológicas locales. Por lo tanto, el conocimiento de las emisiones específicas de las diferentes especies de árboles puede ser crucial para la gestión del arbolado urbano y la planificación de la infraestructura verde en áreas urbanas. En este sentido, los hallazgos presentados en este estudio pueden proporcionar una base sólida para la toma de decisiones informadas en relación a la selección de especies de árboles para su plantación y gestión en áreas urbanas. (Nowak D. J., 2021).

Finalmente cabe mencionar, que la emisión de COVBs por parte de los árboles no se considera un servicio ecosistémico en sí mismo, la gestión adecuada de los árboles y la selección de especies que emitan menos COVBs puede contribuir a mejorar la calidad del aire y otros servicios ecosistémicos importantes.

CAPÍTULO IV
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Se logró calibrar y adaptar el modelo de i-Tree Eco para la ciudad de Tarija, pero solo con datos de precipitación y contaminantes para la gestión 2019.
- Muchos beneficios de los árboles corresponden directamente con la cantidad de área superficial saludable de las hojas de las plantas, en lo cual los árboles cubren 8,76 has y proporcionan 45,11 hectáreas del área foliar, donde las especies con mayor valor de importancia son *Eucalyptus spp.*, *Jacaranda mimosifolia*, y *Schinus molle*, con predominio en especies nativas.
- Se consideró **cinco servicios ecosistémicos** principales, donde el almacenamiento de carbono por la población arbórea es de 724,38 toneladas, presentando un valor de \$10141,24, los árboles secuestran 16,18 toneladas métrica por año equivalente a un valor de \$226,53/año, en cuanto a la producción de oxígeno los árboles producen 43,14 toneladas de O₂/año, la eliminación de contaminantes fue de 329,01 kg asociado a un valor de \$3952, el escurrimiento evitado, fue de 1300,74 m³/año equivalente a un valor de \$3173,81/año.
- El estudio reveló una densidad de 163 árboles por hectárea y una biomasa arbórea de 150 toneladas por hectárea, equivalente a 75 toneladas de carbono por hectárea. Estos datos indican una alta cobertura arbórea y destacan el papel de los árboles en la captura de carbono y en la provisión de servicios ecosistémicos.

4.2. Recomendaciones

- Se recomienda el uso de la herramienta i-Tree Eco como una forma efectiva de evaluar cuantitativamente los beneficios del arbolado urbano, lo que puede ayudar a identificar áreas donde se requiere una mejor gestión y plantación de árboles. Asimismo, esta herramienta puede ofrecer información valiosa sobre la salud del arbolado y las especies más apropiadas para cada ubicación.
- Para poder estimar los servicios ecosistémicos de manera precisa, se recomienda tomar los datos de la estructura arbórea, en una manera minuciosa, concentrada y utilizando equipos calibrados, para el caso de medición del DAP, medición de alturas y estimación de los atributos de las copas, con el fin de no subestimar o sobreestimar estas medidas.
- Para garantizar el bienestar de los habitantes de la ciudad de Tarija, se debe garantizar una densidad adecuada de área verde por habitante, siguiendo las recomendaciones de la Organización de las Naciones Unidas. Para lograr esto, es necesario enfocarse en la protección del arbolado urbano existente, evitando la tala ilegal, el vandalismo y la poda excesiva. Además, se deben plantar especies adecuadas para el clima y el ambiente local, y asegurarse de plantarlos en áreas propicias para su crecimiento y desarrollo.
- Es crucial implementar programas de plantaciones forestales con especies que se determinen de mayor valor ecosistémico y otros beneficios. En este caso, se recomienda enfocarse en la implementación de especies nativas, ya que pueden contribuir de manera significativa a la conservación de la biodiversidad y al fortalecimiento de los ecosistemas locales. Además, es importante considerar la adaptabilidad de estas especies al entorno y su capacidad para brindar servicios ecosistémicos clave.