



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL
ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO (*CARBON STOCKS*)**

Victor José Gómez Ovalle

Asesorado por el Ing. Gustavo Estuardo Díaz Corzo

Guatemala, noviembre de 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL
ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO (CARBON STOCKS)**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

VICTOR JOSÉ GÓMEZ OVALLE

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO ESTUARDO DÍAZ CORZO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO AMBIENTAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2021

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Kevin Vladimir Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADORA	Licda. Ingrid Lorena Benítez Pacheco
EXAMINADORA	Inga. María Alejandra Ma Villatoro
EXAMINADOR	Ing. Walter Arnoldo Bardales Espinoza
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO (*CARBON STOCKS*)

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha 24 de enero de 2020.

Victor José Gómez Ovalle

Guatemala 27 de julio de 2021

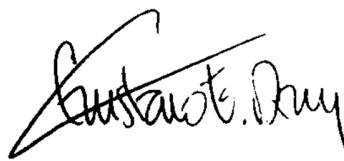
Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Presente.

Estimado Ingeniero Williams:

Le saludo cordialmente, deseándole éxitos en sus actividades. Por medio de la presente hago constar que he revisado y aprobado el Informe final del trabajo de graduación titulado: "DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO, (CARBON STOCKS)", elaborado por el estudiante de la carrera de Ingeniería Ambiental, Victor José Gómez Ovalle, quien se identifica con el registro académico 2015 03877 y con el CUI 2747 65675 0101.

Agradeciendo la atención a la presente, me suscribo de usted,

Atentamente,



Gustavo Estuardo Díaz Corzo
Ingeniero Agrónomo en
Recursos Naturales Renovables
Colegiado 4,188

Gustavo Estuardo Díaz Corzo
ASESOR
Ingeniero Agrónomo en Recursos Naturales
Colegiado activo no. 4,188



Guatemala, 15 de octubre de 2021.
Ref. EIQ.TG-IF.030.2021.

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Álvarez:

Como consta en el registro de evaluación, correlativo **068-2019**, le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL

Solicitado por el estudiante universitario: **Victor José Gómez Ovalle**.
Identificado con número de carné: **2747656750101**.
Identificado con registro académico: **201503877**.
Previo a optar al título de la carrera: **Ingeniería Ambiental**.
En la modalidad: **Informe Final, Seminario de Investigación**.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO, (CARBON STOCKS)

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por:

Gustavo Estuardo Díaz Corzo, profesional de la Ingeniería Agronómica

Habiendo encontrado el referido trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”


Ing. Jaime Domingo Carranza González
Colegiado No. 449



Jaime Domingo Carranza González
profesional de la Ingeniería Química
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación

C.c.: archivo

Guatemala, 15 de noviembre de 2021

Ref. EIQ.251.2021

Aprobación del informe final del trabajo de graduación

Ingeniera
Aurelia Anabela Cordova Estrada
Decana
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Revisado el INFORME FINAL DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN (TESIS), DENOMINADO **DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO (CARBON STOCKS)** del(la) estudiante Victor José Gómez Ovalle, se conceptúa que el documento presentado, reúne todas las condiciones de calidad en materia administrativa y académica (rigor, pertinencia, secuencia y coherencia metodológica), por lo tanto, se procede a la autorización del mismo, para que el(la) estudiante pueda optar al título de Ingeniería Ambiental.

"Id y Enseñad a Todos"



Ing. Williams G. Álvarez Mejía, M.I.Q., M.U.I.E.

DIRECTOR

Escuela de Ingeniería Química

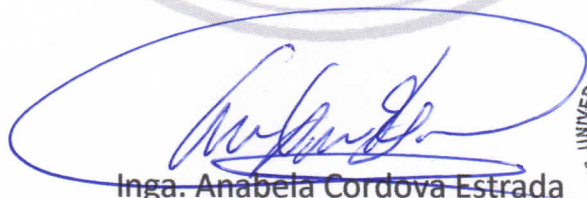
Cc. Archivo
WGAM/wgam



DTG.671.2021

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al Trabajo de Graduación titulado: **DETERMINACIÓN DE LA CAPTURA DE CARBONO Y PRODUCCIÓN DE OXÍGENO POR EL ARBOLADO URBANO CAPITALINO DE LA ZONA 9, EN ESTACIÓN SECA, MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL MÉTODO INDIRECTO (CARBON STOCKS)**, presentado por el estudiante universitario: **Victor José Gómez Ovalle**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2021

ACE/asga

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser la fuente de sabiduría y quien me brinda la capacidad de poder perseguir mis sueños a lo largo de mi vida.
Mis padres	Isauro Gómez y Luz Ovalle, por ser mi ejemplo, inspiración y todo el apoyo que me brindaron para cumplir esta meta.
Mis hermanas	Norma Gómez y Blanca Osoy, por compartir grandes momentos en mi vida, creer en mí y su apoyo incondicional en esta etapa de mi vida.
Toda mi familia	Por todo el amor, apoyo y darme el ejemplo, que con esfuerzo, ninguna meta parece imposible.
Guatemala	Porque a través de la belleza de sus paisajes, cultura, historia y gente, me dan la fuente de inspiración para alcanzar cualquier meta en nombre de este hermoso país.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala	Prácticamente mi segunda casa, donde me formé con los principios de investigación, estándares éticos y profesionales.
Facultad de Ingeniería	Por brindarme las herramientas necesarias para desarrollarme académicamente y todos los recursos para cumplir esta meta.
Municipalidad de Guatemala	Por la oportunidad de realizar este trabajo de graduación dentro de su equipo de trabajo.
Dirección de Medio Ambiente, Muniguat	Jonnathan Sicán e Inga. Beatriz Ramírez, por brindarme las herramientas y asesoría necesaria, además, de hacer mucho más amena esta investigación.
Mi asesor	Ing. Gustavo Díaz, por ser un guía constante en esta investigación.
Ing. Walter Bardales	Por todas esas dudas resueltas que fueron surgiendo en el desarrollo de esta investigación.
Mi equipo de trabajo	Eliette Pérez y Ana Sánchez, por todo el apoyo en cada uno de los procesos para el desarrollo de esta investigación y ser grandes amigas.

**Mis amigos de la
Facultad de Ingeniería**

Ximena Vargas, Paula Zuleta, Lizbette Hernández, Edwin Rivera, Lucía León, Mónica Mejía, Daniel Jerónimo, Rolando Ramos, por todas esas alegrías, apoyo y acompañarme en esta misión.

Mis amigos

Ángel Hernández, Jeimy Montoya y Rebeca Dávila, por ser parte de mi familia, por todo ese apoyo incondicional y, sobre todo, creer en mí.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	VII
GLOSARIO	IX
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
HIPÓTESIS.....	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Aspectos legales	1
1.2. Aspectos técnicos-científicos.....	4
2. JUSTIFICACIÓN	9
3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	11
3.1. Definición.....	11
3.2. Delimitación	11
4. MARCO TEÓRICO.....	15
4.1. La atmósfera.....	15
4.1.1. Composición de la atmósfera	15
4.2. Contaminación atmosférica	16
4.2.1. Fuentes de contaminación.....	16
4.2.2. Tipos de contaminantes.....	17
4.2.3. Gases contaminantes	18

4.3.	Sostenibilidad urbana.....	20
4.4.	Cambio climático.....	20
4.5.	Gases de efecto invernadero.....	21
4.5.1.	GEI directos.....	22
4.5.2.	GEI indirectos.....	22
4.6.	Servicios ambientales.....	23
4.6.1.	Árboles urbanos.....	24
4.7.	Ciclo del carbono.....	24
4.7.1.	Captura de dióxido de carbono.....	25
4.8.	Metodologías para la estimación de biomasa y carbono.....	28
4.8.1.	Método directo.....	28
4.8.2.	Método indirecto (<i>carbon stocks</i>).....	29
4.8.3.	Estudio de biomasa mediante imágenes satelitales.....	31
4.8.4.	Captura de carbono en árboles por medio de <i>i- treen design</i>	32
4.9.	Ecuaciones alométricas.....	34
5.	DISEÑO METODOLÓGICO.....	37
5.1.	Variables.....	37
5.1.1.	Variables independientes.....	37
5.1.2.	Variables dependientes.....	37
5.2.	Delimitación del campo de estudio.....	37
5.3.	Recursos humanos disponibles.....	38
5.4.	Recursos materiales disponibles.....	38
5.5.	Técnica.....	39
5.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	39
5.6.1.	Fase de gabinete inicial.....	39
5.6.2.	Fase de campo.....	40

5.6.3.	Fase de laboratorio.....	42
5.6.4.	Fase de procesamiento de datos.....	44
5.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	47
5.8.	Análisis de resultados.....	47
5.8.1.	Métodos y modelos de datos.....	47
5.8.2.	Programas utilizados para el análisis de datos.....	49
6.	RESULTADOS	51
6.1.	Densidad seca de las especies muestreadas del inventario forestal de la zona 9, Ciudad de Guatemala.....	51
6.2.	Captura de dióxido de carbono por especie	53
6.3.	Producción de oxígeno (O ₂) por especie	55
6.3.1.1.	Curvas de captura de carbono y ecuaciones alométricas	56
6.4.	Mapas de captura de carbono y producción de O ₂	63
7.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
7.1.	Análisis de la densidad seca de las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9	67
7.2.	Análisis de la captura de carbono por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9	68
7.3.	Análisis de la producción de O ₂ por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9	68
7.4.	Análisis de las curvas de captura de carbono y ecuaciones alométricas por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9.....	69

7.5.	Análisis de los mapas de captura de carbono y producción de O ₂ por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9	69
CONCLUSIONES.....		71
RECOMENDACIONES		73
BIBLIOGRAFÍA.....		75
APÉNDICES.....		81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Cambio climático y gases de efecto invernadero	21
2.	Emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo	23
3.	Ciclo de carbono	25
4.	Método directo o destructivo, toma de muestras	29
5.	Toma de muestras para determinar densidad, método indirecto	30
6.	Cobertura boscosa obtenida por teledetección	32
7.	Estimación de biomasa utilizando <i>i-tree design</i> V6.0	33
8.	Visita de reconocimiento	40
9.	Toma de muestra	41
10.	Muestra de árbol especie <i>Magnolia grandiflora</i>	42
11.	Identificación y peso de muestras	42
12.	Tarado y secado de muestras	43
13.	Toma de medidas para determinar volumen de muestras	44
14.	Curvas de distribución de densidad seca	52
15.	Captura de carbono equivalente por especies	54
16.	Producción de oxígeno por especie	56
17.	Curva de captura carbono para especie hormigo.....	57
18.	Curva de captura de carbono para especie manzana rosa.....	57
19.	Curva de captura carbono para especie jacaranda.....	58
20.	Curva de captura de carbono para especie ficus	58
21.	Curva de captura de carbono para especie matilisguate	59
22.	Curva de captura de carbono para especie matasano.....	59
23.	Curva de captura de carbono para especie trueno	60

24.	Curva de captura carbono para especie calistemo	60
25.	Curva de captura de carbono para especie ciprés común	61
26.	Curva de captura de carbono para especie casuarina.....	61
27.	Curva de captura de carbono para especie magnolia.....	62
28.	Curva de captura de carbono para especie eucalipto	62
29.	Mapa de captura de carbono por el arbolado urbano	64
30.	Mapa de producción de O ₂ por el arbolado urbano.....	65

TABLAS

I.	Componentes de la atmósfera (volumen/volumen).....	15
II.	Relación de la captura de carbono, DAP y especie en Tijuana	26
III.	Densidad seca de especies muestreadas (mg/cm ³)	51
IV.	Captura de carbono por especies	54
V.	Producción de oxígeno por especie	55
VI.	Parámetros estadísticos y ecuaciones alométrica por especie.....	63

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
AT	Altura total
BS	Biomasa seca
C	Carbono
cm	Centímetro
DS	Densidad seca
S	Desviación estándar por muestra
DAP	Diámetro a la altura del pecho
DC	Diámetro de copa
CO₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
Kg	Kilogramo
CH₄	Metano
m³	Metro cúbico
mm	Milímetro
O₂	Oxígeno molecular
V	Volumen

GLOSARIO

Adaptación	Ajuste en los sistemas naturales y humanos que se presenta como respuesta al cambio climático, el cual disminuye los daños o potencia las oportunidades de intervención.
Biomasa forestal	Peso de la materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima del suelo.
Cambio climático	Cambio del clima atribuido directa o indirectamente a actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera mundial.
Captura de carbono	Captura de dióxido de carbono de la atmósfera por procesos diversos, particularmente de la fotosíntesis.
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
Densidad básica	El cociente entre el peso anhidro de una muestra de madera y su volumen verde o saturado.
Diámetro a la altura del pecho (DAP)	Diámetro del círculo que se aproxima a la forma de la transversal del tronco de un árbol.

Gases de efecto invernadero (GEI)	Gases integrantes de la atmósfera, de origen natural o producido por acciones humanas, que absorben la energía solar reflejada por la superficie de la tierra.
Grupo intergubernamental de expertos sobre el climático	Organización intergubernamental de las Naciones Unidas, cuya misión es proveer al mundo con una opinión objetiva y científica sobre el cambio climático, sus impactos y riesgos naturales, políticos y económicos y las opciones de respuesta posibles.
IPCC	Panel intergubernamental de expertos en cambio climático.
Mitigación	Actividades que limitan las emisiones GEI o aumentan la captura de carbono en los sumideros, con la intención de disminuir o prevenir los impactos climáticos futuros en la sociedad.
OMS	Organización Mundial de la Salud.
Organización Mundial de la Salud	Organismo de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), especializado en gestionar políticas de prevención, promoción e intervención en salud a nivel mundial.
Servicio ambiental	Beneficio que la sociedad recibe de los bienes naturales y ecosistemas.

Vulnerabilidad

Medida en que un sistema es capaz o incapaz de afrontar los efectos negativos del cambio climático.

RESUMEN

En la presente investigación se desarrolló una metodología para que esta pueda ser utilizada en la cuantificación del carbono que es capturado o secuestrado por las especies forestales y, a su vez, la determinación de la producción de oxígeno (O₂).

Para la cuantificación del carbono capturado y la producción de oxígeno (O₂), fue utilizada una metodología mixta, la cual emplea el método indirecto (uso de ecuaciones propuestas por la IPCC) y la toma de muestras representativas en campo de cada especie para determinar la densidad seca en laboratorio. La validación metodológica fue posible, al utilizar la masa forestal que se encuentra en la zona 9, de la Ciudad de Guatemala, durante la época seca (febrero-abril) del 2019. Los datos obtenidos en campo y laboratorio fueron sometidos a un análisis estadístico descriptivo para establecer la variabilidad existente entre ellos. Luego con métodos de regresión no lineal, particularmente el modelo potencial, fue posible la construcción de 12 ecuaciones alométricas.

En el desarrollo de esta metodología permitió determinar la cantidad de 1 027,26 toneladas de carbono capturado y una producción de 2 739,70 toneladas de oxígeno (O₂), dentro de la zona de estudio, además, con las ecuaciones alométricas es posible estimar con alto grado de confianza la captura de carbono de árboles de la misma especie que estén ubicados en el resto de las zonas de Ciudad de Guatemala, ya que el coeficiente de determinación (R²) para las 12 ecuaciones es superior a 0,8647.

OBJETIVOS

General

Determinar la captura de carbono y producción de oxígeno por el arbolado urbano capitalino de zona 9, Ciudad de Guatemala, utilizando el método indirecto (*carbón stocks*) durante la época seca.

Específicos

1. Determinar la densidad seca promedio para cada especie arbórea estudiada del inventario forestal urbano capitalino de la zona 9, en época seca.
2. Determinar el total de carbono capturado por cada especie arbórea estudiada del inventario forestal urbano capitalino de la zona 9, en época seca.
3. Cuantificar el total de oxígeno (O₂) que es liberado a la atmósfera por cada especie arbórea estudiada del inventario forestal urbano capitalino de la zona 9, en época seca.
4. Desarrollar una ecuación alométrica para cada especie arbórea estudiada del inventario forestal urbano capitalino de la zona 9, en época seca.

5. Elaborar mapas cartográficos que representen la cantidad de carbono que es capturado y la producción de oxígeno en la zona 9 de la Ciudad de Guatemala, con el uso de sistemas de información geográfica.

HIPÓTESIS

Es posible determinar la cantidad de carbono que es capturado y la cantidad de oxígeno (O_2) que es producido por el arbolado urbano capitalino de la zona 9 de la Ciudad de Guatemala, utilizando el método indirecto (*carbon Stocks*).

Hipótesis nula:

No es posible determinar la cantidad de carbono que es capturado y la de oxígeno (O_2) que es producido por el arbolado urbano capitalino de la zona 9 de la Ciudad de Guatemala, con el método indirecto (*carbon stocks*).

Hipótesis alternativa:

Es posible determinar la cantidad de carbono que es capturado y la cantidad de oxígeno (O_2) que es producido por el arbolado urbano capitalino de la zona 9 de la Ciudad de Guatemala, utilizando el método directo.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años ha habido un aumento en la temperatura de la Tierra, este fenómeno se relaciona directamente con el cambio climático antropogénico, problemática que tiene como causa el aumento de gases de efecto invernadero (GEI) de los cuales las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) son las más dominantes, agregado a esto, la pérdida de sumideros naturales de carbono, a causa del crecimiento urbano, aumenta la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático.

Entre la variedad de ecosistemas presentes, los forestales son importantes como reservorios de carbono, ya que los árboles retienen altas cantidades de este elemento al intercambiar carbono con la atmósfera a través de los procesos fotosintéticos. Este proceso de fotosíntesis fija de forma natural el carbono y, a su vez, mitiga el problema del cambio climático.

Para la elaboración de dicho estudio se evaluaron 12 especies del arbolado urbano de la Municipalidad de Guatemala ubicadas en zona 9. Dado que es el espacio donde el tránsito vehicular es altamente denso, además, es una de las zonas con mayor cobertura de árboles municipales del departamento, dato relevante para la construcción de las ecuaciones alométricas.

Para conocer la cantidad de carbono que ha sido capturado por estas especies, se utilizó una metodología mixta que incluye el método indirecto (carbon *stocks*) y la toma de muestras con el barreno de incremento de los individuos representativos para cada especie, y posteriormente, determinar la densidad básica en laboratorio; y mediante el uso de ecuaciones propuestas por

la IPCC, determinar la cantidad de carbono que es capturado por el árbol en estudio, luego se realizaron los análisis estadísticos donde se determinaron los parámetros de confianza, como el coeficiente de determinación R^2 , y así construir las ecuaciones alométricas con un grado de confianza aceptable.

Para el primer capítulo se exponen los estudios tanto nacionales como extranjeros, que han tratado el ámbito temático de esta investigación, además, los aspectos legales. En el segundo se presentan los hechos que justifican la importancia de conocer las medidas y acciones a tomar para la adaptación al cambio climático. En el tercer capítulo se realizó la determinación del problema.

En el cuarto capítulo se muestran los fundamentos teóricos que sustentan esta investigación. En el quinto se describe la metodología utilizada para la elaboración de dicha investigación.

En el sexto capítulo se presentan los resultados obtenidos, los cuales son discutidos e interpretados en el séptimo capítulo.

1. ANTECEDENTES

1.1. Aspectos legales

En Guatemala, la regulación de la contaminación atmosférica inició con la creación del artículo 97, sobre el medio ambiente y equilibrio ecológico, dentro de la Constitución Política de la República de Guatemala, el 31 de mayo de 1985.

El Estado, las municipalidades y los habitantes del territorio nacional están obligados a propiciar el desarrollo social, económico y tecnológico que prevenga la contaminación del ambiente y mantenga el equilibrio ecológico. Se dictarán todas las normas necesarias para garantizar que la utilización y el aprovechamiento de la fauna, de la flora, de la tierra y del agua, se realicen racionalmente, evitando su depredación¹.

Por lo anterior, la responsabilidad de velar por mantener un ambiente adecuado y en equilibrio con el desarrollo humano, es compartida entre el Estado, municipalidades y sus habitantes.

Debido a que la Constitución Política de la República de Guatemala contenía generalidades en temática ambiental, en diciembre de 1986 se publica el Decreto 68-86 Ley de Protección y Mejoramiento del Medio Ambiente, el cual contiene directrices específicas para los diferentes sistemas ambientales. Particularmente para el sistema atmosférico (título III de los sistemas y elementos ambientales, capítulo I, del sistema atmosférico), se establece el artículo 14:

Para prevenir la contaminación atmosférica y mantener la calidad del aire, el Gobierno, por medio de la presente ley, emitirá los reglamentos correspondientes y dictará las disposiciones que sean necesarias para:

¹ MARN. *Acuerdo Gubernativo 137-2016. Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental*. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/4739.pdf>. Consulta: 20 de febrero de 2020.

a) Promover el empleo de métodos adecuados para reducir las emisiones contaminantes; b) Promover en el ámbito nacional e internacional las acciones necesarias para proteger la calidad de la atmósfera; c) Regular las substancias contaminantes que provoquen alteraciones inconvenientes de la atmósfera; d) Regular la existencia de lugares que provoquen emanaciones; e) Regular la contaminación producida por el consumo de los diferentes energéticos; f) Establecer estaciones o redes de muestreo para detectar y localizar las fuentes de contaminación atmosférica; g) Investigar y controlar cualquier otra causa o fuente de contaminación atmosférica².

Luego, después de 6 años (noviembre de 1992), en la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, Guatemala se suscribe y pasa a formar parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático CMNUCC:

Reconoce que los cambios del clima de la Tierra y sus efectos adversos son una preocupación común de toda la humanidad, “conscientes de la función y la importancia de los sumideros y los depósitos naturales de gases de efecto invernadero para los ecosistemas”, en el artículo 4 de dicho convenio, Guatemala se compromete elaborar, actualizar y publicar inventarios nacionales de las emisiones antropogénicas por las fuentes y de la absorción por los sumideros de todos los gases de efecto invernadero, además, formular programas nacionales que contengan medidas orientadas a mitigar el cambio climático³.

En 1996 se publica el Decreto Ley Forestal 101-96, creado por la necesidad de establecer control de los recursos forestales en Guatemala, ya que estos están íntimamente ligados con el desarrollo económico y social del país. Los objetivos de la Ley Forestal buscan reducir la deforestación a través del aumento en cobertura forestal, propiciando su conservación e incrementando la productividad mediante un manejo racional y sostenido, mejorando el nivel de vida de los habitantes, garantizando los bienes y servicios provenientes de los bosques.

² Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. *Decreto 68-86. Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente*. <http://www.infom.gob.gt/archivos/gobierno-abierto/compendio/LEY%20DE%20PROTECCION%20Y%20MEJORAMIENTO%20DEL%20MEDIO%20AMBIENTE.pdf>. Consulta: 20 de febrero de 2020.

³ ONU. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. <https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>. Consulta: 20 de febrero de 2020.

En 1997, Guatemala nuevamente participa en la CMNUCC, denominada Protocolo de Kioto que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), y los otros tres son tipos de gases industriales fluorados: los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). En este protocolo se acordó una reducción de al menos un 5 %, de las emisiones de estos gases en 2008-2012, en comparación con las emisiones de 1990.

Esto no significa que cada país se comprometía a reducir sus emisiones de gases regulados en un 5 % como mínimo, este es un porcentaje correspondiente a un compromiso global y cada país suscribiente del protocolo tenía sus propios compromisos de reducción de emisiones. El protocolo entró en vigor hasta el 16 de febrero de 2005. En noviembre de 2009 eran 187 los estados que lo habían ratificado. Estados Unidos, que era cuando se firmó el protocolo el mayor emisor de gases de invernadero (desde 2005 es China), nunca lo ratificó.

Durante la reunión de los países miembros del Sistema de Integración Centroamericana, reunidos en San Pedro Sula, Honduras, en mayo del 2008, Guatemala, también acordó afrontar coordinadamente los impactos y efectos del cambio climático, utilizando los lineamientos de la Estrategia Regional de Cambio Climático; además, reconoció la necesidad de construir nuevas plataformas financieras y legales para enfrentar los desafíos del desarrollo en medio de la adaptación forzosa a la variabilidad climática.

En octubre de 2013 se publica el Decreto Legislativo 07-2013 *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases efecto invernadero*, el objeto de esta ley es establecer las regulaciones necesarias para prevenir, planificar y

responder de manera urgente, adecuada, coordinada y sostenida a los impactos del cambio climático. Asimismo, dicha normativa tiene como fin principal que el Estado, a través de sus entidades descentralizadas, autónomas, las municipalidades, la sociedad civil organizada y la población en general, adopten prácticas que reduzcan la vulnerabilidad. Para lo cual, a través del artículo 7, indica:

Investigación. Todas las entidades del sector público que se dediquen a la investigación y aplicación científica y tecnológica, de diseñar e implementar planes, programas, proyectos y acciones para: mejorar la gestión de riesgo, reducir la vulnerabilidad, mejorar la adaptación y reducir la emisión de GEI⁴.

En 2015, Guatemala se suscribe al Acuerdo de París (entra en vigor en 2016), el cual presenta un plan de actuación para limitar el calentamiento del planeta muy por debajo de 2 °C, y cubre el periodo posterior a 2020. En función de lo anterior, los pilares fundamentales de este acuerdo son: mitigación y adaptación, siendo para Guatemala el más importante, mitigación, ya que a partir de los esfuerzos de reducción de emisiones que Guatemala comunique en su contribución nacionalmente determinada (NDC) accederá a fuentes de financiamiento para lograr la aplicación efectiva del presente acuerdo. Como país, hay que adoptar medidas para conservar y aumentar, según corresponda, los sumideros y depósitos de todos los gases de efecto invernadero no controlados por el Protocolo de Montreal, inclusive la biomasa, los bosques.

1.2. Aspectos técnicos-científicos

Los primeros estudios realizados en materia de calidad del aire en Guatemala, se llevaron a cabo en 1971, a través del proyecto *Investigación*

⁴ Consejo Nacional de Cambio Climático. *Líneas de investigación en cambio climático*. <http://redfia.usac.edu.gt/wp-content/uploads/2019/09/lineas-de-investigacio%CC%81n-en-cambio-climatico.pdf>. Consulta: 20 de febrero de 2020.

preliminar de los contaminantes gaseosos y sólidos en las zonas de mayor tráfico del área urbana de la Ciudad de Guatemala, elaborado por la Escuela Regional de Ingeniería Sanitaria de la Universidad de San Carlos de Guatemala. En dicho estudio se investigaron ocho contaminantes gaseosos y diez sólidos. Estos fueron el dióxido de nitrógeno, ácido fluorhídrico, cloro, anhídrido sulfuroso, ozono, amoníaco, formaldehído y ácido sulfúrico.

Los contaminantes sólidos estudiados fueron el plomo, cobre, mercurio, cromatos, selenio, hierro, níquel, fosfatos y arsénico. Estos se seleccionaron debido a que, en la Ciudad de Guatemala, las principales actividades que probablemente se constituían en fuentes de emisión de contaminantes del aire, eran los vehículos automotores y las actividades industriales. Los resultados obtenidos mostraron que, de dichos contaminantes, el gas dióxido de nitrógeno y el gas anhídrido sulfuroso, rebasaron el límite mínimo normal de $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ valor guía sugerido por la Organización Mundial de la Salud -OMS-, que expresa la cantidad de un contaminante presente en el aire, a partir de la cual puede existir un impacto negativo para la salud humana.

En el 2002, Carlos González realizó un ensayo doctoral titulado *Beneficios del arbolado urbano*, en este, el autor relata sobre cómo la perspectiva de las metrópolis han ido cambiando desde la Cumbre de la Tierra y la preocupación de las ciudades en adoptar el término desarrollo sostenible, por ello el autor describe los efectos del arbolado urbano en la calidad del aire, donde describe que las tres formas en las que el arbolado urbano afecta a la calidad del aire son: reducción de la temperatura, disminución de los contaminantes atmosféricos, emisión de compuestos orgánicos volátiles. Un ejemplo claro de los beneficios del arbolado en el tema de reducción de contaminantes es Nueva York en 1994, donde los árboles de la ciudad eliminaron aproximadamente 1 821 toneladas métricas de

contaminantes atmosféricos, suponiendo un ahorro para la sociedad de \$9,5 millones.

En el 2007, Marissa Montepeque realizó la investigación de tesis de licenciatura titulada *Estimación de biomasa y contenido de carbono en plantaciones de eucalyptus camaldulensis dehnh y actividades de conservación de los recursos naturales, en la empresa Pantaleón S. A.* En esta investigación se utilizó el método directo de derribo de individuos de dicha especie para la cuantificación de biomasa y carbono con un muestreo de 20 individuos en cuatro diferentes edades (4, 6, 8 y 15 años), en secciones de fuste, ramas y hojas. Los resultados determinan que el fuste es la parte que mayor capacidad de captura de carbono está presente en los árboles de esta especie y, que a partir de esto, la captura de carbono tiene el potencial de ser reconocida como un servicio ambiental que brindan los rodales forestales (plantaciones y bosques naturales), para compensar y mitigar las concentraciones de GEI presentes en el sistema atmosférico.

Rosalino Diaz, junto a otros investigadores, en el 2007 publicaron un artículo de investigación titulado *Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en pinus patula Schl. et Cham* en la cual seleccionaron 25 árboles de dicha especie para ajustar al modelo matemático $Y = b \cdot X^k$ tomando como variable independiente X el diámetro normal (DN), las variables b y k son parámetros de ajuste para la ecuación alométrica. En dicho documento los autores afirman que la preferencia por este modelo se debe a que expresa una proporcionalidad de los incrementos relativos entre dos componentes del árbol, y, además es ampliamente consistente para distintas formas de crecimiento.

Eleodoro Kilcán en el 2013 realizó la investigación de tesis de licenciatura titulada *Estimación del carbono almacenado en el bosque latifoliado de la comunidad Se'tzol, sierra Santa Cruz, Livingston, Izabal, Guatemala, C. A.*, en esta investigación el autor realiza un inventario forestal del área en estudio, estableciendo una muestra para determinar con el método indirecto (uso de ecuaciones) biomasa y captura de carbono por los árboles. Por lo anterior establece que la captura de carbono de un rodal puede ser expresado en términos de dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}) y al mismo tiempo compensar las emisiones de GEI presentes en el área de estudio (huella de carbono).

Eulogio Pimienta, junto a otros investigadores publicaron la revista científica titulada *Servicios ambientales de la vegetación en ecosistemas urbanos en el contexto del cambio climático*, esta revista explica el crecimiento urbano que ha tenido la ciudad de Guadalajara y cómo las emisiones de las fuentes móviles aportan al incremento de la temperatura; además, habla sobre los porcentajes bajos de cobertura vegetal en la ciudad, de manera que el estudio se delimita en evaluar las especies de árboles que poseen una mayor eficiencia en la captura de carbono, para la correcta selección de especies arbóreas con el propósito de usarlas en la reforestación de esta urbe, con el fin de reducir la contaminación del aire y mitigar los efectos del cambio climático.

En el 2014, César Ruiz y otros investigadores publicaron una revista científica titulada *Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México*, donde analizan dos metodologías para estimar la biomasa de especies forestales, las cuales son: el directo (medir los parámetros básicos de un árbol, como, diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), altura total (AT, m), y al derribarlo se calcula la biomasa pesando cada uno de los componentes: fuste, ramas, raíces y follaje) y el indirecto (cúbica y estima el volumen del fuste

de un árbol con fórmulas, tomando muestras del árbol y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, por medio de la gravedad o densidad específica).

Estas metodologías pueden complementar métodos recientes como el uso de imágenes satelitales. Los autores concluyen que la elección final del método a utilizar se determinará de acuerdo a los recursos existentes y las condiciones que presenten los ecosistemas del área en estudio. Entre ambos métodos el que muestra mejores resultados es el directo, puesto que se obtienen datos más precisos en el muestreo, la parte negativa de este método es el impacto ambiental alto, debido a que los árboles deben ser derribados.

Ana Domínguez, en el 2016 realizó la investigación de tesis titulada *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO₂ vehicular en Tijuana*, en ella utilizó el software *i-tree design* para la estimación de carbono fijado por las especies en el área de Tijuana, las conclusiones de esta investigación establecen que la capacidad de captura de CO₂ varía por especie, para este estudio la especie que más captura es *Eucalyptus globulus*. Otra premisa fue que el arbolado existente en los parques, estos únicamente fijan el 0,08 % del CO₂ emitido por los vehículos automotores. Sin embargo, esto indicaba que existe una relación directa en la selección de especies y cobertura para compensar eficientemente las emisiones de GEI.

2. JUSTIFICACIÓN

La zona urbana de la Ciudad de Guatemala es donde se alberga la mayor parte de la población, lo que la convierte como una gran fuente de emisiones de gases efecto invernadero (GEI), principalmente por el uso de combustibles fósiles. Asimismo, Guatemala se encuentra en la zona de convergencia intertropical, lugar que lo hace muy vulnerable a los efectos del cambio climático, por lo tanto, es una ubicación estratégica para el desarrollo de proyectos de investigación, cumpliendo con el artículo 7 del Decreto ley 07-2013 *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero*, el cual textualmente dice:

Todas las entidades del sector público dedicadas al estudio investigación y aplicación científica y tecnológica, diseñarán e implementarán planes, programas, proyectos, acciones y actividades para mejorar la gestión de riesgo, reducir la vulnerabilidad, mejorar la adaptación y contribuir a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero⁵.

Por otro lado, la vegetación urbana (arbolado) puede actuar como un mecanismo natural de mitigación de los GEI en las ciudades. Con ello, los pequeños parques pueden actuar como sumideros de carbono naturales al capturar, almacenar CO₂ y liberar O₂; dada su naturaleza multifuncional, pueden mejorar la calidad de vida de sus habitantes por todos los servicios ambientales que ofrecen.

⁵ MARN. *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero*. <https://www.marn.gob.gt/Multimedios/2682.pdf>. Consulta: 9 de marzo de 2020.

3. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

3.1. Definición

En los últimos años, la Ciudad de Guatemala, como cualquier otra metrópoli en desarrollo, posee características particulares como: un acelerado crecimiento en la población, área de convergencia para la mayor parte de los habitantes de centros poblados periféricos, centralización de la mayoría de las dependencias estatales, concentración de un número significativo de fábricas, incremento del parque vehicular, entre otros. Cuando dichas características suceden o se interrelacionan entre sí, inciden directamente en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero -GEI- (CO_2 , NO_x , SO_x), los cuales en su mayoría son producto de la ignición interna de combustibles (fósiles o derivados).

Ante la problemática del incremento de emisiones de CO_2 es indispensable establecer o crear sumideros de carbono que mitiguen o reduzcan los GEI.

Uno de los principales sumideros resulta ser la vegetación arbórea. Lo anterior se debe a que en el proceso fotosintético las plantas captan carbono de la atmósfera en forma de CO_2 convirtiendo al carbono en biomasa y al oxígeno en molécula libre hacia la atmósfera⁶.

3.2. Delimitación

El estudio tuvo los siguientes alcances y límites:

⁶ DOMÍNGUEZ MADRID, Ana Yurendy. *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO_2 vehicular en Tijuana, B.C.* <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20141174/>. Consulta: 22 de marzo de 2020.

- Geográfico: arbolado urbano registrado en el inventario municipal de zona 9 de la Ciudad de Guatemala que comprende las siguientes calles y avenidas:
 - Calles: 16ª, 14ª, 13ª, 12ª, 11ª, 10ª, 9ª A, 9ª, 8ª, 6ª, 5ª, 4ª
 - Avenidas: Reforma, 7ª, 6ª, 6ª A, 5ª, 4ª, 3ª, 2ª, avenida la Castellana
- Personal: técnicos de la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de Guatemala, además, técnicos del laboratorio de suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos.

Dentro los límites encontrados fue la poca disponibilidad de equipo, motivo por el cual no se amplió el equipo de trabajo para finalizar en un menor tiempo la toma de muestras.

- Temporal: la fase de planeación se llevó a cabo durante el mes de febrero; Para la segunda quincena de marzo y la primera quincena de abril se llevó a cabo la toma de muestras en campo. La fase de laboratorio y análisis de resultados fueron desarrolladas durante la segunda quincena de abril y el en mayo del 2019.

Dentro las limitantes fue la solicitud y aprobación del equipo para recolectar las muestras en campo, razón por la que la toma de muestras se efectuó en la fecha descrita anteriormente.

- Temático: adaptación al cambio climático, especies arbóreas de la Ciudad de Guatemala las cuales son: *Callistemon speciosus*, *Tabebuia rosea*, *Jacaranda mimosifolia*, *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lusitánica*, *magnolia grandiflora*, *Ligustrum lucidum*, *Laurel benjamina*, *Casimiroa*

edulis, *Platymiscium dimorphandrum*, *Corymbia torelliana*, *Syzygium jambos* y el uso de las regresiones lineales para la elaboración de ecuaciones alométricas.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. La atmósfera

Es una envoltura de gases que rodea el planeta, es algo parecido a una máquina, expande y comprime gases, intercambia calor. La energía impulsora de esta máquina proviene del sol. La diferencia entre las entradas de calor en el ecuador y los polos determina la circulación general inicial de la atmósfera terrestre. La rotación de la Tierra, junto con las distintas conductividades térmicas de los océanos y tierras producen el clima.

4.1.1. Composición de la atmósfera

La atmósfera no ha tenido una composición constante a lo largo de la historia. La composición de la atmósfera inicial cambió paulatinamente de reductora a oxidante después de la aparición de los seres vegetales. Igualmente, la concentración de algunos gases como el CO₂ osciló dependiendo de la actividad vegetal.

Tabla I. Componentes de la atmósfera (volumen/volumen)

Componentes constantes		Componentes variables	
Nitrógeno	78 %	Dióxido de carbono	0,035 %
Oxígeno	20,95 %	Vapor de agua	0 – 4 %
Argón	0,93 %	Metano	trazas
Neón, helio, otros	0,0001 %	Dióxido de sulfuro	trazas
		Ozono	trazas
		Óxidos de nitrógeno	trazas

Fuente: MACKENZIE, Davis. *Ingeniería y ciencias ambientales*. p. 484.

4.2. Contaminación atmosférica

Se entiende por contaminación atmosférica a la presencia en la atmósfera de sustancias en una cantidad que implique molestias o riesgo para la salud de las personas y de los demás seres vivos, vienen de cualquier naturaleza. La contaminación atmosférica puede tener carácter local, cuando los efectos ligados al foco se sufren en las inmediaciones de este, o planetario, cuando por las características del contaminante, se ve afectado el equilibrio del planeta y zonas alejadas a las que contienen los focos emisores.

4.2.1. Fuentes de contaminación

Atendiendo a su origen, las fuentes de contaminación del aire se pueden agrupar en dos grupos: naturales y artificiales o antropogénicas.

- Naturales: comprenden las emisiones de contaminantes generados por la actividad natural de la geósfera, la biósfera y la atmósfera. Así:
 - Las erupciones volcánicas: una de las principales causas de contaminación, aportan a la atmósfera compuestos de azufre (SO_2 , H_2S) y una gran cantidad de partículas que se diseminan por ella como consecuencia de la acción del viento.
 - Los incendios forestales que se producen de forma natural y que emiten altas concentraciones de CO_2 , óxidos de nitrógeno, humo, polvo y cenizas.
 - Las descargas eléctricas generadas durante las tormentas y que dan lugar a la formación de óxidos de nitrógeno al oxidar el nitrógeno atmosférico.
 - El mar: que emite partículas salinas al aire.

- **Artificiales o antropogénicas:** son consecuencia de la presencia y actividades del ser humano. La mayor parte de la contaminación procede de la utilización de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas). Entre las actividades humanas generadoras de contaminación podemos destacar las siguientes:
 - En el transporte, el automóvil y el avión ocasionan un mayor grado de contaminación. El grado de contaminación provocada dependerá de la clase de combustible utilizado, del tipo de motor, del empleo de catalizadores y de la densidad del tráfico.
 - En la industria, el aporte de contaminación al aire depende del tipo de actividad, siendo las centrales térmicas, las cementeras, las papeleras y las químicas las más contaminantes.
 - La agricultura y ganadería, el uso intensivo de fertilizantes, el empleo de amplias superficies de regadío y la elevada concentración de ganado vacuno provoca un aumento en la atmósfera de gases de efecto invernadero, como el metano (CH₄).

4.2.2. Tipos de contaminantes

La composición química del aire se mantiene prácticamente constante debido a los procesos biogeoquímicos y a las transformaciones cíclicas en los que se integran sus componentes, los ciclos del carbono, nitrógeno, oxígeno, y azufre, especialmente. Se consideran contaminantes del aire a las sustancias químicas que en concentraciones determinadas pueden causar molestias, daños o riesgos a personas y el resto de los seres vivos. Dentro de este grupo de contaminantes hay que diferenciar entre primarios y secundarios, según sea su origen.

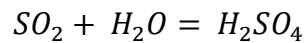
- Contaminantes primarios: sustancias de naturaleza y composición química variada, emitidas directamente a la atmósfera desde distintas fuentes perfectamente identificables, se incluyen dentro de este grupo: los aerosoles y humos, los compuestos de azufre como el dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno, como el monóxido de dinitrógeno (N₂O), óxidos de carbono, como el monóxido de carbono (CO), los metales pesados, como el plomo, mercurio, cadmio, los olores. Todos ellos constituyen más del 90 % de los contaminantes del aire.
- Contaminantes secundarios: se originan a partir de los contaminantes primarios mediante reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera, formando otros contaminantes nuevos por transformaciones de los ya existentes. Los más importantes son el SO₃, NH₂, SO₄, HNO₃, O₃ y los PAN (nitratos peroxiacetilo). Los contaminantes secundarios no provienen directamente de los focos emisores.

4.2.3. Gases contaminantes

- Monóxido de carbono: es uno de los productos de la combustión incompleta. Se diluye muy fácilmente en el aire ambiental, pero en un medio cerrado, su concentración lo hace muy tóxico, incluso mortal.
- Dióxido de carbono: es un gas incoloro. Este compuesto químico está compuesto de un átomo de carbono unido con enlaces covalentes dobles a dos átomos de oxígeno. El CO₂ existe naturalmente en la atmósfera de la Tierra como gas traza en una fracción molar de alrededor de 350 ppm.
- Monóxido de nitrógeno: también llamado óxido de nitrógeno (II) es un gas incoloro y poco soluble en agua que se produce por la quema de

combustibles fósiles en el transporte y la industria. Se oxida rápidamente, convirtiéndose en dióxido de nitrógeno, NO₂, y posteriormente en ácido nítrico, HNO₃, produciendo así lluvia ácida.

- Dióxido de azufre: la principal fuente de emisión de dióxido de azufre a la atmósfera es la combustión del carbón que contiene azufre. El SO₂ resultante de la combustión del azufre se oxida y forma ácido sulfúrico, H₂SO₄ un componente de la llamada lluvia ácida que es nocivo para las plantas, provocando manchas allí donde las gotitas del ácido han contactado con las hojas.



- Metano: CH₄, es un gas que se forma cuando la materia orgánica se descompone en condiciones en que hay escasez de oxígeno; el metano es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global del planeta Tierra, ya que aumenta la capacidad de retención del calor por la atmósfera.
- Ozono: el O₃ es un constituyente natural de la atmósfera, pero cuando su concentración es superior a la normal se considera como un gas contaminante. Su concentración a nivel del mar puede oscilar alrededor de 0,01 mg kg⁻¹. Cuando la contaminación debida a los gases de escape de los automóviles es elevada y la radiación solar es intensa, el nivel de ozono aumenta y puede llegar hasta 0,1 kg⁻¹.

4.3. Sostenibilidad urbana

Las ciudades son sistemas socioecológicos, en donde existe una relación entre los servicios ambientales y el bienestar humano. Bajo este concepto se busca un desarrollo urbano sostenible que no degrade el entorno y proporcione calidad de vida a los ciudadanos, a través de acciones ecológicas, económicas y sociales, que considere los procesos dentro y fuera del paisaje urbano.

La sostenibilidad urbana contiene lineamientos para luchar contra el cambio climático, donde se busca generar un modelo de ciudad sostenible que incluya sistemas adaptativos complejos y se potencien los servicios ambientales, incluida la captura de carbono, proporcionando calidad de vida y cuidado del entorno.

Por lo tanto, las ciudades más sostenibles son aquellas que se preocupan por reducir las emisiones de GEI como el CO₂, disminuyendo sus niveles de contaminación y consumo de energía e incrementando el uso eficiente del transporte, al igual que promoviendo el aumento de áreas verdes.

4.4. Cambio climático

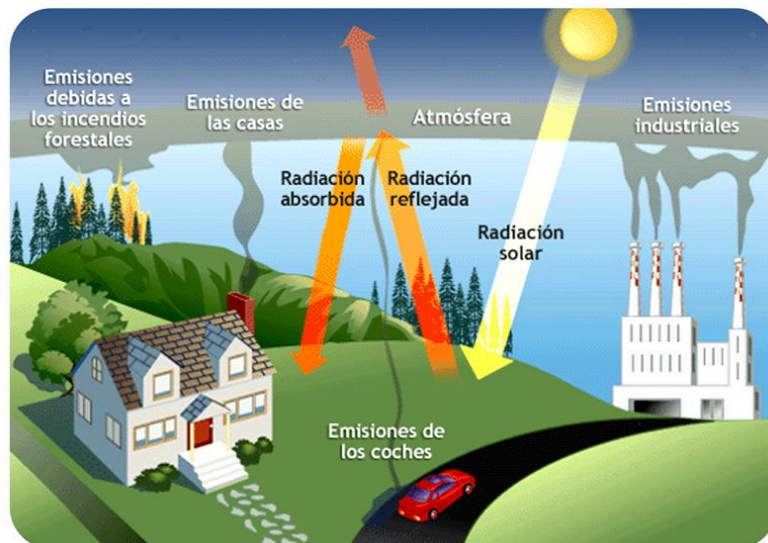
Según IPCC, 2012:557, se considera cambio climático a la variación de las condiciones climáticas medias y/o variabilidad de sus propiedades que se puede identificar y que se mantiene durante un período de tiempo prolongado, generalmente décadas o por más tiempo producido debido a procesos naturales internos, a forzamientos externos o a cambios antropogénicos duraderos en la composición de la atmósfera o en los usos del suelo⁷.

El efecto invernadero natural forma parte de un sistema equilibrado de transferencia de energía entre la atmósfera, la superficie terrestre y los océanos.

⁷ IPCC. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. p. 577. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf. Consulta: 22 de marzo de 2020.

El clima permanece estable en gran medida, cuando la cantidad de energía que recibe es equivalente a la que desprende. Sin embargo, hay factores que han provocado cambios notables en el sistema climático. Durante el último milenio, los cambios en la energía del sol, las erupciones volcánicas y el aumento en la concentración de GEI han sido los forzamientos más importantes.

Figura 1. **Cambio climático y gases de efecto invernadero**



Fuente: CanalTIC. *Emisiones de gases contaminantes.*

https://canaltic.com/blog/html/exe/energias/emisiones_de_gases_contaminantes.html. Consulta:

22 de marzo de 2020.

4.5. Gases de efecto invernadero

Son los componentes gaseosos de la atmósfera, tanto naturales como antropogénicos, que absorben y emiten radiación en determinadas longitudes de onda del espectro de radiación infrarroja emitido por la superficie de la Tierra, la atmósfera y las nubes. Esta propiedad produce el efecto invernadero.

En la atmósfera de la Tierra, los principales GEI son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃). Hay además en la atmósfera una serie de GEI creados íntegramente por el ser humano, como los halocarbonos y otras sustancias con contenido de cloro y bromo, regulados por el Protocolo de Montreal como el hexafluoruro de azufre (SF₆), los hidrofluorocarbonos (HFC) y los perfluorocarbonos (PFC).

Los gases de efecto invernadero están clasificados en directos e indirectos.

4.5.1. GEI directos

Son gases que contribuyen al efecto invernadero tal como son emitidos a la atmósfera. En este grupo se encuentran: el dióxido de carbono, el metano, el óxido nitroso y los compuestos halogenados.

4.5.2. GEI indirectos

Son precursores de ozono troposférico, además de contaminantes del aire ambiente de carácter local y en la atmósfera se transforman a gases de efecto invernadero directo. En este grupo se encuentran: los óxidos de nitrógeno, los compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano y el monóxido de carbono.

Figura 2. **Emisiones de gases de efecto invernadero en el mundo**



Fuente: GREEN URBAN DATA. *Los gases de efecto invernadero y su relación con la temperatura.* <https://www.greenurbandata.com/2018/10/30/temperatura-y-gases-de-efecto-invernadero/>. Consulta: 22 de marzo de 2020.

4.6. Servicios ambientales

Según Domínguez, define los servicios ambientales como: “Los beneficios intangibles que los diferentes ecosistemas o biomasa ponen a disposición de la sociedad de manera natural e influyen en el mantenimiento de la vida, generan beneficios y bienestar para las personas y las comunidades”⁸.

Los servicios que proporcionan a la sociedad los árboles urbanos son diversos, pueden desempeñar un papel importante en el mejoramiento de la

⁸ DOMÍNGUEZ MADRID, Ana Yurendy. *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO₂ vehicular en Tijuana, B.C.* <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20141174/>. Consulta: 22 de marzo de 2020.

salud y comodidad de los residentes dentro de las ciudades, ya sea por la absorción y filtrado de contaminantes, la mejora de la calidad del aire y del agua local, la regulación de la temperatura mediante la reducción de la temperatura del aire y del llamado efecto isla de calor.

4.6.1. Árboles urbanos

Conjunto de plantas de las especies correspondientes a los biotipos árbol, arbusto, palma o helecho arborescente, ubicados en suelo urbano. Los árboles urbanos son considerados como una estrategia de conservación de energía calórica y reducción de CO₂, es decir, almacenamiento directo de carbono y la disminución de la producción de CO₂. También es parte fundamental de la estructura de las ciudades porque proporcionan sombra, frescura y oxígeno.

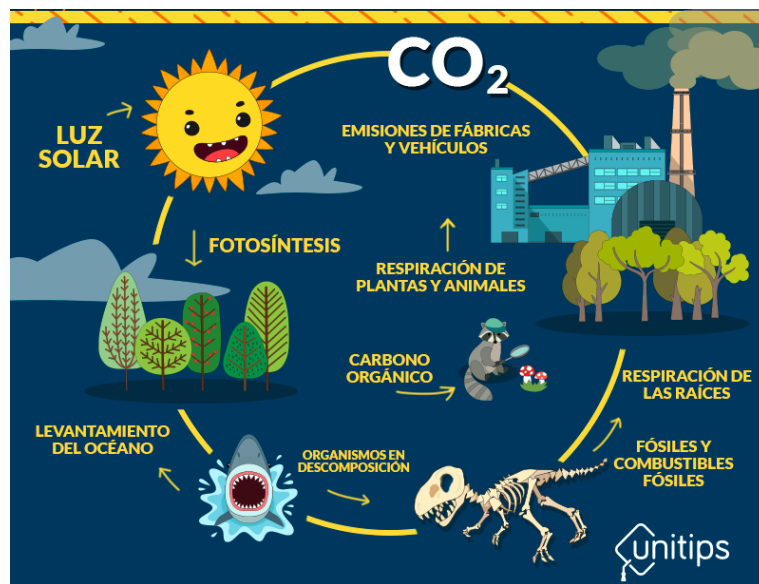
La Organización Mundial de la Salud (OMS) recomienda que las ciudades cumplan con la superficie mínima de áreas verdes per cápita de 9 m² por habitante. Siendo las áreas verdes la superficie de terreno destinada, preferentemente, al esparcimiento o circulación peatonal, conformada por especies vegetales y otros elementos complementarios.

4.7. Ciclo del carbono

El ciclo de carbono en la vegetación comienza con la captura del CO₂ por medio de los procesos de fotosíntesis, realizada por las plantas y ciertos microorganismos. En este proceso, catalizado por la energía solar, el CO₂ y el agua reaccionan para formar carbohidratos y liberar oxígeno a la atmósfera. Parte de los carbohidratos se consumen directamente para suministrar energía a la planta, y el CO₂ liberado como producto de este proceso lo hace a través de las hojas, ramas, fuste o raíces. Otra parte de los carbohidratos son consumidos

por los animales, que también respiran y liberan CO_2 . Las plantas y los animales mueren y son finalmente descompuestos por macro y microorganismos, lo que da como resultado que el carbono de sus tejidos se oxide en CO_2 y regrese a la atmósfera.

Figura 3. **Ciclo de carbono**



Fuente: Unitips. *Ciclo del carbono*. <https://blog.unitips.mx/ciclo-del-carbono-tema-de-examen-uam>. Consulta: 22 de marzo de 2020.

4.7.1. **Captura de dióxido de carbono**

Esta se realiza únicamente durante el desarrollo de los árboles. Los árboles absorben dióxido de carbono (CO_2) atmosférico junto a otros elementos en suelos y aire para convertirlos en madera. Aproximadamente el 42 al 50 % de la biomasa de un árbol (materia seca) es carbono. Hay una captura de dióxido de carbono neta, únicamente mientras el árbol se desarrolla para alcanzar madurez. Cuando el árbol muere, emite hacia la atmósfera la misma cantidad de dióxido

de carbono que capturó. En estado estable, un bosque en plena madurez aporta la misma cantidad de carbono que captura, por tanto, no es importante cuánto carbono el árbol captura inmediatamente, sino cuánto carbono captura durante toda su vida.

Los índices de captura de carbono varían de acuerdo al tipo de árboles, suelos, topografía y prácticas de manejo en el bosque. La acumulación de carbono en bosques llega eventualmente a un punto de saturación, a partir del cual la captura de carbono resulta imposible. El punto de saturación se presenta cuando los árboles alcanzan su madurez y desarrollo completo o cuando la materia orgánica en los suelos se transforma a su estado original. La cantidad de carbono almacenada en un árbol depende de la densidad de su madera, es decir mientras más densa y dura la madera, más carbono contiene.

Tabla II. **Relación de la captura de carbono, DAP y especie en Tijuana**

Especie	CO2 capturado (Kg/año)	% de CO2 capturado	DAP promedio (cm)	Número de árboles	% del total de árboles
<i>Eucalyptus globulus</i>	84 374	32,06	37	520	16,79
<i>Ficus benjamina</i>	41 657	15,83	43	652	21,05
<i>Washingtonia robusta</i>	40 670	15,46	51	184	5,94
<i>Schinus terebinthifolius</i>	25 730	9,78	30	346	11,17
<i>Casuarina equisetifolia</i>	12 286	4,67	35	135	4,36
<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	11 329	4,31	42	39	1,26
<i>Schinus molle</i>	10 045	3,82	69	55	1,78
<i>Fraxinus uhdei</i>	5 196	1,97	37	170	5,49
<i>Erythrina caffra</i>	3 228	1,23	27	44	1,42
<i>Grevillea robusta</i>	3 210	1,22	27	14	0,45
<i>Pinus radiata</i>	3 105	1,18	49	33	1,07
<i>Phoenix canariensis</i>	2 682	1,02	53	25	0,81
<i>Yucca guatemalensis</i>	2 481	0,94	23	78	2,52
<i>Populus alba</i>	1 928	0,73	18	18	0,58
<i>Brachychiton populneum</i>	1 759	0,67	16	30	0,97
<i>Melaleuca quinquenervia</i>	1 622	0,62	23	55	1,78
<i>Melia azadarach</i>	1 205	0,46	21	10	0,32

Continuación de la tabla II.

<i>Jacaranda mimosifolia</i>	891	0,34	14	17	0,55
<i>Quercus robur</i>	864	0,33	24	20	0,65
<i>Acacia saligna</i>	703	0,27	41	301	9,72
<i>Ficus elástico</i>	623	0,24	25	15	0,48
<i>Ficus virens</i>	571	0,22	27	7	0,23
<i>Ulmus parvifolia</i>	554	0,21	25	5	0,16
<i>Acacia longifolia</i>	523	0,20	21	10	0,32
<i>Eucalyptus cinerea</i>	437	0,17	24	13	0,42
<i>Pithecellobium dulce</i>	424	0,16	9	5	0,16
<i>Alnus rhombioflia</i>	396	0,15	30	2	0,06
<i>Ehretia tinifolia</i>	368	0,14	15	7	0,23
<i>Hibiscus</i>	357	0,14	12	9	0,29
<i>Ficus microcarpa</i>	310	0,12	21	8	0,26
<i>Cupressus sempervirens</i>	290	0,11	21	29	0,94
<i>Eriobotrya japonica</i>	253	0,10	8	17	0,55
<i>Roystonea regia</i>	244	0,09	22	3	0,10
<i>Ficus platypoda</i>	240	0,09	13	5	0,16
<i>Acer negundo</i>	239	0,09	14	4	0,13
<i>Ravenala madagascariensis</i>	213	0,08	12	18	0,58
<i>Bougainvillea</i>	189	0,07	10	6	0,19
<i>Myoporum laetum</i>	188	0,07	26	44	1,42
<i>Morus alba</i>	176	0,07	18	3	0,10
<i>Ficus carica</i>	170	0,06	19	3	0,10
<i>Citrus sinensis</i>	142	0,05	12	5	0,16
<i>Araucaria heterophylla</i>	131	0,05	16	4	0,13
<i>Bauhinia variegata</i>	126	0,05	10	2	0,06
<i>Ligustrum lucidum</i>	118	0,04	34	5	0,16
<i>Magnolia grandiflora</i>	109	0,04	16	2	0,06
<i>Leucaena leucocephala</i>	87	0,03	6	7	0,23
<i>Phoenix dactylifera</i>	82	0,03	34	1	0,03
<i>Euphorbia tirucalli</i>	80	0,03	12	3	0,10
<i>Platycladus orientalis</i>	74	0,03	8	6	0,19
<i>Platanus</i>	68	0,03	14	2	0,06
<i>Ceratonia siliqua</i>	63	0,02	22	2	0,06
<i>Olea europaea</i>	60	0,02	20	10	0,32

Fuente: DOMÍNGUEZ MADRID, Ana Yurendy. *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO2 vehicular en Tijuana, B.C.* <https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20141174/>.

Consulta: 22 de marzo de 2020.

Nota: los nombres resaltados coinciden con las especies que fueron estudiadas en la presente investigación.

4.8. Metodologías para la estimación de biomasa y carbono

El cálculo de biomasa es el primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas, y la contribución de los bosques tropicales en el ciclo global del carbono. La biomasa es un parámetro que caracteriza la capacidad de los ecosistemas para acumular materia orgánica a lo largo del tiempo. La cuantificación de la biomasa y el crecimiento de la vegetación en los ecosistemas son críticos para las estimaciones de captura de C, un tema actualmente relevante por sus implicaciones en relación al cambio climático. Existen dos métodos comúnmente usados para estimar volumen, biomasa y carbono en ecosistemas forestales: el método directo y el indirecto⁹.

4.8.1. Método directo

También es denominado método destructivo y consiste en medir los parámetros básicos de un árbol, entre los más importantes, diámetro a la altura del pecho (DAP, cm), altura total (AT, m), diámetro de copa (DC, m) y longitud de copa (LC, m); derribarlo y calcular la biomasa pesando cada uno de los componentes (fuste, ramas, raíces y follaje).

Consiste en la extracción física de los árboles proporcional a la frecuencia relativa de la población, se realiza la disección de estos en cada uno de sus componentes a evaluar: tronco, ramas, hojas y raíces. Se determina de forma directa la biomasa de cada componente del árbol, de este último se deben tomar submuestras, las cuales deben ser llevadas a laboratorio para obtener el peso seco e inferir el peso de cada componente mediante factores de conversión de biomasa (FCB), dado que en campo se obtuvo el peso fresco. La sumatoria de los componentes dará el peso total de cada individuo.

⁹ FONSECA, William; ALICE, Federico; REY, José María. *Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona caribe de Costa Rica*. <https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v30n1/art06.pdf>. Consulta: 25 de marzo de 2020.

Figura 4. **Método directo o destructivo, toma de muestras**



Fuente: EMANUELLI, Patricio; MILLA, Fabián; JIMÉNEZ, Abner. *Bases técnicas para la construcción de funciones alométricas de volumen y biomasa en Centro América y República Dominicana*. p. 18. https://www.researchgate.net/publication/305295054_Bases_Tecnicas_para_la_Construccion_de_Funciones_Alometricas_de_volumen_y_biomasa_en_Centro_America_y_Republica_Dominicana. Consulta: 25 marzo de 2020.

4.8.2. **Método indirecto (*carbon stocks*)**

Es utilizado cuando existen árboles de grandes dimensiones y en casos en los que se requiere conocer el carbono de un bosque sin necesidad de derribar los árboles. En este método se cubica y estima el volumen de las trozas con fórmulas dendrométricas; el volumen total del fuste o de las ramas gruesas se obtiene con la suma de estos volúmenes parciales.

Se toman muestras de madera del componente del árbol y se pesan en el campo, luego se calculan factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad específica verde y la gravedad específica seca o densidad básica.

Una de las primeras formas de estimar la biomasa de un individuo (MS) es mediante el producto de la densidad básica de la madera (D_{madera}) y el volumen fresco (V).

La ecuación presentada por Brown en 1997 es la más usada y recomendada para estimar biomasa, para este caso:

$$BS = D_{seca} * V_{Comercial} * F_{mórfico}^{10}$$

Donde

B_s = biomasa seca (Kg).

$V_{comercial}$ = volumen comercial o en pie (m^3).

$F_{morfico}$ = factor mórfico depende de especie 0,70 latifoliada y 0,45 conífera.

Figura 5. **Toma de muestras para determinar densidad, método indirecto**



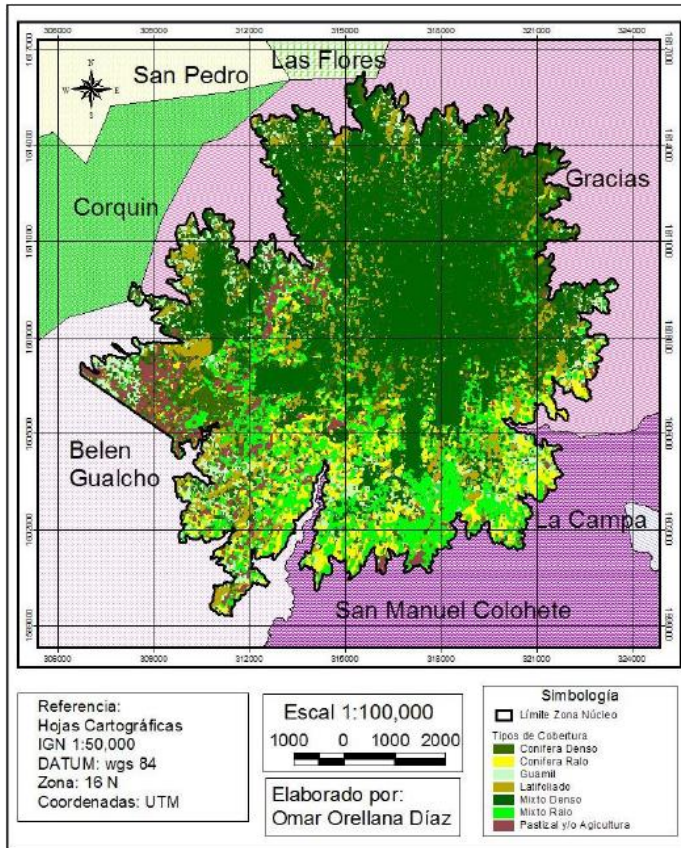
Fuente: CHAVE, Jerome. *Medición de densidad de madera en árboles tropicales. Manual de campo*. p. 4.

¹⁰ BROWN, Sandra. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. https://www.researchgate.net/publication/239974368_Estimating_Biomass_and_Biomass_Change_of_Tropical_Forests_A_Primer. Consulta: 25 de marzo de 2020.

4.8.3. Estudio de biomasa mediante imágenes satelitales

La medición de la biomasa en el terreno implica procedimientos de muestreo destructivo sumamente costosos y muchas veces impracticables, por lo cual comúnmente la misma se estima a partir de muestreos de inventarios forestales aplicando fórmulas de volumen. Además, la biomasa es variable en el espacio y muchas veces responde no solo a factores climáticos y edáfico, sino también a patrones de uso humano. Es por ello que, la utilización de imágenes satelitales se presenta como una herramienta adecuada para mejorar las estimaciones de reservas de C y elaborar mapas de biomasa. Dado que las imágenes satelitales adquiridas en diferentes fechas permiten observar la respuesta espectral de la superficie terrestre a lo largo del tiempo, incluyendo diferentes estados fenológicos, los estudios multitemporales permiten mejorar la capacidad de monitorear variables biofísicas respecto al uso de una única fecha.

Figura 6. Cobertura boscosa obtenida por teledetección



Fuente: ORELLANA DÍAZ, Omar. *Estimación del carbono almacenado en la zona núcleo del parque nacional montaña de Celaque*. p. 42.

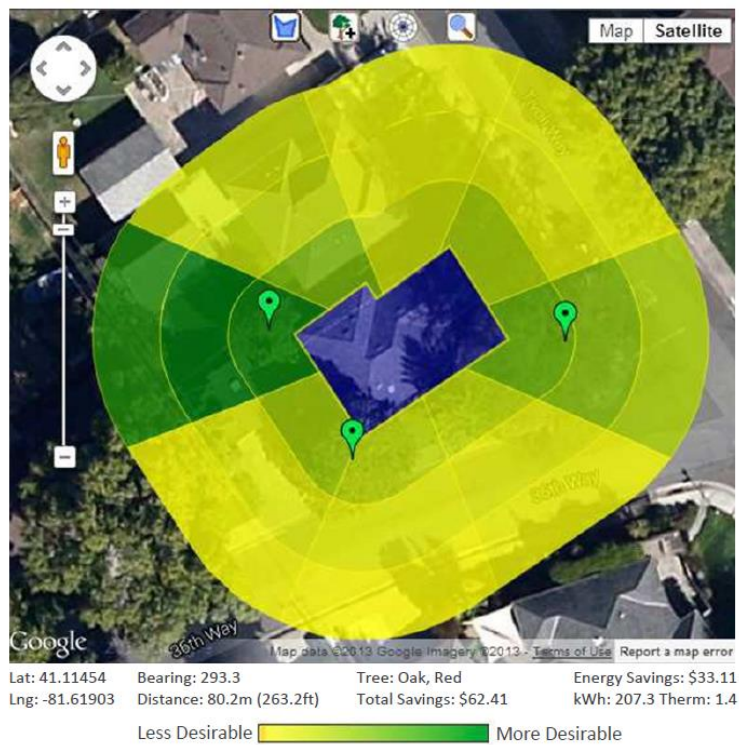
<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11098e/A11098e.pdf>. Consulta: 25 marzo de 2020.

4.8.4. Captura de carbono en árboles por medio de *i-treen design*

i-tree design es una herramienta gratuita basada en la web que permite a cualquiera hacer una simple estimación de los beneficios que proporcionan los árboles individuales. Con entradas de ubicación, especies, tamaño y condición del árbol, los usuarios reciben una comprensión de los beneficios del árbol

relacionados con los gases de efecto invernadero mitigación, mejoras en la calidad del aire e intercepción de aguas pluviales. Con el paso adicional de dibujar la huella de un edificio, y virtualmente plantar un árbol a su alrededor, los efectos del árbol en el uso de energía del edificio pueden ser evaluados. Los beneficios se estiman acumulativamente, para el año en curso, así como para un año futuro especificado por el usuario, esta herramienta está disponible únicamente para Estados Unidos de Norteamérica y Canadá.

Figura 7. **Estimación de biomasa utilizando *i-tree design V6.0***



Fuente: elaboración propia, empleando *i-tree design 6.0*.

4.9. Ecuaciones alométricas

Para entender el concepto de ecuaciones alométricas es necesario saber que la alometría estudia los patrones de crecimiento de los seres vivos y las proporciones de sus partes en relación a las dimensiones totales. Entonces, una ecuación alométrica de carbono es una herramienta matemática que permite conocer de forma simple, la cantidad de carbono de un árbol por medio de la medición de otras variables de fácil obtención. Las ecuaciones son generadas a partir de los análisis de regresión, donde se estudian las relaciones entre la masa de los árboles y sus datos dimensionales.

Las ecuaciones de captura de carbono mejoran su predicción cuando se consideran al mismo tiempo las variables diámetro y altura, pero la medición de esta última no se realiza en la práctica, debido a que toma mucho tiempo y en algunos bosques con coberturas cerradas no es fácil identificar la punta del árbol, sobre todo cuando las mediciones se hacen en forma indirecta. De cualquier manera, en la mayoría de los casos se logra una precisión satisfactoria cuando solo se usa DAP como variable dependiente.

Para integrar las ecuaciones se requiere la aplicación de un método de estimación de captura de carbono con n número de árboles para relacionar alguna de las variables, tales como diámetro a la altura del pecho (DAP), altura comercial (AC) y la densidad seca. Esta técnica es conocida como análisis dimensional o alometría, la cual consiste en el estudio del cambio de proporción de varias partes de un organismo como resultado de su crecimiento.

Después de obtener la captura de carbono y el DAP de cada individuo, se selecciona el siguiente modelo de relaciones alométricas que, según Ter-

Mikaeliana y Korzukhinb es uno de los más frecuentemente utilizados para este tipo de estudios.

$$Y = b * X^{k11}$$

Donde Y es la captura de carbono total (ton), X es el diámetro a la altura del pecho (cm); b y k son los parámetros que se estimarán por mínimos cuadrados.

Al expresar el modelo anterior en su forma lineal mediante transformación logarítmica de las variables y ajustarlo, empleando los datos de Y y X como variables dependiente e independiente, se obtiene el modelo siguiente:

$$\ln Y = \ln b + K * \ln X$$

Donde Y, X, b y k tienen el mismo significado que en la ecuación anterior, y $\ln(Y)$, $\ln(b)$ y $\ln(X)$ son los logaritmos naturales de Y, b y X.

Se ajusta el modelo de logaritmos naturales por mínimos cuadrados para cada especie, con el propósito de obtener los valores estimados de los parámetros *b* y *k* que representan la ordenada al origen y la pendiente del modelo de regresión no lineal (exponencial), para cada una de las especies.

¹¹ TER-MIKAELIANA, Michael; KORZUKHINB, Michael. *Biomass equations for sixty-five North American tree species*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112797000194>. Consulta: 25 de marzo de 2020.

5. DISEÑO METODOLÓGICO

5.1. Variables

A continuación, se describen las diferentes variables necesarias para el estudio.

5.1.1. Variables independientes

- Diámetro a la altura del pecho (DAP)
- Altura comercial
- Densidad seca

5.1.2. Variables dependientes

- Biomasa forestal
- Captura de carbono
- Producción de oxígeno (O₂)

5.2. Delimitación del campo de estudio

Para la validación de esta metodología se utilizó la masa forestal de zona 9 de la Ciudad de Guatemala que se encuentra entre las coordenadas 14° 36' 19'' N, 90° 31' 52'' O y 14° 36' 25'' N, 90° 31' 15'' O. Las principales avenidas donde se registran la mayor masa forestal del inventario municipal comprenden desde la avenida Reforma, hasta la avenida la Castellana y las principales calles

comprende desde la dieciséis hasta la quinta calle de la zona 9, Ciudad de Guatemala.

5.3. Recursos humanos disponibles

- Investigador líder: Victor José Gómez Ovalle.
- Asesor: Ing. agrónomo en Recursos Naturales Renovables, Gustavo Estuardo Díaz Corzo (colegiado 4 188).
- Consultores externos:
 - Técnicos de la Dirección de Medio Ambiente de la Municipalidad de Guatemala y Laboratorio de Mecánica de Suelos de la USAC.

5.4. Recursos materiales disponibles

- Hipsómetro.
- Cinta métrica.
- Barreno de incremento.
- Balanza analítica (voltaje 12V-30V; modelo BPS2100S; capacidad de lectura 0,001g).
- Horno de convención.
- Vernier digital.
- Equipo de cómputo.
- Paquetería de office.
- Software GIS (QGIS, ArcGIS).

5.5. Técnica

El desarrollo de la investigación tuvo enfoques cualitativos: ya que se determinó el aspecto fitosanitario de las especies forestales, y cuantitativos: ya que se midieron variables dasométricas (DAP, altura, entre otros), variables que posteriormente se utilizaron en las ecuaciones propuestas por el método indirecto que permitieron la determinación de la captura de carbono fijado y el oxígeno liberado.

5.6. Recolección y ordenamiento de la información

A continuación, se describe la serie de etapas o fases en los que se elaboró esta investigación las cuales fueron: gabinete inicial, campo, laboratorio y procesamiento de datos.

5.6.1. Fase de gabinete inicial

- Delimitación del área de estudio: zona 9, Ciudad de Guatemala.
- Determinación de especies forestales muestreadas: *Callistemon speciosus*, *Tabebuia rosea*, *Jacaranda mimosifolia*, *Casuarina equisetifolia*, *Cupressus lusitánica*, *Magnolia grandiflora*, *Ligustrum lucidum*, *Laurel benjamina*, *Casimiroa edulis*, *Platymiscium dimorphandrum*, *Corymbia torelliana*, *Syzygium jambos*.
- Determinación de la cantidad de árboles a muestrear de la misma especie: se utilizó la siguiente expresión.

$$n = \frac{\sum_{i=1}^k N_i * P_i * Q_i}{N * \sigma_p^2 + \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^k N_i * P_i * Q_i}$$

Donde:

n = número de muestras para estimar proporción

P_i = probabilidad

Q_i = variable de P_i

σ_p^2 = error de estimación/nivel de confianza

N = población total

5.6.2. Fase de campo

- Visita de reconocimiento: a través de observación directa se estableció el estado fitosanitario del árbol, además, se procede a la toma de medidas dasométricas (DAP, altura comercial).

Figura 8. **Visita de reconocimiento**



Fuente: 7 avenida de la zona 9, Ciudad de Guatemala.

- Toma de muestra del fuste del árbol al DAP, para ello se utilizó el barreno de incremento.

Figura 9. **Toma de muestra**



Fuente: avenida Reforma zona 9, Ciudad de Guatemala.

- Se identifica la muestra, según forma MUAM 01 se transporta en sobre de manila o papel bond al laboratorio, esto con el fin de protegerlo de la humedad.

Figura 10. **Muestra de árbol especie *Magnolia grandiflora***



Fuente: 6 avenida de zona 9, Ciudad de Guatemala.

5.6.3. Fase de laboratorio

- Se identifican y pesan las muestras, esto con el fin de determinar el peso húmedo de cada muestra.

Figura 11. **Identificación y peso de muestras**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Tarado y secado de las muestras a temperatura entre 105 °C a 110 °C.

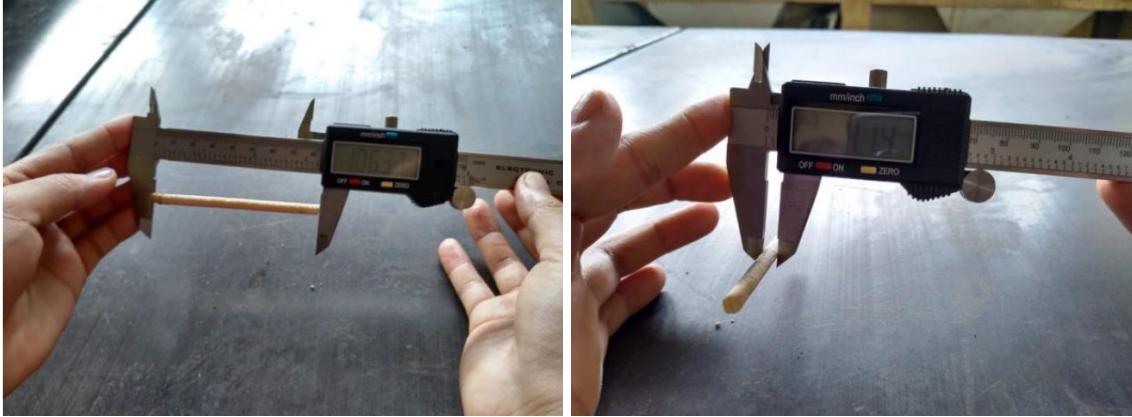
Figura 12. **Tarado y secado de muestras**



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC.

- Registro de datos: cada 6 horas se tomó el peso de las muestras hasta observar una variación poco significativa, asumiendo que la muestra ya había perdido gran parte de su humedad.
- Una vez secas las muestras se procedió a tomar las medidas (diámetro y longitud) con ayuda de un vernier, esto para conocer el volumen del cilindro de la muestra tomada en campo.

Figura 13. Toma de medidas para determinar volumen de muestras



Fuente: Laboratorio de Mecánica de Suelos, Facultad de Ingeniería, USAC

5.6.4. Fase de procesamiento de datos

- Determinación de la densidad seca: se utilizaron los datos obtenidos en laboratorio: peso húmedo y volumen, con el uso de la siguiente ecuación.

$$DS = \frac{PS}{VD} * (1\ 000)^*$$

Donde:

DS = densidad seca (Kg/m³)

PS = peso húmedo de la muestra (g)

VD = volumen (cm³)

*Factor de conversión de g/cm³ a Kg/m³

- Debido a la altura y el difícil acceso para medir el diámetro superior de los árboles muestreados, se utilizó el factor mórfico teórico: 0,70 para

especies latifoliadas y 0,47 para especies de árboles coníferas.

- Para determinar el volumen del cada árbol del inventario se utilizó la siguiente expresión:

$$V = \left(\frac{DAP}{100}\right)^2 * \frac{\pi}{4} * HC * FM$$

Donde:

V = volumen del árbol (m³)

DAP = diámetro a la altura del pecho (m)

HC = altura comercial

FM = factor mórfico

- Determinación de la biomasa seca: una vez calculada la densidad seca que es única para cada especie y el volumen del árbol se utilizó la siguiente ecuación:

$$B_s = (DS * V)$$

Donde:

B_s = biomasa total seca por cada árbol (kg)

V = volumen del árbol en pie (m³)

DS = densidad seca (kg/m³)

- Determinación de la captura de carbono: para convertir la biomasa seca a carbono se utiliza el factor de conversión estándar propuesto por la IPCC,

$$CT_n = B_s * \frac{0,5}{1\ 000}$$

Donde:

CTn = contenido de carbono de cada uno de los componentes (ton)

BT = biomasa total seca (kg)

- Determinación de la captura de dióxido de carbono: después de conocer el contenido de carbono se procedió a calcular la captura o secuestro de CO₂, aplicando la ecuación propuesta por Chambi.

$$CO_{2eqv} = CT_n * \frac{CO_2}{C}^{12}$$

Donde:

CTn = contenido de carbono (ton)

CO₂ = peso molecular del dióxido de oxígeno ((2 * 16) + 12)

C = peso molecular del carbono (12)

- Para conocer la cantidad de oxígeno que es liberado durante el proceso de fotosíntesis de las especies se utilizó la siguiente ecuación:

$$O_{2\text{ Neto}} = CT_n * \frac{O_2}{C}$$

Donde:

O₂ Neto = producción de oxígeno (ton)

O₂ = peso molecular del oxígeno (2 * 16)

C = peso molecular del carbono (12)

¹² CHAMBI CONDORI, Pedro Pablo. *Valoración económica de secuestro de carbono mediante simulación aplicado a la zona boscosa del río Inambari y Madre de Dios*. <https://www.iufro.org/download/file/6977/153/ws13papeles2.pdf/>. Consulta: 5 de abril de 2020.

5.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la recolección de datos se utilizó una bitácora de campo, la cual tuvo como objetivo tomar los aspectos del observador, datos generales y registros en campo para cada día de muestreo; para la toma de muestras se utilizaron etiquetas que permitieron identificar la muestra de la especie que fue estudiada y transportada en sobres de manila o papel bond, además, en la fase de laboratorio se utilizó una ficha donde se anotaron los pesos de cada muestra en intervalos de 6 horas hasta que la muestra haya perdido la humedad de campo.

5.8. Análisis de resultados

Para el análisis de resultados se utilizaron algunos métodos y modelos de datos.

5.8.1. Métodos y modelos de datos

Los datos de densidad seca de cada una de las muestras por especie de árbol fueron sometidas a un proceso estadístico para observar la variación de datos, para ello se utilizaron las siguientes ecuaciones estadísticas:

- Media aritmética: medida de tendencia central, representa a un valor medio de un conjunto de números.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i}{N}$$

Donde:

\bar{x} = media

$\sum_i^N X_i$ = sumatoria de valores

N = número de datos

- Desviación estándar: medida de dispersión de datos numéricos y representa la tendencia de estar agrupados cerca de la media aritmética.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (xi - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

σ = desviación estándar

\bar{x} = valor promedio

xi = valor de la muestra

n-1 = número de datos

Para la construcción de las ecuaciones alométricas de cada una de las especies estudiadas, se utilizó un modelo no lineal, dado a que se esperaba que la dependencia de las variables DAP y captura de carbono o biomasa seca sea potencial, por lo que se ajustó la nube de puntos obtenidos a una función de tipo:

$$Y = b * X^k$$

Para la determinación del modelo matemático a la función anterior se le aplicó el método de regresión lineal, esto con el fin de obtener el valor de las variables b y k, para ello se utilizaron los logaritmos naturales, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$\ln(Y) = \ln(b) + k * \ln(x)$$

Los resultados de las ecuaciones anteriores se representan en gráficos de dispersión “X” y “Y” en la sección de resultados, además, los resultados de captura de carbono y producción de oxígeno (O₂) fueron almacenados en tablas, generando al mismo tiempo gráficos de barras.

5.8.2. Programas utilizados para el análisis de datos

- Sistemas de información geográfica (ArcGIS): programa utilizado para la localización y ubicación de los árboles que fueron muestreados, además, fue utilizado para la representación gráfica de los resultados obtenidos en mapas cartográficos.
- RStudio: programa utilizado para el análisis estadístico y construcción de ecuaciones alométricas.
- Microsoft Excel 2019: para el procesamiento y ordenamiento de la información obtenida en campo y laboratorio.
- Microsoft Word 2019: para la elaboración y edición del informe de investigación con los resultados obtenidos.

6. RESULTADOS

6.1. Densidad seca de las especies muestreadas del inventario forestal de la zona 9, Ciudad de Guatemala

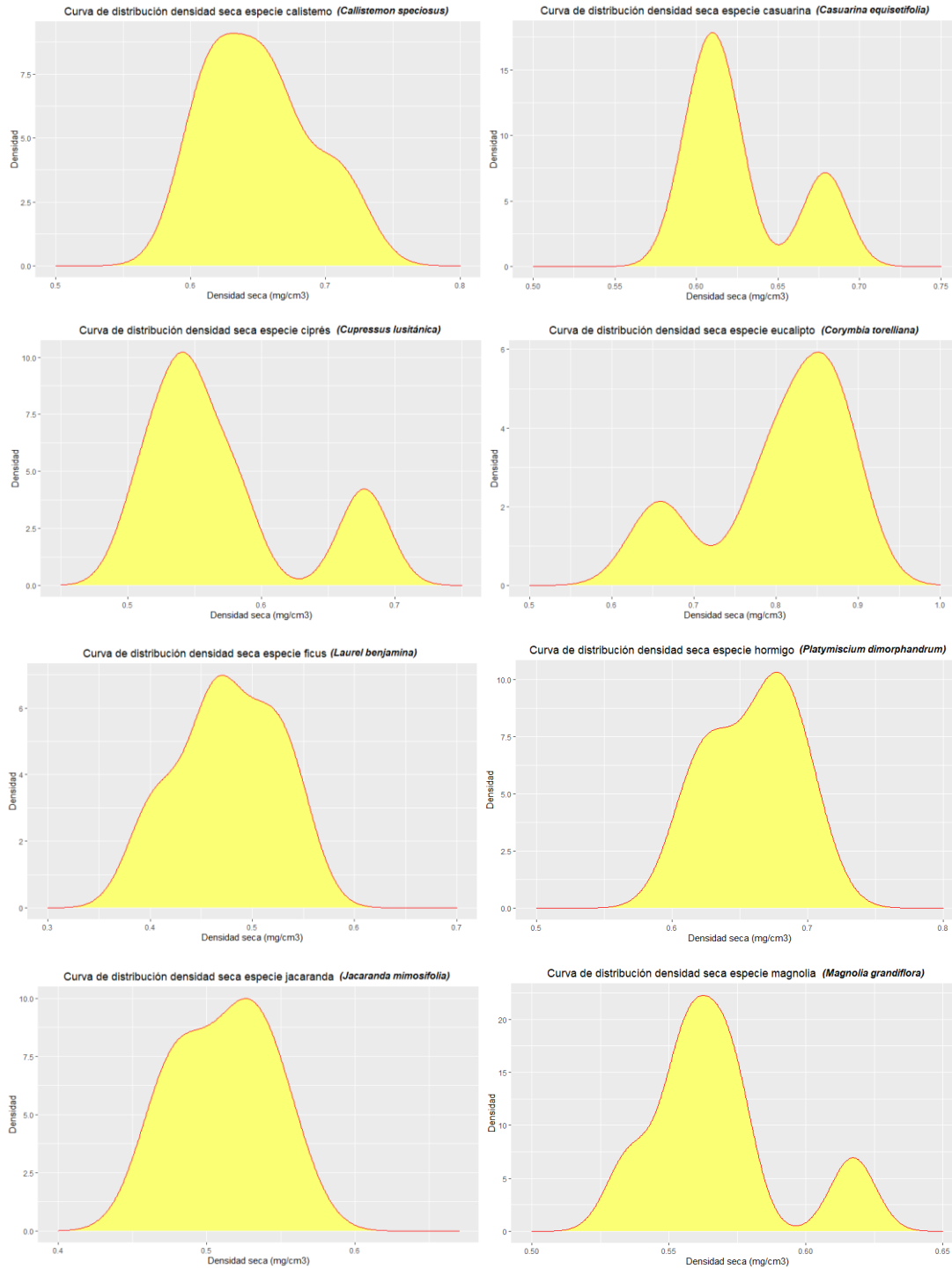
En la tabla III y figura 14, se presentan los valores de densidad seca obtenida de las especies del inventario forestal de la zona 9 de la Ciudad de Guatemala, además, de la curva de distribución de datos, obtenidos de la fase de laboratorio una vez finalizado el proceso de secado de las muestras.

Tabla III. Densidad seca de especies muestreadas (mg/cm³)

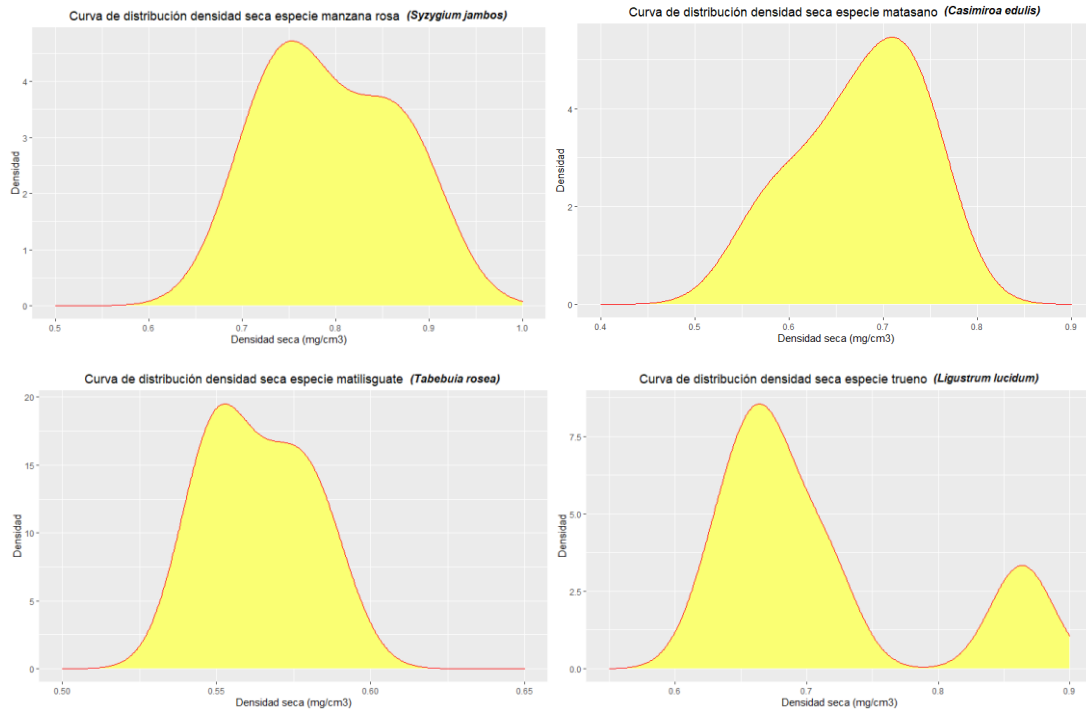
Nombre Científico	Especie	Muestras							Promedio	Desviación estándar S
		1	2	3	4	5	6	7		
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	Hormigo	0,6341	0,6166	0,6705	0,6771	0,6975			0,6591	0,0331
<i>Syzygium jambos</i>	Manzana rosa	0,7467	0,7161	0,8834	0,8502	0,7766			0,7946	0,0703
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	0,5184	0,4719	0,4858	0,5505	0,5295			0,5112	0,0321
<i>Laurel benjamina</i>	Ficus	0,4040	0,5103	0,5373	0,4700	0,4575			0,4758	0,0512
<i>Tabebuia rosea</i>	Matilisqueate	0,5712	0,5491	0,5503	0,6722	0,5834			0,5852	0,0507
<i>Casimiroa edulis</i>	Matasano	0,7356	0,6462	0,5777	0,7324	0,6862			0,6756	0,0659
<i>Ligustrum lucidum</i>	Trueno	0,6723	0,7138	0,6646	0,8636	0,6361			0,7101	0,0902
<i>Callistemon speciosus</i>	Calistemo rojo	0,6513	0,6174	0,6108	0,7097	0,6621			0,6503	0,0397
<i>Cupressus lusitánica</i>	Ciprés	0,5404	0,5463	0,5792	0,5128	0,6772			0,5712	0,0638
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	0,6789	0,6199	0,6102	0,5986				0,6269	0,0357
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia	0,5626	0,5525	0,5353	0,6173	0,5742	0,5571	0,5714	0,5672	0,0256
<i>Corymbia torelliana</i>	Eucalipto	0,8640	0,7871	0,8294	0,6584	0,8788			0,8036	0,0885

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Figura 14. Curvas de distribución de densidad seca



Continuación de la figura 14.



Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

6.2. Captura de dióxido de carbono por especie

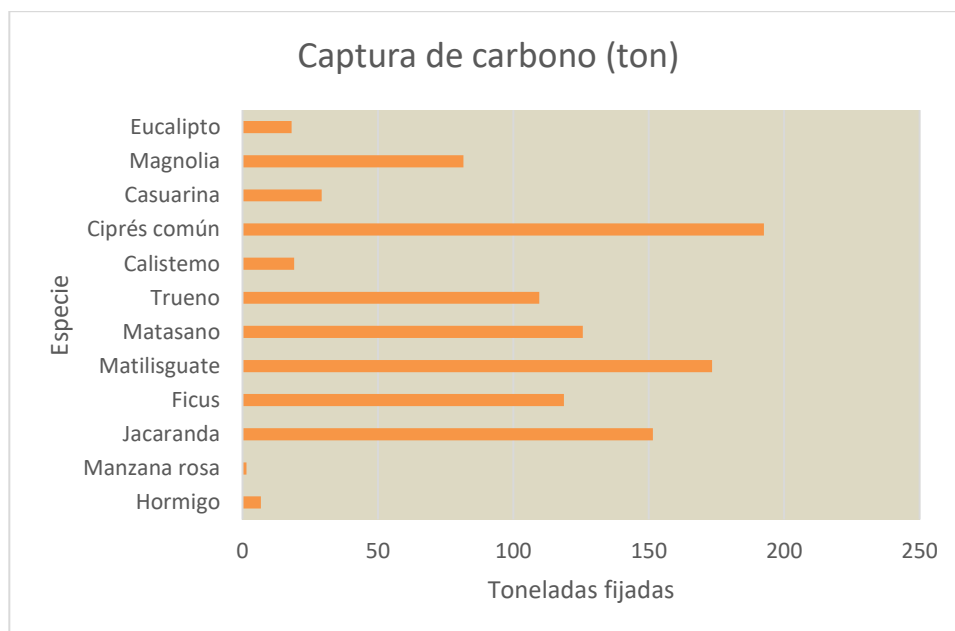
En la tabla IV y figura 15, se presentan los valores de captura de carbono (ton), de las diferentes especies forestales estudiadas, donde la especie de manzana rosa (*Syzygium jambos*), presenta la menor captura de carbono con 1,43 ton, mientras que la especie de ciprés común (*Cupressus lusitánica*) presenta la mayor captura de carbono con 192,46 ton, dentro de la zona de estudio.

Tabla IV. **Captura de carbono por especies**

Nombre científico	Nombre común	Carbono (ton)	No. especies	% que representa
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	Hormigo	6,73	5	0,15
<i>Syzygium jambos</i>	Manzana rosa	1,43	60	1,88
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	151,49	428	13,46
<i>Laurel benjamina</i>	Ficus	118,64	196	6,16
<i>Tabebuia rosea</i>	Matiliguate	173,35	482	15,16
<i>Casimiroa edulis</i>	Matasano	125,65	450	14,12
<i>Ligustrum lucidum</i>	Trueno	109,58	407	12,91
<i>Callistemon speciosus</i>	Calistemo	19,10	140	4,40
<i>Cupressus lusitánica</i>	Ciprés común	192,46	348	10,93
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	29,22	106	3,33
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia	81,57	545	17,12
<i>Corymbia torelliana</i>	Eucalipto	18,07	14	0,43
Total		1 027,26	3182	100,00

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Figura 15. **Captura de carbono equivalente por especies**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

6.3. Producción de oxígeno (O₂) por especie

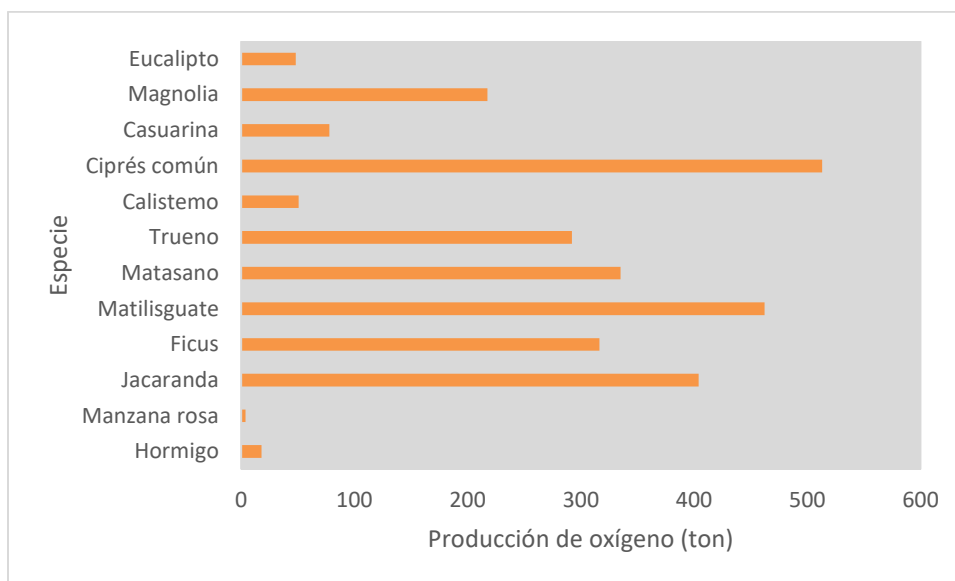
En la tabla V y figura 16, se presentan los valores de producción de oxígeno (ton), de las diferentes especies forestales estudiadas, donde la especie de manzana rosa (*Syzygium jambos*), presenta la menor producción de O₂ con 3,82 ton, mientras que la especie de ciprés común (*Cupressus lusitánica*) presenta la mayor producción de O₂ con 513,28 ton, dentro de la zona de estudio.

Tabla V. Producción de oxígeno por especie

Nombre científico	Nombre común	O ₂ (ton)	No. especies	% que representa
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	Hormigo	17,947	5	0,15
<i>Syzygium jambos</i>	Manzana rosa	3,819	60	1,88
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	404,016	428	13,46
<i>Laurel benamina</i>	Ficus	316,407	196	6,16
<i>Tabebuia rosea</i>	Matilisguate	462,319	482	15,16
<i>Casimiroa edulis</i>	Matasano	335,101	450	14,12
<i>Ligustrum lucidum</i>	Trueno	292,252	407	12,91
<i>Callistemon speciosus</i>	Calistemo	50,894	140	4,40
<i>Cupressus lusitánica</i>	Ciprés común	513,282	348	10,93
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	77,933	106	3,33
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia	217,535	545	17,12
<i>Corymbia torelliana</i>	Eucalipto	48,198	14	0,43
Total		2739,703	3182	100,00

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Figura 16. Producción de oxígeno por especie

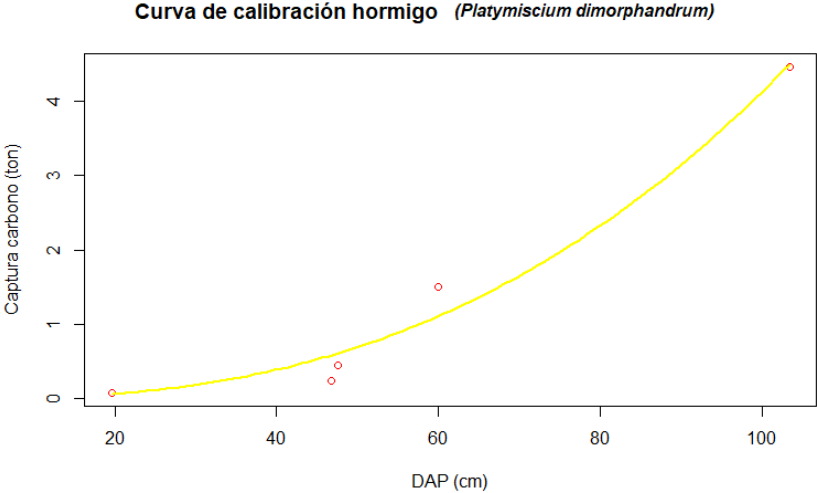


Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

6.3.1.1. Curvas de captura de carbono y ecuaciones alométricas

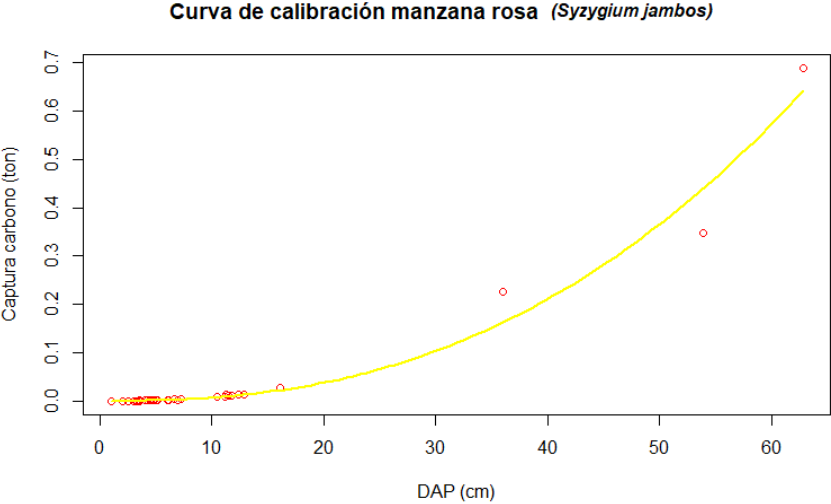
Procesando los resultados de densidad seca para todos los árboles, según el tipo de especie presente en el inventario forestal de la zona 9, Ciudad de Guatemala, se realizaron gráficos de dispersión donde el eje Y representa la captura de carbono y el eje X representa el DAP (cm), se tiene como resultado una curva de tendencia del tipo potencial y las ecuaciones alométricas, con sus respectivos parámetros de ajuste por especie.

Figura 17. **Curva de captura carbono para especie hormigo**



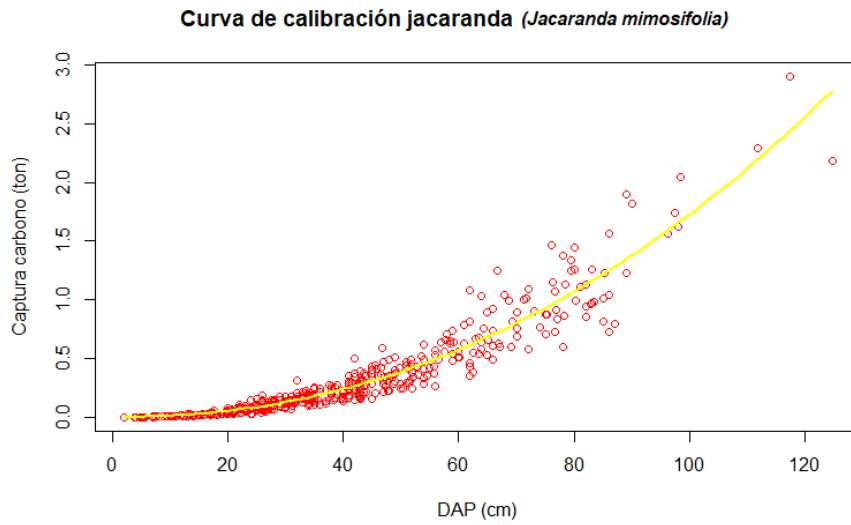
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 18. **Curva de captura de carbono para especie manzana rosa**



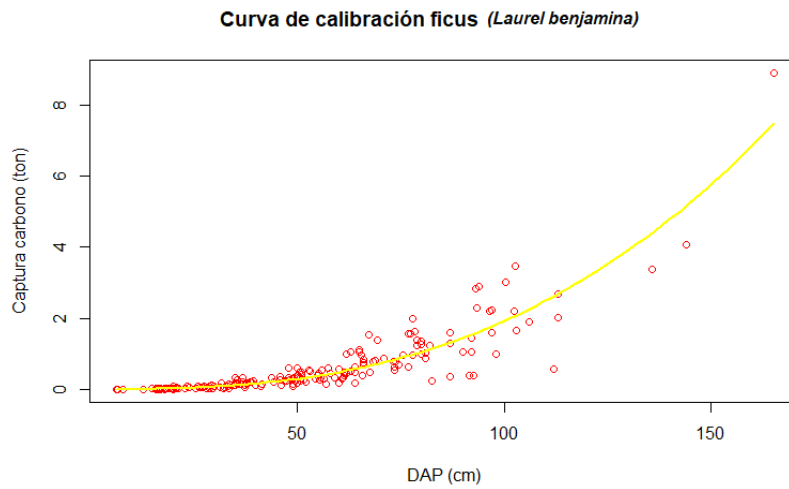
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 19. **Curva de captura carbono para especie jacaranda**



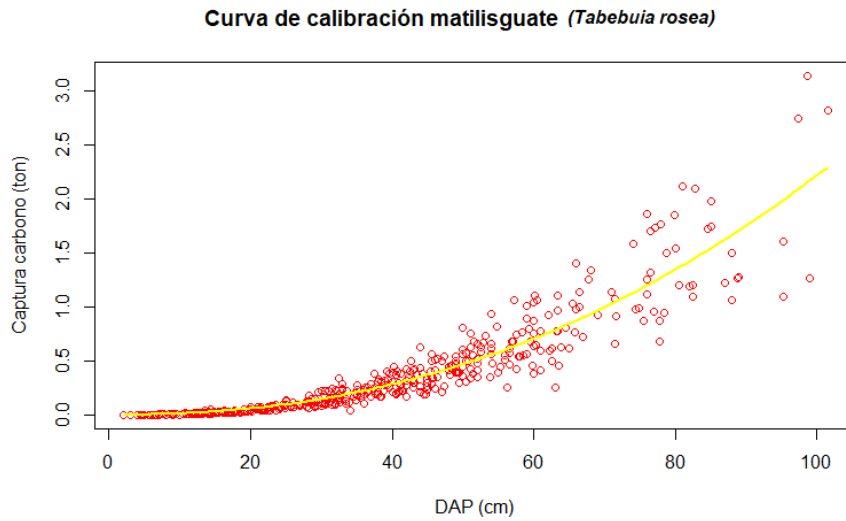
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 20. **Curva de captura de carbono para especie ficus**



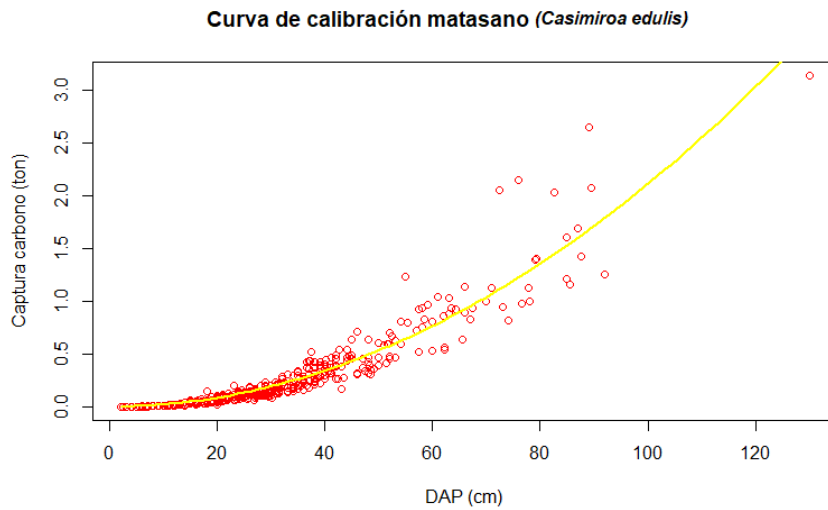
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 21. **Curva de captura de carbono para especie matilisguate**



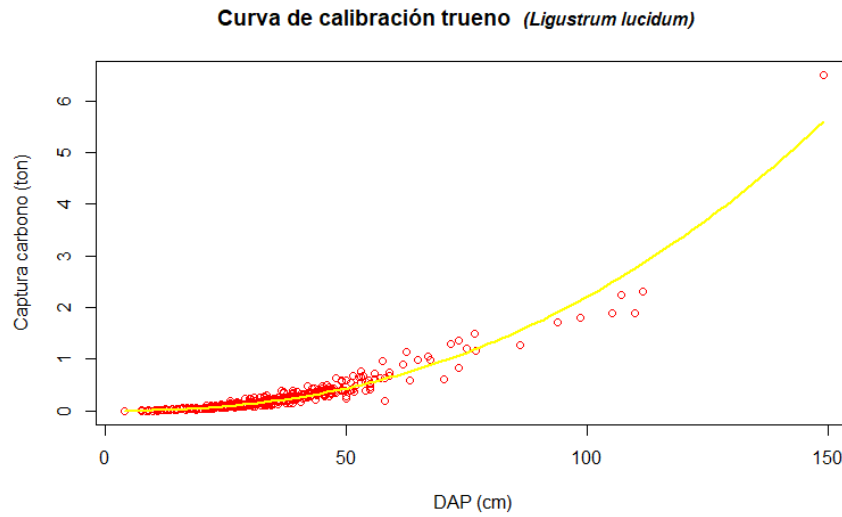
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 22. **Curva de captura de carbono para especie matasano**



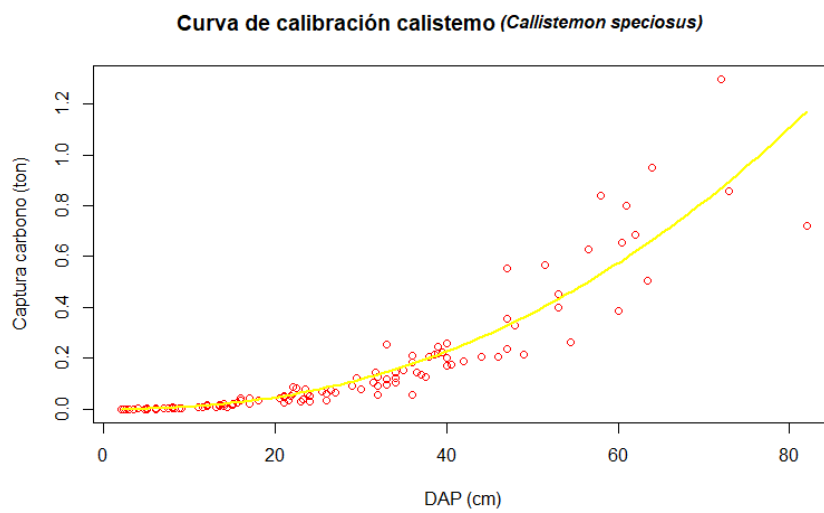
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 23. **Curva de captura de carbono para especie trueno**



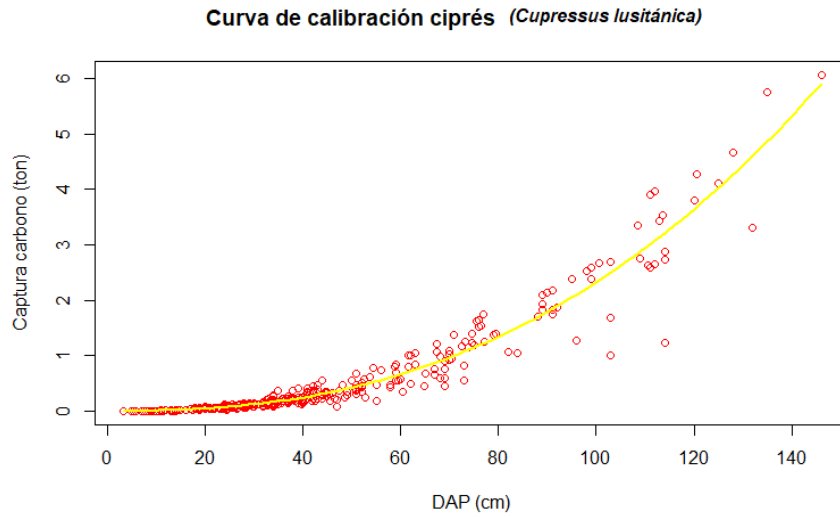
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 24. **Curva de captura carbono para especie calistemo**



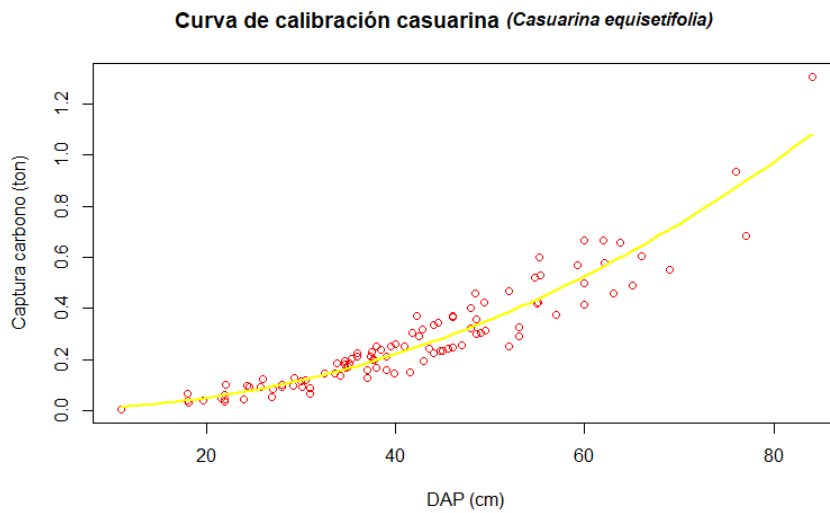
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 25. **Curva de captura de carbono para especie ciprés común**



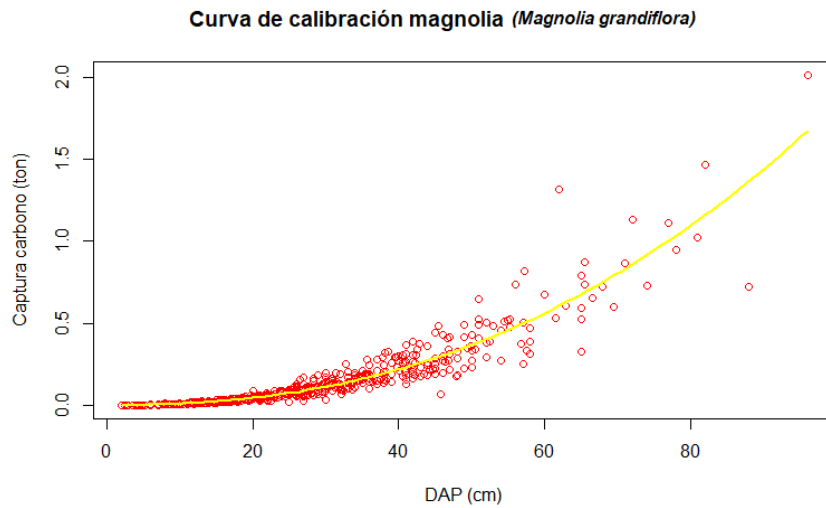
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 26. **Curva de captura de carbono para especie casuarina**



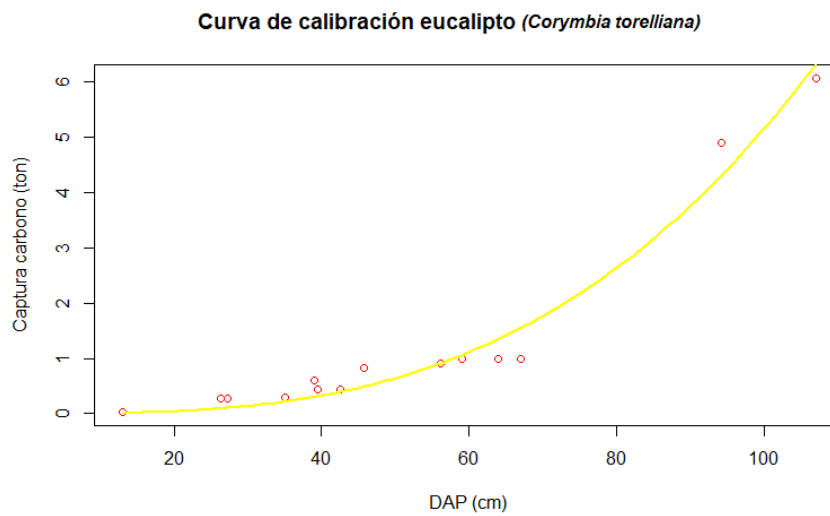
Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 27. **Curva de captura de carbono para especie magnolia**



Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Figura 28. **Curva de captura de carbono para especie eucalipto**



Fuente: elaboración propia, empleando RStudio 1.4.1103.

Tabla VI. **Parámetros estadísticos y ecuaciones alométrica por especie**

Especie	Nombre científico	Ecuación	R-squared (R ²)	p-value
Hormigo	<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	$y = 3,027e - 05 * (x)^{2,5667}$	0,865	0,01416
Manzana rosa	<i>Syzygium jambos</i>	$y = 2,363e - 05 * (x)^{2,466}$	0,993	2,2e-16
Jacaranda	<i>Jacaranda mimosifolia</i>	$y = 8,618e - 05 * (x)^{2,151}$	0,961	2,2e-16
Ficus	<i>Laurel benjamina</i>	$y = 7,315e - 06 * (x)^{2,710}$	0,908	2,2e-16
Matiliguatate	<i>Tabebuia rosea</i>	$y = 7,432e - 05 * (x)^{2,237}$	0,971	2,2e-16
Matasano	<i>Casimiroa edulis</i>	$y = 0,000228 * (x)^{1,9831}$	0,963	2,2e-16
Trueno	<i>Ligustrum</i>	$y = 4,805e - 05 * (x)^{2,331}$	0,946	2,2e-16
Calistemo	<i>Callistemon speciosus</i>	$y = 5,042e - 05 * (x)^{2,281}$	0,975	2,2e-16
Ciprés común	<i>Cupressus lusitánica</i>	$y = 2,744e - 05 * (x)^{2,464}$	0,961	0,01416
Casuarina	<i>Casuarina equisetifolia</i>	$y = 8,062e - 05 * (x)^{2,145}$	0,913	2,2e-16
Magnolia	<i>Magnolia grandiflora</i>	$y = 4,191e - 05 * (x)^{2,321}$	0,964	4,434e-09
Eucalipto	<i>Corymbia torelliana</i>	$y = 5,110e - 06 * (x)^{3,002}$	0,944	4,434e-09

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Donde las variables representan:

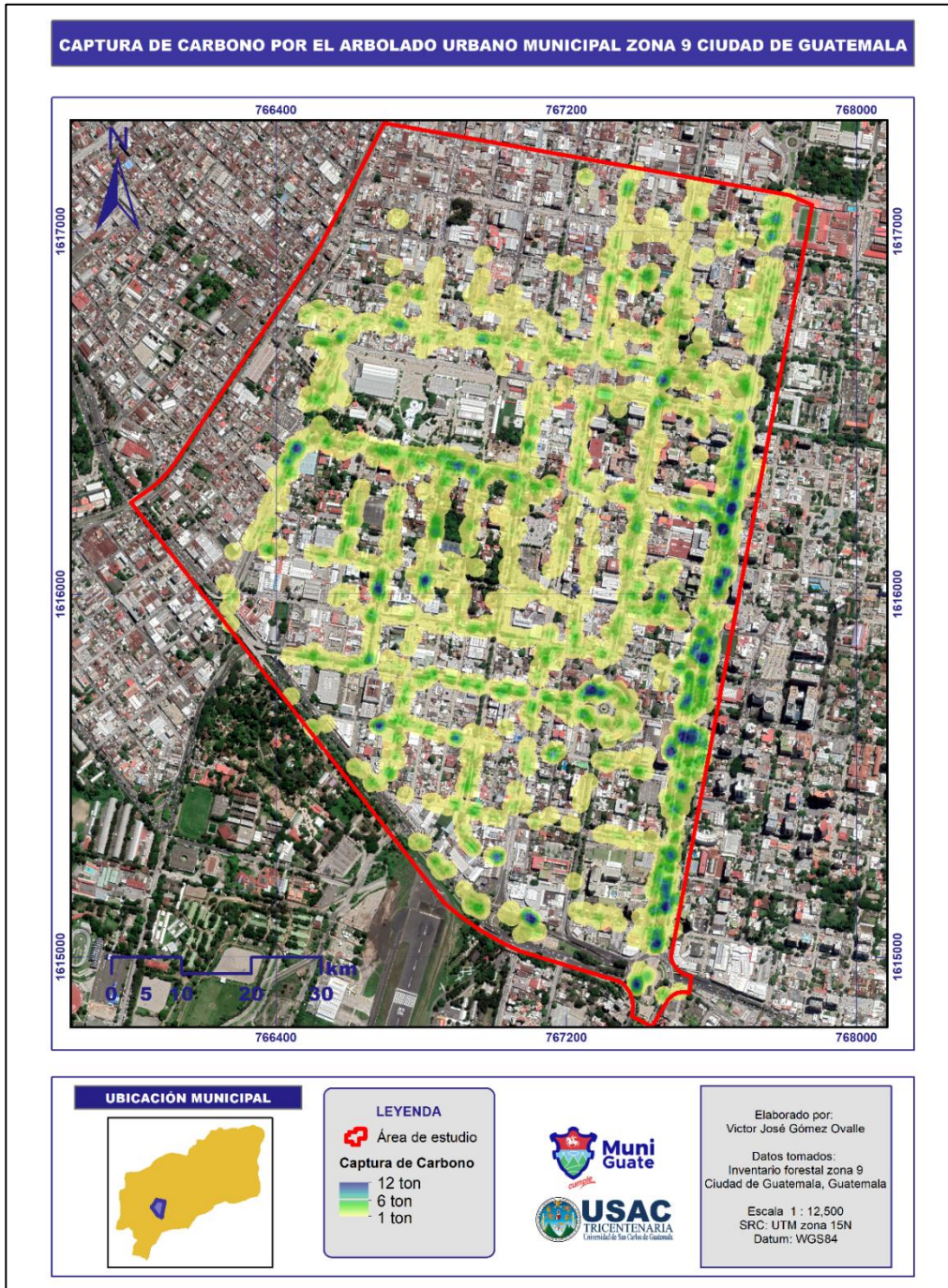
Y = cantidad de carbono que es capturado por la especie de interés (ton)

X = DAP (cm) del árbol que se está estudiando

6.4. Mapas de captura de carbono y producción de O₂

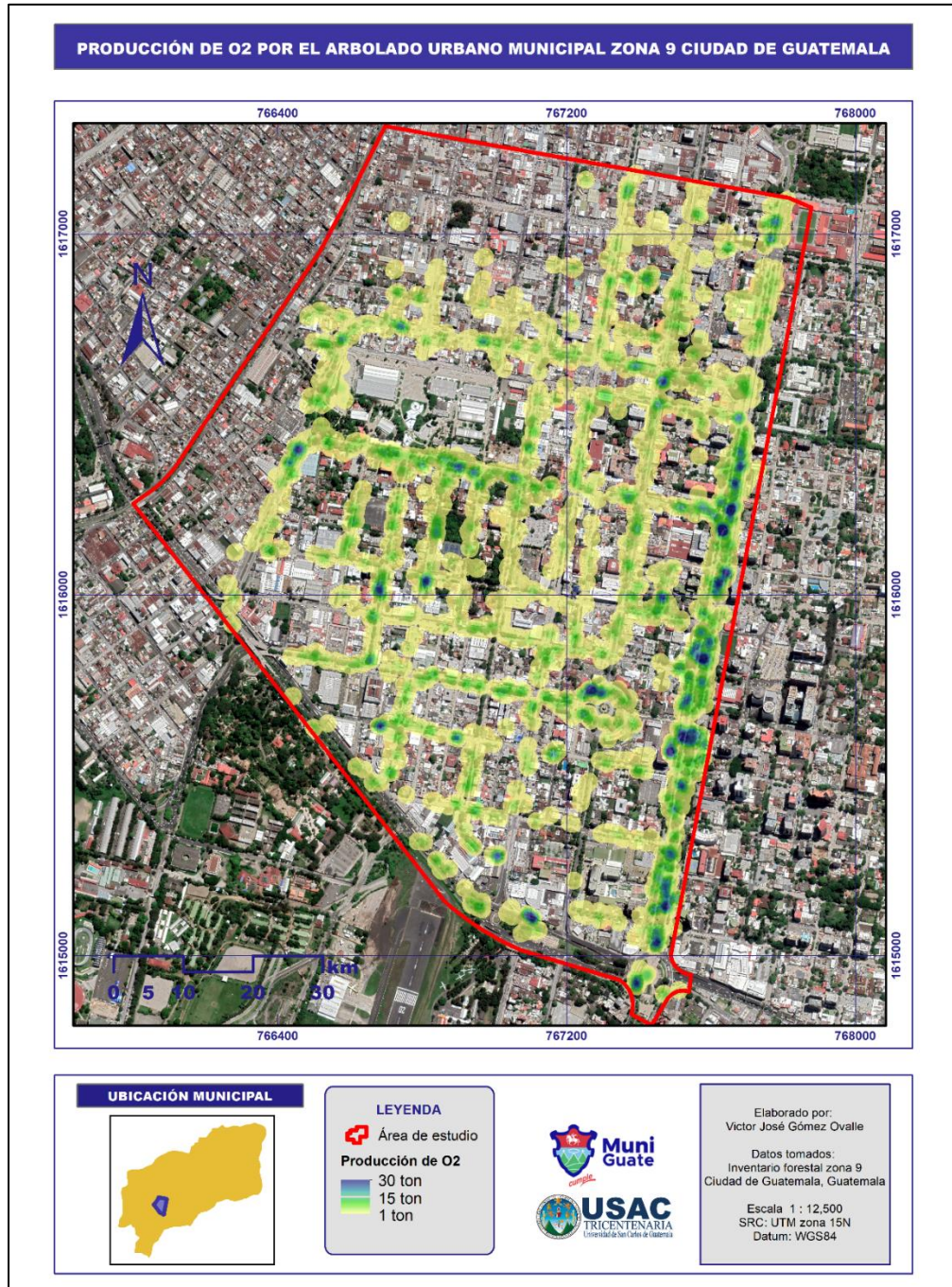
A continuación, en las figuras 29 y 30 se presentan las capturas y producción de O₂.

Figura 29. Mapa de captura de carbono por el arbolado urbano



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS 10.3.1.

Figura 30. Mapa de producción de O₂ por el arbolado urbano



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS 10.3.1.

7. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Tomando en consideración los elementos claves y los objetivos de esta investigación, se redactó la interpretación de resultados de la siguiente forma.

7.1. Análisis de la densidad seca de las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9

En la tabla III se presentan los resultados obtenidos, una vez culminado el proceso de secado y medición de volumen en cada una de las muestras de las especies seleccionadas para esta investigación. Dicha tabla muestra el promedio y su respectiva desviación estándar (S), para cada una de las especies, como se puede observar el valor de la desviación está por debajo de 0,09, con esto se puede concluir que existe de baja a nula variabilidad en los datos obtenidos en laboratorio.

La figura 14 muestra los gráficos de distribución en la densidad seca para cada una de las especies, dando como resultado una semejanza a una distribución normal. El control de calidad para esta variable debe ser rigurosa, ya que como se puede observar en la descripción de la metodología esta variable es directamente proporcional a la captura de carbono y producción de O_2 , al ser esta variable proporcional se puede asumir que a mayor densidad seca, mayor será la captura de carbono que tendrá una especie, esta variable puede ser determinante en la selección de especies con el fin de obtener una mayor captura de carbono en un área de interés; claro se deben tomar en cuenta otras variables como: clima, terreno, tipo de suelo y la respectiva intersección con carreteras o alumbrados públicos.

7.2. Análisis de la captura de carbono por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9

En la tabla IV, se presenta el total de carbono que fue capturado por cada especie registrada en el inventario forestal de la zona 9, Ciudad de Guatemala, como se observa en la figura 15, el gráfico de barras indica que la especie de *Cupressus lusitánica* (ciprés común) fue la especie que más carbono ha capturado en el área de estudio (192,46 ton), cabe resaltar que este valor está en función del número de árboles de la misma especie que se encuentran registrados en el inventario (para esta especie 348 individuos) y características particulares de cada especie (densidad seca), el carbono total capturado en toda la zona 9 de la Ciudad de Guatemala es de 1 027,26 toneladas; (de 3182 árboles registrados). El valor de este dato toma relevancia como medida en el pago por servicios ambientales o en la compensación de gases de CO₂ emitidos a la atmósfera, además, puede ser un indicador en estudios de adaptación al cambio climático.

7.3. Análisis de la producción de O₂ por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9

Al igual que la captura del carbono; la producción de O₂ está en función de la población de árboles por especie presente en el inventario (3182 para este estudio) y características particulares para cada especie, como se puede observar en la tabla V y figura 16 la especie *Cupressus lusitánica* (ciprés común) es la especie que más O₂ ha producido (513,28 ton); el total de oxígeno producido en la zona de estudio es de 2 739,70 tO₂, con este dato se evidencia lo recopilado en la literatura como uno de los servicios que presta el arbolado a la ciudad, además de regular el clima y mitigar la cantidad de gases de CO₂ que son emitidos a la atmósfera por las actividades humanas de la ciudad.

7.4. Análisis de las curvas de captura de carbono y ecuaciones alométricas por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9

De la figura 17 a la 28 se presentan los gráficos de dispersión en donde el eje Y está representado por la cantidad de carbono que es capturado por un árbol en función de su DAP, que es representado en el eje X, además, en cada gráfico de dispersión se encuentra la línea de tendencia siendo esta del tipo potencial. La tabla VI presenta las ecuaciones alométricas construidas a partir de los gráficos de dispersión y la línea de tendencia, como se puede observar en dicha tabla, el coeficiente de determinación (R^2) es mayor a 0,86 para todas las ecuaciones, esto permitirá tener una buena estimación de la cantidad de carbono que puede ser capturado por un árbol en función de su DAP, asimismo, la correlación de Pearson es superior a 0,85, dato que indica que existe una dependencia fuerte entre ambas variables, es decir a mayor DAP mayor será la captura de carbono que tenga un árbol.

7.5. Análisis de los mapas de captura de carbono y producción de O₂ por las especies muestreadas del arbolado urbano de zona 9

En las figuras 29 y 30, se presentan de forma gráfica las principales calles y avenidas donde la concentración de captura de carbono y producción de O₂ es mucho mayor que en otros puntos del área de estudio, dichas zonas coinciden evidentemente con los principales parques, plazas y avenidas donde la concentración de árboles es mucho mayor, evidenciando una vez más que como la bibliografía lo propone, estos ecosistemas pueden funcionar como pequeños sumideros de CO₂ en una ciudad en constante crecimiento, la constante actualización de estos mapas cartográficos pueden ser de ayuda para la planificación de futuros parques o ampliar la cobertura forestal dentro de la zona

y con ello saber los puntos donde existe potencial para aumentar la cantidad de captura de carbono y tomar acciones para mejorar la adaptación a los efectos del cambio climático.

CONCLUSIONES

1. Utilizando el método indirecto (*carbon stocks*) se determinó una captura total de carbono de 1 027,29 toneladas, además, una producción total de oxígeno (O₂) de 2 739,70 toneladas en la zona 9 de la Ciudad de Guatemala.
2. La densidad seca promedio en mg/cm³ para las especies evaluadas es: *Platymiscium dimorphandrum*: 0,6591; *Syzygium jambos*: 0,7946; *Jacaranda mimosifolia*: 0,5112; *Laurel benjamina*: 0,4758; *Tabebuia rosea*: 0,5852; *Casimiroa edulis*: 0,6756; *Ligustrum lucidum*: 0,7101; *Callistemon speciosus*: 0,6503; *Cupressus lusitánica*: 0,5712; *Casuarina equisetifolia*: 0,6269; *Magnolia grandiflora*: 0,5672; *Corymbia torelliana*: 0,8036.
3. El total de carbono capturado en toneladas por las especies evaluadas es: *Platymiscium dimorphandrum*: 6,73; *Syzygium jambos*: 1,43; *Jacaranda mimosifolia*: 151,49; *Laurel benjamina*: 118,64; *Tabebuia rosea*: 173,35; *Casimiroa edulis*: 125,65; *Ligustrum lucidum*: 109,58; *Callistemon speciosus*: 19,10; *Cupressus lusitánica*: 192,46; *Casuarina equisetifolia*: 29,22; *Magnolia grandiflora*: 81,57; *Corymbia torelliana*: 18,07.
4. El total de oxígeno (O₂) liberado a la atmósfera en toneladas por las especies estudiadas es: *Platymiscium dimorphandrum*: 17,94; *Syzygium jambos*: 3,81; *Jacaranda mimosifolia*: 404,02; *Laurel benjamina*: 316,46; *Tabebuia rosea*: 462,32; *Casimiroa edulis*: 335,10; *Ligustrum lucidum*: 292,25; *Callistemon speciosus*: 50,89; *Cupressus lusitánica*: 513,28;

Casuarina equisetifolia: 77,93; *Magnolia grandiflora*: 217,54; *Corymbia torelliana*: 48,19.

5. Las ecuaciones alométricas desarrolladas para cada especie son del tipo potencial: $Y = a * x^k$, siendo “x” el DAP en cm, “Y” el total de carbono capturado en toneladas y los parámetros de ajuste “a” y “k” calculados para cada especie son los siguientes: *Platymiscium dimorphandrum*: $a = 3,027e^{-5}$, $k = 2,5667$; *Syzygium jambos*: $a = 2,363e^{-5}$, $k = 2,466$; *Jacaranda mimosifolia*: $a = 8,618e^{-5}$, $k = 2,151$; *Laurel benjamina*: $a = 7,315e^{-6}$, $k = 2,710$; *Tabebuia rosea*: $a = 7,432e^{-5}$, $k = 2,237$; *Casimiroa edulis*: $a = 2,28e^{-4}$, $k = 1,9831$; *Ligustrum lucidum*: $a = 4,805e^{-5}$, $k = 2,331$; *Callistemon speciosus*: $a = 5,042e^{-5}$, $k = 2,281$; *Cupressus lusitánica*: $a = 2,744e^{-5}$, $k = 2,464$; *Casuarina equisetifolia*: $a = 8,062e^{-5}$, $k = 2,145$; *Magnolia grandiflora*: $a = 4,191e^{-5}$, $k = 2,321$; *Corymbia torelliana*: $a = 5,110e^{-6}$, $k = 3,002$.
6. El uso de los sistemas de información geográfica es útil para representar de forma gráfica las ubicaciones donde la captura de carbono y producción de oxígeno es mayor, siendo estas: la avenida Reforma, 9ª calle y la Plazuela España de la zona 9, Ciudad de Guatemala.

RECOMENDACIONES

1. Replicar esta metodología en las alcaldías auxiliares de otras zonas de la ciudad, evaluando especies distintas a las de este estudio y, así conocer el aporte de los ecosistemas forestales, siempre y cuando las condiciones climáticas y topográficas sean parecidas a las de la zona de estudio de esta investigación.
2. Utilizar las ecuaciones alométricas construidas para las demás zonas de la Ciudad de Guatemala que tengan especies similares a las analizadas en esta investigación, ya que el coeficiente de correlación R^2 es bastante confiable y permite una buena estimación de la captura de carbono.
3. Considerar la densidad seca de un árbol, ya que es un buen indicador para la selección de especies, cuando el objetivo es capturar una mayor cantidad de carbono.
4. Tomar en cuenta los resultados de esta investigación, para la planificación de futuros parques ecológicos, la cual podría ser un indicador sobre la selección de especies forestales que se planea usar en función de los objetivos establecidos.

BIBLIOGRAFÍA

1. BROWN, Sandra. *Estimating Biomass and Biomass Change of Tropical Forests: A Primer*. [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/239974368_Estimating_Biomass_and_Biomass_Change_of_Tropical_Forests_A_Primer>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
2. CanalTIC. *Emisiones de gases contaminantes*. [en línea]. <https://canaltic.com/blog/html/exe/energias/emisiones_de_gases_contaminantes.html>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
3. CHAMBI CONDORI, Pedro Pablo. *Valoración económica de secuestro de carbono mediante simulación aplicado a la zona boscosa del río Inambari y Madre de Dios*. [en línea]. <<https://www.iufro.org/download/file/6977/153/ws13papeles2.pdf/>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
4. CHAVE, Jerome. *Medición de densidad de madera en árboles Tropicales. Manual de campo*. [en línea]. <[http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/wood_density_spanish\[1\].pdf](http://www.rainfor.org/upload/ManualsSpanish/wood_density_spanish[1].pdf)>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
5. Consejo Nacional de Cambio Climático. *Líneas de investigación en cambio climático*. [en línea]. <<http://redfia.usac.edu.gt/wp-content/uploads/2019/09/lineas-de-investigacio%CC%81n-en-cambio-climatico.pdf>>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].

6. CORDERO, Luis Gustavo. *Investigación preliminar de los contaminantes gaseosos y sólidos en las zonas de mayor tráfico del área urbana de la ciudad de Guatemala*. Trabajo de graduación de Ing. Sanitaria y Recursos Naturales. Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 1972. 50 p.
7. DÍAZ FRANCO, Rosalino; et al. *Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en Pinus patula Schl. et Cham.* [en línea]. <<http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v13n1/1405-0471-mb-13-01-25.pdf>>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
8. DOMÍNGUEZ MADRID, Ana Yurendy. *Estimaciones de captura de los parques y emisiones de CO2 vehicular en Tijuana, B.C.* [en línea]. <<https://www.colef.mx/posgrado/tesis/20141174/>>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
9. EMANUELLI, Patricio; MILLA, Fabián; JIMÉNEZ, Abner. *Bases técnicas para la construcción de funciones alométricas de volumen y biomasa en Centro América y República Dominicana.* [en línea]. <https://www.researchgate.net/publication/305295054_Bases_Tecnicas_para_la_Construccion_de_Funciones_Alometricas_de_volumen_y_biomasa_en_Centro_America_y_Republica_Dominicana>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
10. FONSECA, William; ALICE, Federico; REY, José María. *Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica.* [en línea]. <<https://www.scielo.cl/pdf/bosque/v30n1/art06.pdf>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].

11. GONZÁLEZ DE CANALES, Carlos Priego. *Beneficios del arbolado urbano*. [en línea]. <<https://digital.csic.es/bitstream/10261/24578/1/Beneficios%20del%20arbolado%20urbano.pdf>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
12. GREEN URBAN DATA. *Los gases de efecto invernadero y su relación con la temperatura*. [en línea]. <<https://www.greenurbandata.com/2018/10/30/temperatura-y-gases-de-efecto-invernadero/>>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].
13. IPCC. *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation*. [en línea]. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/SREX_Full_Report-1.pdf>. [Consulta: 23 de marzo de 2020].
14. KILCÁN NOGUERA, Eleodoro Rogelio. *Estimación del carbono almacenado en el bosque latifoliado de la comunidad Se'tzol, sierra Santa Cruz, Livingston, Izabal, Guatemala, C. A.* Trabajo de graduación de Ing. agrónomo. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2013. 83 p.
15. MACKENZIE, Davis. *Ingeniería y ciencias ambientales*. México: McGraw-Hill/Interamericana de México, 2005. 768 p.
16. MARN. *Acuerdo Gubernativo 137-2016. Reglamento de evaluación, control y seguimiento ambiental*. [en línea]. <<https://www.marn.gob.gt/Multimedios/4739.pdf>>. [Consulta: 20 de febrero de 2020].

17. _____. *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero.* [en línea]. <<https://www.marn.gob.gt/Multimedios/2682.pdf>>. [Consulta: 20 de febrero de 2020].
18. Ministerio de Gobernación. *Decreto 68-86. Ley de protección y mejoramiento del medio ambiente.* [en línea]. <<http://www.infom.gob.gt/archivos/gobierno-abierto/compendio/LEY%20DE%20PROTECCION%20Y%20MEJORAMIENTO%20DEL%20MEDIO%20AMBIENTE.pdf>>. [Consulta: 22 de febrero de 2020].
19. MONTEPEQUE SIERRA, Marissa Eugenia. *Estimación de biomasa y contenido de carbono en plantaciones de eucalyptus camaldulensis dehn y actividades de conservación de los recursos naturales, en la empresa Pantaleón S. A.* Trabajo de graduación de Ing. agrónoma. Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 2007. 138 p.
20. ONU. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.* [en línea]. <<https://www.acnur.org/fileadmin/Documentos/BDL/2009/6907.pdf>>. [Consulta: 22 de febrero de 2020].
21. ORELLANA DÍAZ, Omar. *Estimación del carbono almacenado en la zona núcleo del parque nacional montaña de Celaque.* [en línea]. <<http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11098e/A11098e.pdf>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].

22. PIMIENTA-BARRIOS, Eulogio; et al. *Servicios ambientales de la vegetación en ecosistemas urbanos en el contexto del cambio climático*. [en línea]. <<http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v5n22/v5n22a3.pdf>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
23. RUÍZ-DÍAZ, César; et al. *Metodologías para estimar biomasa y carbono en especies forestales de México*. [en línea]. <http://www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/sites/www.ciidiroaxaca.ipn.mx/revista/files/pdf/vol12num1/nyd_vol12_num1_2014_art3.pdf>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
24. TER-MIKAELIANA, Michael; KORZUKHINB, Michael. *Biomass equations for sixty-five North American tree species*. [en línea]. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378112797000194>>. [Consulta: 25 de marzo de 2020].
25. Unitips. *Ciclo del carbono*. [en línea]. <<https://blog.unitips.mx/ciclo-del-carbono-tema-de-examen-uam>>. [Consulta: 22 de marzo de 2020].

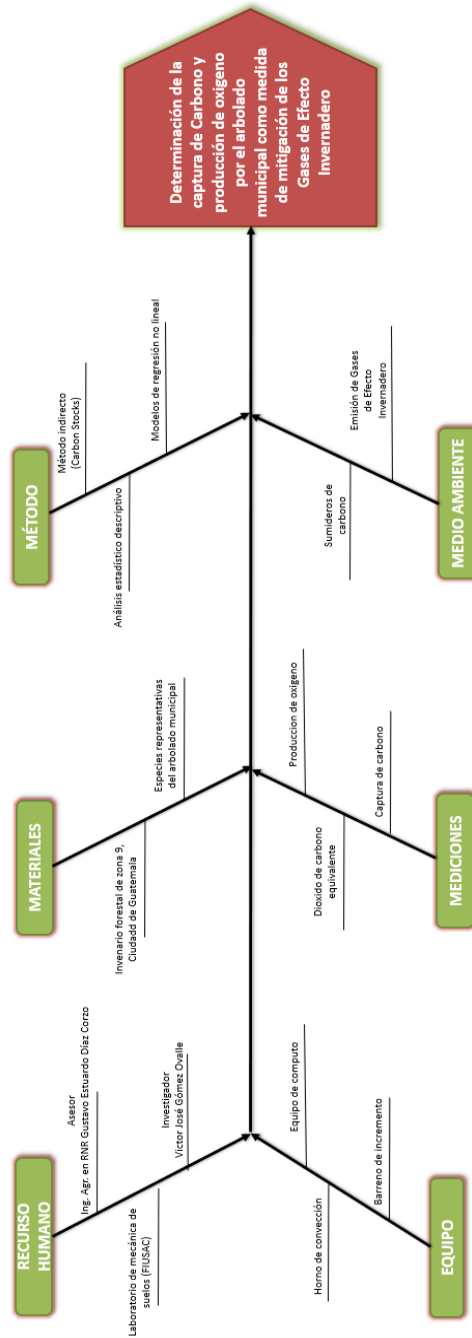
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**

Curso	Temas
Matemática Básica 1	Modelación con funciones potenciales
Estadística 1	Estadística descriptiva
Ecología	Calentamiento climático global
Programación de Computadoras 1	Editores de texto y hojas de cálculo
Química Ambiental	Ciclos biogeoquímicos
Legislación Ambiental 1	Principales leyes ordinarias que regulan el ambiente en Guatemala
Legislación Ambiental 2	Introducción a los tratados internacionales
Taller de Sistemas de Información Geográfica	Operaciones con entidades geográficas vectoriales
Taller de Introducción a la Programación con R	Modelos de dispersión y análisis estadísticos
Calidad del Aire	Contaminantes atmosféricos

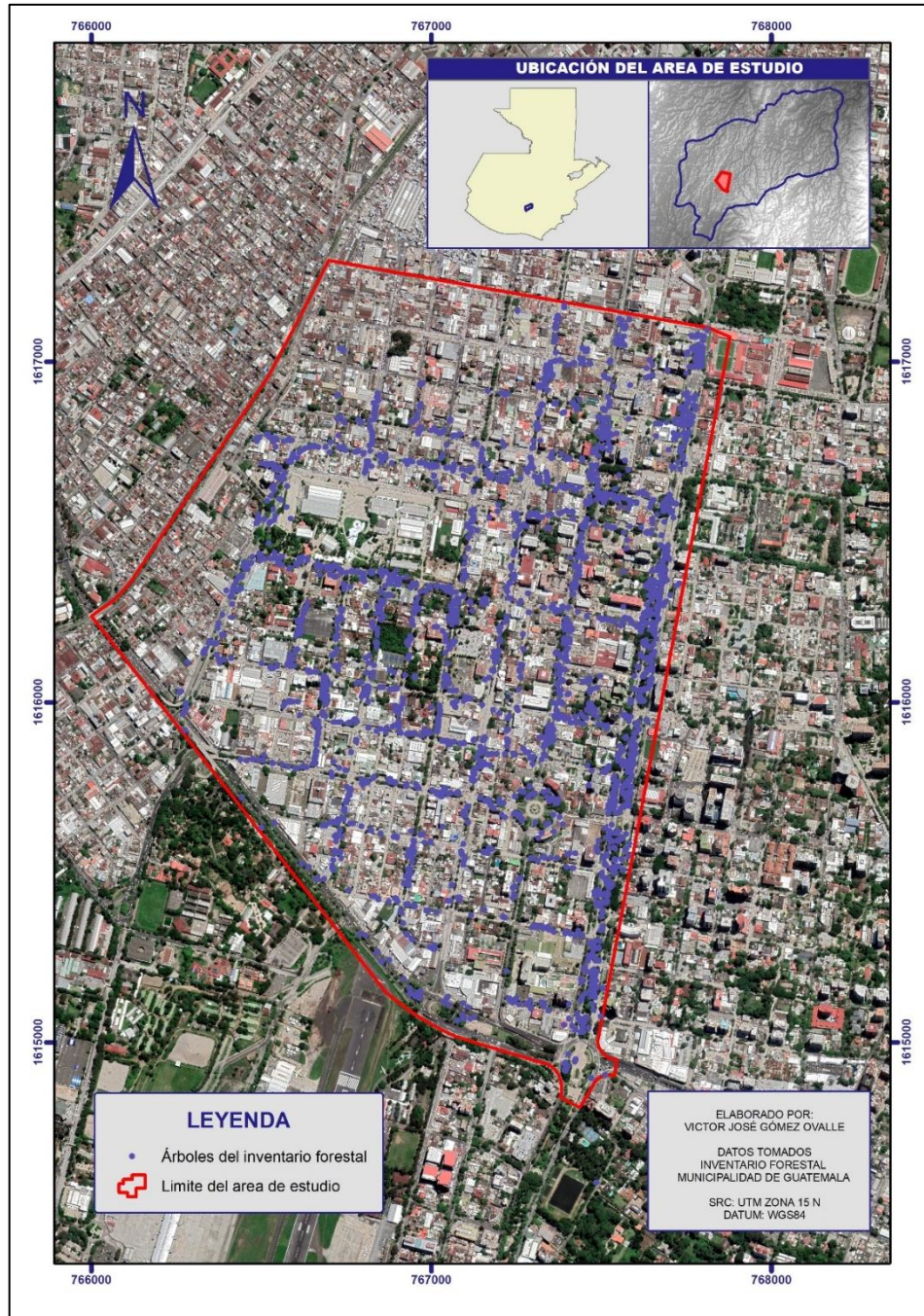
Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Apéndice 2. Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia, empleando Visio 2016.

Apéndice 3. Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia, empleando ArcGIS 10.3.1.

Apéndice 4. **Tablas de secado de muestras para el cálculo de la densidad seca**

Código de muestra	Especie	Peso húmedo en campo (mg)							Tarro	Peso tarro con muestras (mg)	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución
		1	2	3	4	5	6	7				
001	Hormigo	840,00	1 290,00	1 170,00	1 280,00	1 500,00			S12	40 140,00	39 420,00	1,79
002	Manzana rosa	1 300,00	1 290,00	910,00	1 180,00	1 060,00			M2	39 570,00	38 770,00	2,02
003	Jacaranda	1 000,00	840,00	860,00	980,00	1 180,00			3D2	41 960,00	41 360,00	1,43
004	Ficus	850,00	1 090,00	900,00	870,00	680,00			E10	50 820,00	50 260,00	1,10
005	Matiliguat	990,00	1 000,00	1 080,00	1 100,00	730,00			SO	39 770,00	39 100,00	1,68
006	Matasano	1 480,00	1 090,00	1 000,00	960,00	860,00			T3	38 950,00	38 300,00	1,67
007	Trueno	750,00	730,00	890,00	950,00	880,00			E8	50 060,00	49 540,00	1,04
008	Calistemo	1 070,00	900,00	1 100,00	1 030,00	990,00			E14	50 890,00	50 090,00	1,57
009	Ciprés	930,00	750,00	920,00	560,00	590,00			E6	50 070,00	49 520,00	1,10
010	Casuarina	800,00	860,00	1 300,00	1 190,00				G1	46 970,00	46 430,00	1,15
011	Magnolia	1 220,00	1 180,00	1 110,00	1 200,00	1 100,00	1 160,00	1 240,00	3D1L	44 090,00	42 920,00	2,65
012	Eucalipto	1 100,00	740,00	620,00	510,00	450,00			G23	41 660,00	41 180,00	1,15

Fecha observación 22/04/2019		Fecha observación 23/04/2019		Fecha observación 24/04/2019		Fecha observación 25/04/2019		Fecha observación 26/04/2019		Fecha observación 29/04/2019		Fecha observación 30/04/2019	
Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución	Peso seco tarro con muestras (mg)	% disminución
39 420,00	1,79	39 400,00	0,05	39 390,00	0,03	39 380,00	0,03	39 410,00	-0,08	39 430,00	-0,05	39 470,00	-0,10
38 770,00	2,02	38 780,00	-0,03	38 760,00	0,05	38 770,00	-0,03	38 760,00	0,03	38 790,00	-0,08	38 800,00	-0,03
41 360,00	1,43	41 370,00	-0,02	41 340,00	0,07	41 360,00	-0,05	41 370,00	-0,02	41 390,00	-0,05	41 500,00	-0,27
50 260,00	1,10	50 280,00	-0,04	50 250,00	0,06	50 260,00	-0,02	50 250,00	0,02	50 280,00	-0,06	50 300,00	-0,04
39 100,00	1,68	39 120,00	-0,05	39 100,00	0,05	39 090,00	0,03	39 110,00	-0,05	39 110,00	0,00	39 150,00	-0,10
38 300,00	1,67	38 270,00	0,08	38 260,00	0,03	38 260,00	0,00	38 270,00	-0,03	38 300,00	-0,08	38 300,00	0,00
49 540,00	1,04	49 560,00	-0,04	49 520,00	0,08	49 530,00	-0,02	49 530,00	0,00	49 550,00	-0,04	49 600,00	-0,10
50 090,00	1,57	50 110,00	-0,04	50 100,00	0,02	50 070,00	0,06	50 080,00	-0,02	50 120,00	-0,08	50 120,00	0,00
49 520,00	1,10	49 550,00	-0,06	49 500,00	0,10	49 520,00	-0,04	49 520,00	0,00	49 540,00	-0,04	49 570,00	-0,06
46 430,00	1,15	46 430,00	0,00	46 380,00	0,11	46 410,00	-0,06	46 410,00	0,00	46 430,00	-0,04	46 480,00	-0,11
42 920,00	2,65	42 960,00	-0,09	42 910,00	0,12	42 930,00	-0,05	42 920,00	0,02	42 980,00	-0,14	43 100,00	-0,28
41 180,00	1,15	41 190,00	-0,02	41 150,00	0,10	41 160,00	-0,02	41 170,00	-0,02	41 390,00	-0,53	41 220,00	0,41

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Apéndice 5. **Tablas de diámetro y altura de muestras para el cálculo de la densidad seca**

Código de muestra	Especie	Diámetro i(mm)					Altura i(mm)						
		1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	7
001	Hormigo	5,09	5,09	5,1	5,05	5,05	62,02	109,2	80,48	78,8	106,8		
002	Manzana rosa	5,23	5,05	5,18	5,15	5,15	76,93	85,06	63,52	73,2			
003	Jacaranda	5	5	5	5	5	84	77	75	79	92		
004	Ficus	5	5	5	5	5	85	94	82	74	72,5		
005	Matiliguate	5	5	5	5	5	80	83	82,5	75	54,5		
006	Matasano	5	5	5	5	5	93	74	75	65	54,5		
007	Trueno	5	5	5	5	5	51	46	58	55	65		
008	Calistemo	5	5	5	5	5	74	64	80,5	74	73,5		
009	Ciprés	5	5	5	5	5	50,5	62,5	70	74	41,5		
010	Casuarina	5	5	5	5	5	63,5	56	79,5	84			
011	Magnolia	5	5	5	5	5	92	90	86	84	85	91,5	94
012	Eucalipto	5	5	5	5	5	60	40	30	28	28		

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.


Apéndice 6. **Tabla resumen inventario forestal zona 9, Ciudad de Guatemala**

Nombre científico	Nombre común	No. árboles	Densidad (kg/m ³)	Carbono (ton)	CO ₂ eq (ton)	O ₂ (ton)
<i>Platymiscium dimorphandrum</i>	Hormigo	5	659,1	6,73	26,67	17,95
<i>Syzygium jambos</i>	Manzana rosa	60	794,6	1,43	5,25	3,82
<i>Jacaranda mimosifolia</i>	Jacaranda	429	511,2	151,49	555,46	404,02
<i>Laurel benjamina</i>	Ficus	196	475,8	118,64	435,01	316,41
<i>Tabebuia rosea</i>	Matiliguate	482	585,2	173,75	635,612	462,32
<i>Casimiroa edulis</i>	Matasano	450	675,6	125,65	460,71	335,10
<i>Ligustrum</i>	Trueno	407	710,1	109,58	401,8	292,25
<i>Callistemon speciosus</i>	Calistemo	140	650,3	19,10	69,97	50,89
<i>Cupressus sempervirens</i>	Ciprés común	348	571,2	192,56	705,68	513,28
<i>Casuarina equisetifolia</i>	Casuarina	106	626,9	29,22	107,15	77,93
<i>Magnolia grandiflora</i>	Magnolia	545	567,2	81,57	299,07	217,54
<i>Corymbia torelliana</i>	Eucalipto	14	803,6	18,07	66,27	48,19
Total		3182		1027,29	3766,65	2739,71

Fuente: elaboración propia, empleando Excel 365.

Apéndice 7. **Bitácora y etiqueta de muestra en campo**

Etiqueta			
Código de muestra		Número de muestra	
Fecha		Hora	:
Nombre del encargado			
Nombre de la especie			
Dirección			
Ubicación geográfica	N	W	
Observaciones			

Bitácora de campo			
Determinación de captura de carbono del arbolado urbano zona 9, Ciudad de Guatemala 			
Datos del observador			
Fecha		Hora	:
Nombre del encargado			
Nombre del supervisor			
Datos generales			
Estado fitosanitario de las especies			
Especies muestreadas			
Dirección			
Datos de campo			
Altura (m)			
Diámetro a la altura del pecho "DAP" (cm)			
Diámetro base "DB" (cm)			
Código de muestras			
Muestra 1			
Muestra 2			
Muestra 3			
Observaciones:			

Fuente: elaboración propia, empleado Excel 365.

Apéndice 8. Panel de fotografías



Continuación del apéndice 8.



Foto 10. Árbol eucalipto



Foto 11. Árbol hormigo



Foto 12. Árbol trueno



Foto 13. Extracción de muestra



Foto 14. Barreno de incremento

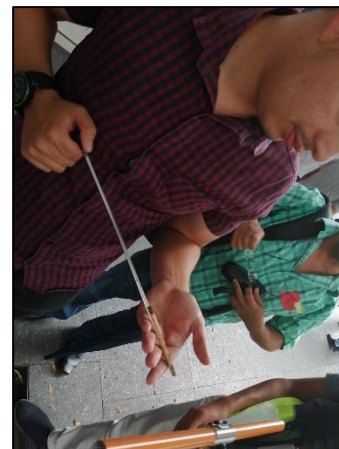


Foto 15. Muestra



Foto 16. Muestras pesadas



Foto 17. Tarado de muestras



Foto 18. Secado de muestras

Fuente: elaboración propia.