

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

ESTIMACIÓN DE CARBONO AÉREO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) DE  
CATORCE Y QUINCE AÑOS DE EDAD; CHAHAL, ALTA VERAPAZ

TESIS DE GRADO

**HUBERT GERARDO LOPEZ GUZMAN**

CARNET 24612-11

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, ABRIL DE 2017  
CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

**UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES

ESTIMACIÓN DE CARBONO AÉREO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L.f.) DE  
CATORCE Y QUINCE AÑOS DE EDAD; CHAHAL, ALTA VERAPAZ

TESIS DE GRADO

TRABAJO PRESENTADO AL CONSEJO DE LA FACULTAD DE  
CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS

POR

**HUBERT GERARDO LOPEZ GUZMAN**

PREVIO A CONFERÍRSELE

EL TÍTULO DE INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES EN EL  
GRADO ACADÉMICO DE LICENCIADO

SAN JUAN CHAMELCO, ALTA VERAPAZ, ABRIL DE 2017  
CAMPUS "SAN PEDRO CLAVER, S . J." DE LA VERAPAZ

## **AUTORIDADES DE LA UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR**

RECTOR: P. MARCO TULIO MARTINEZ SALAZAR, S. J.  
VICERRECTORA ACADÉMICA: DRA. MARTA LUCRECIA MÉNDEZ GONZÁLEZ DE PENEDO  
VICERRECTOR DE INVESTIGACIÓN Y PROYECCIÓN: ING. JOSÉ JUVENTINO GÁLVEZ RUANO  
VICERRECTOR DE INTEGRACIÓN UNIVERSITARIA: P. JULIO ENRIQUE MOREIRA CHAVARRÍA, S. J.  
VICERRECTOR ADMINISTRATIVO: LIC. ARIEL RIVERA IRÍAS  
SECRETARIA GENERAL: LIC. FABIOLA DE LA LUZ PADILLA BELTRANENA DE LORENZANA

## **AUTORIDADES DE LA FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**

DECANO: DR. ADOLFO OTTONIEL MONTERROSO RIVAS  
VICEDECANA: LIC. ANNA CRISTINA BAILEY HERNÁNDEZ  
SECRETARIO: MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA  
DIRECTOR DE CARRERA: MGTR. JOSÉ MANUEL BENAVENTE MEJÍA

## **NOMBRE DEL ASESOR DE TRABAJO DE GRADUACIÓN**

MGTR. EDWIN ESTUARDO VAIDES LÓPEZ

## **TERNA QUE PRACTICÓ LA EVALUACIÓN**

MGTR. CARLOS ERNESTO ARCHILA CARDONA  
MGTR. MANUEL SABINO MOLLINEDO GARCÍA  
ING. ROBERTO WALDEMAR MOYA FERNÁNDEZ

San Juan Chamelco, Alta Verapaz, 18 de Marzo de 2017

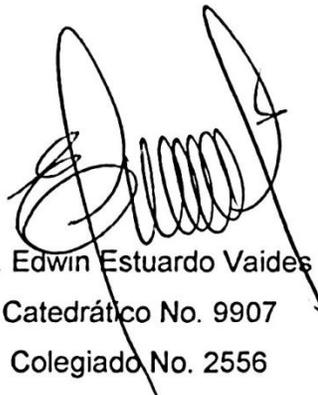
Consejo de Facultad  
Ciencias Ambientales y Agrícolas  
Presente.

Distinguidos miembros del Consejo:

Por este medio hago constar que he procedido a revisar el Informe Final de Tesis del estudiante Hubert Gerardo López Guzmán, que se identifica con carné 2461211, titulado: **“ESTIMACIÓN DE CARBONO AÉREO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L. f.) DE CATORCE Y QUINCE AÑOS DE EDAD; CHAHAL ALTA VERAPAZ”**.

El cual considero que cumple con los requisitos establecidos por la Facultad para ser aprobado, previo a su autorización de impresión.

Atentamente,



MSc. Ing. Edwin Estuardo Vaidés López  
Catedrático No. 9907  
Colegiado No. 2556



Universidad  
Rafael Landívar  
Tradición Jesuita en Guatemala

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS  
No. 06689-2017

### Orden de Impresión

De acuerdo a la aprobación de la Evaluación del Trabajo de Graduación en la variante Tesis de Grado del estudiante HUBERT GERARDO LOPEZ GUZMAN, Carnet 24612-11 en la carrera LICENCIATURA EN INGENIERÍA FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES, del Campus de La Verapaz, que consta en el Acta No. 0636-2017 de fecha 3 de abril de 2017, se autoriza la impresión digital del trabajo titulado:

ESTIMACIÓN DE CARBONO AÉREO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L.f.)  
DE CATORCE Y QUINCE AÑOS DE EDAD; CHAHAL, ALTA VERAPAZ

Previo a conferírsele el título de INGENIERO FORESTAL CON ÉNFASIS EN SILVICULTURA Y MANEJO DE BOSQUES en el grado académico de LICENCIADO.

Dado en la ciudad de Guatemala de la Asunción, a los 24 días del mes de abril del año 2017.



**MGTR. LUIS MOISES PEÑATE MUNGUÍA, SECRETARIO**  
**CIENCIAS AMBIENTALES Y AGRÍCOLAS**  
**Universidad Rafael Landívar**

## **AGRADECIMIENTOS**

### **A:**

Mi asesor Ing. MSc. Edwin Estuardo Vaides López por su asesoría, consejos, enseñanza y sus valiosos aportes en el trabajo de investigación.

Señor Juan Sobvio por el apoyo y confianza al proporcionar el espacio dentro de su finca para realizar la investigación.

Ing. Agr. MBA Carlos Ernesto Archila Cardona por sus consejos y aportes para la culminación de la investigación.

Ing. Agr. MSc. Manuel Sabino Mollinedo García por sus consejos en la elaboración del documento final.

Ing. Roberto Moya por su apoyo incondicional como coordinador y enseñanzas en el proceso de estudios.

Personal del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala por su apoyo en la fase de análisis de laboratorio.

Mis Amigos Luis Sosa Chang, Miguel Sic Choc, Elvis Valentín Hernández Matías, por su importante apoyo en la fase de campo de la investigación.

## DEDICATORIA

**A:**

DIOS: Por su infinito amor, fortaleza, sabiduría y la oportunidad de alcanzar esta meta y poder compartir la alegría con mi familia.

Mis Padres: José Luis López Caal y Clara Trinidad Guzmán Pacheco a quienes guardo el más grande amor y respeto. Gracias a sus consejos y esfuerzos que me ayudaron a ser una persona perseverante.

Mi Esposa: Indina Isabel Requena Quej por su amor, paciencia y apoyo incondicional en todo momento.

Mi Hija: Itzel Ruth Aurora López Requena que la amo mucho, es la razón de mi esfuerzo y motivación constante de superación.

Mi Familia: Abuelos, Hermanas, tíos, primos, sobrino que de una u otra forma han contribuido en mi formación.

Mis Amigos. Por su apoyo, consejos, compañía y formar parte de mi desarrollo integral.

## ÍNDICE

RESUMEN.....	i
SUMMARY.....	ii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MARCO TEÓRICO.....	2
2.1. MARCO CONCEPTUAL.....	2
2.1.1. Definiciones.....	2
2.1.2. Estudios realizados a nivel de región.....	12
2.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE.....	15
2.2.1. Información general.....	15
2.3. ANTECEDENTES.....	17
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	23
3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	23
3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	24
4. OBJETIVOS.....	25
4.1. GENERAL.....	25
4.2. ESPECÍFICOS.....	25
5. METODOLOGÍA.....	26
5.1. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO.....	26
5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	27
5.3. PROCEDIMIENTO DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN.....	27
5.3.1. Estimación de volumen total de las plantaciones de teca.....	27
5.3.2. Densidad de la madera y factor de conversión de biomasa a carbono.....	34
5.3.3. Cuantificación de carbono fijado y capturado anualmente.....	44
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46

6.1 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EXISTENTE EN LAS PLANTACIONES.....	46
6.1.1 Análisis estadístico del Inventario Forestal.....	46
6.1.2 Tablas de rodal del Inventario Forestal.....	48
6.2 EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE DENSIDAD Y FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO.....	56
6.2.1 Cálculo de la Densidad específica de la madera de teca.....	56
6.2.2 Estimación de biomasa de cada componente arbóreo por encima del suelo.....	56
6.2.3 Análisis de correlación de los componentes arbóreos a través de gráficas de dispersión.....	57
6.2.4 Determinación del factor de expansión de la biomasa.....	59
6.2.5 Análisis de correlación de Pearson.....	60
6.2.6 Determinación del modelo matemático.....	61
6.2.7 Evaluación de supuestos del modelo.....	62
6.2.7 Factor de conversión de biomasa a carbono.....	64
6.3 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO FIJADO Y CAPTURADO ANUALMENTE...	64
6.3.1 Carbono fijado en las plantaciones de teca.....	64
6.3.2 Captura Anual de Carbono.....	69
7. CONCLUSIONES.....	70
8. RECOMENDACIONES.....	71
9. BIBLIOGRAFÍA.....	72
10. ANEXOS.....	79
Anexo 1. Boleta de campo utilizada en el inventario forestal.....	79
Anexo 2. Boleta utilizada para la toma de variables dasométricas, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.....	80

Anexo 3. Boleta utilizada para la evaluación del peso fresco de los componentes diferentes al fuste, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.....	81
Anexo 4. Formato de la base de datos utilizada, para el vaciado de la información de biomasa, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.....	82
Anexo 5. Gráficos de las proporciones teóricas de contenido de carbono y formas de medir el DAP en las evaluaciones en campo.....	83
Anexo 6. Formato de las etiquetas utilizadas para las muestras que se llevaron a laboratorio.....	84
Anexo 7. Resultado de la medición de las variables morfométricas a un total de 20 árboles de teca con edades de catorce y quince años, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	85
Anexo 8. Promedios obtenidos de las 20 muestras del fuste de los árboles de teca, de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	86
Anexo 9. Peso fresco en Kilogramos de cada componente de los 20 árboles de teca tumbados y medidos en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	86
Anexo 10. Biomasa y factor de expansión estimados por componente vegetal encima del suelo; finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	87
Anexo 11. Resultados de correlación de Pearson realizado a través de Infostat.....	88
Anexo 12. Gráfico resultante del análisis de regresión lineal obtenido de las 20 muestras de los árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	88
Anexo 13. Gráfico resultante del análisis de regresión lineal obtenido de las 19 muestras de árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	89
Anexo 14. Resultado del análisis de regresión lineal aplicado a 18 muestras de árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	89
Anexo 15. Gráfico de dispersión representando la estimación de biomasa aérea en árboles de teca <16 cm de DAP utilizando el modelo matemático específico.....	90

Anexo 16. Gráfico de dispersión resultante de la multiplicación de 570 kg/m <sup>3</sup> como factor de corrección al volumen para la estimación de biomasa aérea en árboles de teca <16 cm de DAP.....	90
Anexo 17. Factor de conversión de biomasa a carbono estimado por componente vegetal por encima del suelo; finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	91
Anexo 18. Constancia de resultados de las pruebas de Carbono-Nitrógeno realizado en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad del Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.....	92

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.	Resultados de estudio realizado con <i>Pinus oocarpa</i> en Nicaragua, Centro América sobre la captura anual de carbono en t C/ha.....	13
Cuadro 2.	Proyección de carbono almacenado en bosques secundarios desde el año 1997 a 2030 en Costa Rica, Centro América.....	14
Cuadro 3.	Resumen de las ecuaciones más comunes utilizadas para los bosques mixtos del altiplano occidental de Guatemala.....	15
Cuadro 4	Clasificación taxonómica del árbol de teca.....	16
Cuadro 5	Ecuaciones generales para estimar carbono aéreo con base a la zona climática.....	18
Cuadro 6	Resultado de los valores promedio obtenidos en el inventario forestal, realizado a los 2 estratos con plantación de teca en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	46
Cuadro 7	Resultado del análisis estadístico para el muestreo obtenido en los dos estratos de teca de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	47
Cuadro 8	Tabla de rodal del estrato I, plantación de teca de 14 años de edad, ubicada en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	48
Cuadro 9	Tabla de rodal proyectada al área total del estrato I, plantación de teca de 14 años de edad ubicada en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	49
Cuadro 10	Tabla de rodal del estrato II plantación de teca de 15 años de edad, ubicada en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	52
Cuadro 11	Tabla de rodal proyectada al área total del estrato II, plantación de teca de 15 años de edad ubicada en la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.....	53
Cuadro 12	Variables y modelo matemático generado para estimación de biomasa aérea en árboles de teca.....	62

Cuadro 13	Carbono aéreo en el estrato I de la plantación de teca de 14 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	65
Cuadro 14	Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato I de la plantación de teca de 14 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	66
Cuadro 15	Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato II de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	67
Cuadro 16	Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato II de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	67

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Polígono del estrato I con plantación de teca establecida en el año 2002 con un área de 151.58 hectáreas, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	28
Figura 2	Polígono del estrato II con plantación de teca establecida en el año 2001 conformado por 9.62 hectáreas, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	29
Figura 3	Distribución de parcelas para el muestreo sistemático de la plantación de teca, en el estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	30
Figura 4	Distribución de parcelas para el muestreo sistemático de la plantación de teca, en el estrato II, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	31
Figura 5	Estructura del rodal de teca de 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	50
Figura 6	Gráfico de clases de posición de los árboles, en el dosel de la plantación de teca con 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	51
Figura 7	Gráfico de clases de forma del fuste, de los árboles de teca con 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz..	51
Figura 8	Estructura del rodal de teca de 15 años de edad, estrato II, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	54
Figura 9	Análisis de la posición de los árboles en el dosel de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	55
Figura 10	Porcentaje de biomasa contenida en la estructura aérea de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	57
Figura 11	Diagrama de relación lineal con DAP (cm) como variable regresora.....	58

Figura 12	Diagrama de relación potencial con altura como variable regresora.....	58
Figura 13	Diagrama de relación exponencial con diámetro de copa como variable regresora.....	59
Figura 14	Análisis de dispersión de las variables. Diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetro de copa respecto a factor de expansión de biomasa de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.....	60
Figura 15	Gráfica de homocedasticidad del modelo matemático generado para la estimación de biomasa aérea en teca.....	63

# **ESTIMACIÓN DE CARBONO AÉREO EN PLANTACIONES DE TECA (*Tectona grandis* L. f.) DE CATORCE Y QUINCE AÑOS DE EDAD; CHAHAL ALTA VERAPAZ.**

## **RESUMEN**

Con esta investigación, se estimó la cantidad de biomasa y carbono aéreo, almacenado en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) de catorce y quince años de edad, en 161.2 ha en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz. El método utilizado para recolectar muestras y generar el modelo matemático para estimar la biomasa por encima del suelo es el que propone el Instituto Internacional Winrock; el cual consiste en derribar y seccionar árboles de distintas clases diametrales para luego medir las variables, Diámetro a la Altura del Pecho –DAP-, Altura Total –Ht-, Diámetro de Copa –DC-, Diámetro Mayor -D1-, Diámetro Menor -D2-, Largo de la Troza –L-, peso fresco de las ramas, ramillas y hojas de los mismos se obtienen sub muestras para realizar análisis en laboratorio. Para estimar Carbono se realizaron pruebas de Carbono-Nitrógeno en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala, además se obtuvo la densidad de madera de teca y el Factor de Expansión de la Biomasa, procedimiento realizado en el laboratorio químico de la Universidad Rafael Landívar sede La Verapaz. Se generó un modelo de predicción de biomasa del fuste, que toma en cuenta el DAP y altura total, con un  $r^2$  Ajustada de 0.89, y Probabilidad -p- menor a 0.05. El Carbono almacenado en los dos estratos es de 17,880.96 toneladas, la captura anual es de 410.39 toneladas de Carbono y con turnos de 20 años se estarán fijando en total 20,311.71 toneladas de Carbono.

**AERIAL CARBON ESTIMATION IN TECA PLANTATIONS (*Tectona grandis* L. f.) OF FOURTEENTH AND FIFTEEN YEARS OF AGE;  
CHAHAL, ALTA VERAPAZ**

**SUMMARY**

With this research, biomass amount and aerial carbon stored in teak plantations (*Tectona grandis* L.f.) of fourteen and fifteen years of age was estimated at 161.2 ha in Sacuitz Farm, Chahal, Alta Verapaz. The method used to collect samples and generate the mathematical model to estimate the above-ground biomass is proposed by the International Winrock Institute; which consists of breaking down and sectioning trees of different diametral classes and then measuring the variables, Diameter at Chest Height -DAP-, Total Height -Ht-, Cup Diameter -DC-, Larger Diameter -D1-, Smaller Diameter -D2-, Path Length -L-, branches fresh weight, twigs and leaves of the same from where sub samples are obtained to perform analysis in laboratory. Carbon-Nitrogen tests in the laboratory of the Center for Environmental and Biodiversity Studies of Del Valle de Guatemala University were carried out to estimate Carbon, in addition, the teak wood density and the Expansion Factor of the biomass were obtained, with the procedure done in the chemical laboratory of the Rafael Landívar University in La Verapaz. A model of biomass prediction of the stem was taken, that takes into account the DAP and total height, with an Adjusted  $r^2$  of 0.89, and Probability -p- less than 0.05. The carbon stored in the two strata is 17,880.96 tons, the annual catch is 410.39 tons of Carbon and with shifts of 20 years will be fixing in total 20,311.71 tons of Carbon.

# 1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una variación importante ocasionada al clima en la tierra, provocando principalmente el calentamiento global. (Ávila, Jiménez, Beer, Gómez e Ibrahim, 2001). Indican que la forma de mitigar sus efectos es almacenar el Dióxido de Carbono  $-CO_2-$  en la biomasa mediante la fotosíntesis y en el suelo a través de la acumulación de materia orgánica.

Las plantaciones forestales se han convertido en estrategias para la fijación de carbono atmosférico; a través de la estructura vegetal se fija el  $CO_2$  y se inmoviliza cuando se construyen viviendas de madera, muebles y otros productos donde se utiliza la madera como materia prima. Otra de las estrategias para almacenar carbono es el mercado de carbono conocido como: Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), otorgando beneficios económicos a los propietarios que protejan sus recursos forestales, mejoren su gestión y los utilicen de manera sostenible. Finanzas Carbono (2017).

A través del presente trabajo de tesis, se generó un modelo matemático específico para teca (*Tectona grandis* L. f.) con el cual se puede estimar la biomasa por encima del suelo. Se utilizó el método destructivo propuesto por el Instituto Winrock y experiencias de la Universidad del Valle, que consistió en derribar, seccionar el fuste, pesar las hojas, ramas, ramillas y medir el diámetro de la copa; con el fin de obtener muestras de la parte aérea de los árboles que son evaluadas en campo y laboratorio. Con esta información y la del inventario forestal se pudo estimar de manera confiable el total de carbono almacenado por arriba del suelo en las plantaciones de la finca Sacuitz en el municipio de Chahal, Alta Verapaz.

El modelo matemático generado para estimar biomasa en teca, puede ser utilizado por los silvicultores que tengan el deseo de integrarse al mercado de carbono, debido a que es requisito conocer el stock de carbono almacenado en las plantaciones y la captura anual.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. MARCO CONCEPTUAL

#### 2.1.1. Definiciones

Cuantificar el contenido de carbono existente en los bosques y en los ecosistemas forestales, su contribución al ciclo del dióxido de carbono, son elementos cada vez más importantes. FAO (2013), indica que los inventarios forestales realizan importantes contribuciones a la estimación de carbono en los ecosistemas forestales, es relativamente sencillo evaluar los componentes vegetales capturados por un inventario.

En la investigación se utiliza terminología de acuerdo al contexto forestal y modelos matemáticos para estimación de carbono; para no producir confusión se especifica la siguiente terminología.

**Árbol:** Según el Instituto Nacional de Bosques –INAB- (2015), es una planta leñosa con fuste y copa definida.

**Plantación Forestal:** Es el establecimiento de rodales forestales mediante la plantación o siembra de árboles, conocido generalmente como proceso de forestación o reforestación. Los rodales pueden ser formados por especies introducidas (todos rodales plantados) o por rodales de especies nativas sometidos a ordenación intensiva, que cumplen todos los requisitos siguientes: una o dos especies al momento de la plantación, clase de edad y esparcimiento regular (FRA, 2004).

**Los Inventarios Forestales:** Son instrumentos para recopilación de información dasométrica, sanidad o regeneración natural FAO (2004), resalta la importancia de realizar evaluaciones de recursos forestales, con el objetivo de generar información relacionada con el estado fitosanitario y manejo silvicultural de los bosques.

**Estratificación:** Es el proceso mediante el cual se agrupan rodales que poseen características similares como edad y especie (CATIE, 2002). Para esta investigación la estratificación se basó en la edad de la plantación. INAB (2015), indica que es la Unidad de bosque geográficamente continua que se agrupa con uno o tres criterios, por lo que su extensión es mayor que un rodal.

**Proyección GTM (Guatemala Transverse Mercator):** Es un sistema de coordenadas planas único para Guatemala, INAB (2015), recomienda la utilización en los lineamientos técnicos de manejo forestal, trabajos cartográficos, geodésicos, catastrales y sistemas de información geográfica. Las proyecciones especificadas para Guatemala son las siguientes:

- Proyección: Transversa de Mercator (tipo Gauss Kruger) en una zona única local.
- Elipsoide: WGS84.
- Longitud de origen: 90°30' (meridiano central de proyección).
- Latitud de origen: 0° (el Ecuador)
- Unidades: Metros.
- Falso norte: 0 metros.
- Falso este: 500,000 metros en el meridiano central.
- Factor de escala en el meridiano central: 0.9998
- Numeración de las zonas: No está dentro de la numeración normal de zonas UTM. Se le puede llamar zona 15.5.
- Nuevo sistema de referencia geodésico: WGS84 preciso, basado en ITRF94 época 1997.5 parámetros del elipsoide, INAB (2015).

**Parcela o Unidad de Muestra:** Es una porción de la comunidad vegetal y en esa unidad básica es que serán realizadas las mediciones u observaciones. Esta unidad deberá poseer una fracción mínima representativa de la vegetación a ser observada y medida, funcionando como muestra de la vegetación, (Imaña-Encinas, Jiménez, Rezende, Rainier, Antunes, Serpa de Meira, 2014). Además se tomó en cuenta el tema

del costo del muestreo, principalmente por la obtención del análisis de Carbono – Nitrógeno en laboratorio.

**Variabes:** Es lo que observa y se mide sobre unidades estadísticas, López (2011) exterioriza que pueden ser características que varían de un individuo a otro. Para el presente estudio se toman en cuenta variables que influyen en la predicción de biomasa del fuste.

**Variabes dasométricas:** La dasometria es la especialidad de la ingeniería forestal que trata de la determinación y/o estimación de las dimensiones de variables de medida en individuos arbóreos. Imaña-Encina, *et al.*, (2014), indican que el árbol es tratado como un ente numérico y por lo tanto como unidad de cálculo con base en medidas del Diámetro a la Altura del Pecho –DAP-, Altura Total –Ht-.

**Área Basal (AB):** Es el área de la sección transversal de un árbol tomada a 1.30 metros del suelo. INAB (2014), indica que se utiliza para representar la densidad de un bosque expresada en metros cuadrados por hectárea –m<sup>2</sup>/ha-.

**Edad de rotación:** Se define como el tiempo que transcurre entre el establecimiento de la regeneración natural o la plantación, hasta el aprovechamiento de corta final. Corresponde a la edad de corte de los arboles es decir el tiempo que les tome en alcanzar su madurez, o la edad de cosecha. INAB (2015)

**Diámetro mínimo de corta:** Según INAB (2015), este término se aplica para designar el valor del diámetro a partir del cual es factible realizar la corta y aprovechamiento de los árboles.

**Terminología sobre modelos matemáticos:** Luego de obtenidos los datos estadísticos, se pueden hacer inferencias confiables es decir, que con los resultados del inventario forestal se puede averiguar el total de biomasa almacenada en la plantación forestal y por lo tanto el carbono contenido en la plantación, después del

análisis de la información proveniente del laboratorio y aun mejor se podrá predecir el total de carbono a fijar en el futuro.

**Estimación de Biomasa en Plantaciones:** La biomasa de una masa o plantación forestal según FAO (2013), es a menudo proporcional al volumen y área basal. Por el contrario, la biomasa de un árbol individual es, por lo general, proporcional a su diámetro y altura; para conocer estas variables es necesario levantar un inventario forestal.

**Gases de efecto invernadero (GEI):** Según la IPCC (2011), los gases de efecto invernadero son aquellos que absorben la radiación infrarroja, emitida por la superficie de la Tierra, por la propia atmósfera debido a los mismos gases y las nubes. La radiación atmosférica se emite en todos los sentidos, incluso hacia la superficie terrestre. Los gases de efecto invernadero atrapan el calor dentro del sistema de la troposfera terrestre.

**El carbono:** Es uno de los elementos químicos más abundantes del planeta Tierra y está presente en todos los seres vivos. Walker (2011), aduce que el carbono se encuentra en grandes cantidades en las hojas, ramas, tallos y raíces de los árboles. Además de estar compuesta de hasta 50% de agua, la biomasa de un árbol vivo contiene aproximadamente 25% de carbono, por consiguiente, el carbono constituye aproximadamente la  $\frac{1}{2}$  del total de la Biomasa Seca –BSS- de un árbol. Por ejemplo, si un árbol tiene una BSS de 2.4 toneladas métricas entonces el carbono encontrado en este árbol tiene un peso de 1.2 toneladas métricas.

**Dióxido de carbono:** Es un compuesto que se encuentra en estado de gaseoso es producido de forma natural, también se forma como subproducto de la combustión de combustibles fósiles y biomasa, cambios en el uso de las tierras y otros procesos industriales. En las distintas publicaciones el IPCC (2011), indica que es el principal gas de efecto invernadero antropógeno que afecta al equilibrio de radiación del planeta.

Es el gas de referencia frente al que se miden otros gases de efecto invernadero y, por lo tanto, tiene un Potencial de calentamiento mundial de 1.

El contenido de dióxido de carbono de la vegetación está directamente relacionado con la biomasa, la biomasa en cada una de las unidades de muestreo se determina según el peso después del secado siguiendo los protocolos estándar (FAO, 2013)

**Monóxido de carbono:** Es aquel compuesto que se forma por combustión incompleta de combustibles fósiles o biomasa, se acumula en las urbes metropolitanas por ausencia de corrientes de aire, alta concentración de fuentes emisoras y por la baja densidad de vegetación y suelo descubierto. Es un gas venenoso, incoloro, inodoro e insípido, que al ser inhalado obstaculiza la capacidad de la sangre para absorber el oxígeno, causa somnolencia e incluso inconsciencia puede causar la muerte a los humanos cuando respiran concentraciones mayores a 750 ppm -partes por millón-. En las embarazadas pone en peligro el crecimiento y desarrollo mental del feto Fundación Solar, (2000).

**Fotosíntesis:** Es un proceso de anabolismo autótrofo. Ocampo (2014), indica que Constituye la base de alimentación de las cadenas tróficas, para que se lleve a cabo la fotosíntesis se necesitan los siguientes elementos: energía solar, Dióxido de Carbono –CO<sub>2</sub>-, Agua y Sales Minerales.

**Antropógeno:** El concepto que la CMNUCC (1992), le atribuye al efecto que resulta o se produce a través de las actividades humanas. Los humanos somos responsables de la mayor parte del cambio climático, por la rotura de muchos equilibrios biológicos y energéticos. Los compuestos habituales de la atmósfera son (Nitrogeno: 78%) y (oxígeno:21%) las actividades humanas (industria, generación de energía con combustibles fósiles, transporte, agricultura, deforestación etc.), aumentan los Gases de Efecto Invernadero (GEI), produciendo el calentamiento de la tierra, y la producción de sulfatos que, actuando como contrapeso, contribuyen a refrigerarla. Useros (2012).

**Combustible fósil:** Según el IPCC (2011), son aquellos combustibles basados en carbono de depósitos, carbono fósil, incluidos el petróleo, el gas natural y el carbón.

**Atmosfera:** El panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) en el año 2011, definen atmósfera como la capa formada casi en su totalidad por nitrógeno (78,1% de la proporción de mezcla de volumen) y por oxígeno (20,9% de la proporción de mezcla de volumen), además hay una serie de pequeñas cantidades de otros gases como argón (0,93% de la mezcla de volumen), el helio, gases radiactivos de efecto invernadero como el dióxido de carbono (0,035% de la mezcla de volumen) y el ozono. Además, en la atmósfera hay vapor de agua, con una cantidad variable pero que es normalmente de 1% del volumen de mezcla.

**Efecto invernadero:** De acuerdo a lo referido por FAO (2014), efecto invernadero es cuando los gases atrapan el calor dentro del sistema de la troposfera terrestre y la radiación atmosférica se vincula en gran medida a la temperatura del nivel al que se emite. Esto causa un desequilibrio que sólo puede ser compensado con un aumento de la temperatura del sistema superficie troposfera. A esto se le llama efecto invernadero aumentado.

**Clima:** Es un sistema complejo en el cual interactúan muchos factores, entre ellos la radiación solar, los parámetros de la tierra y su órbita (la distancia del sol y ángulo de inclinación), algunas variables que lo describen son la temperatura, la humedad, la lluvia, la cobertura de nubes y las trayectorias del viento. Useros (2012).

**Cambio climático:** Los expertos de la CMNUCC lo definen como la variación del clima, imputado directa o indirectamente a la actividad humana; el Centro Mario Molina (2012), indica que los componentes del sistema climático como son la temperatura de la superficie de la tierra y los océanos, y la distribución de la precipitación, han cambiado aceleradamente, al grado en que se observan cambios en periodos de décadas.

**Protocolo de Kyoto:** Es un acuerdo institucional estructurado en función de los principios de la convención marco de las naciones unidas en el año 1992. Su principal meta es la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero –GEI- para 37 países industrializados y la Unión Europea, reconociendo que son los principales responsables de los elevados niveles de emisiones de GEI que hay actualmente en la atmósfera, y son el resultado de quemar combustibles fósiles durante más de 150 años. En este sentido el Protocolo tiene un principio central: el de la «responsabilidad común pero diferenciada» (United Nations, 2014) .

**Artículo 6 del protocolo de Kyoto:** Las actividades silviculturales que son incluidas en el Anexo I de protocolo según el Ministerio de Agricultura Alimentación y Medio Ambiente de España –MAGRAMA- (2014), son los proyectos de Aplicación Conjunta: las actividades incluidas son forestación, reforestación, gestión de tierras agrícolas, gestión de bosques, gestión de pastos y restablecimiento de la vegetación. Los criterios de ejecución de estos proyectos y la contabilización de las toneladas de carbono absorbidas se llevarán a cabo de acuerdo con la normativa establecida país anfitrión para este tipo de proyectos.

**Sumidero de carbono:** Se conoce como sumidero todo sistema o proceso por el que se extrae de la atmósfera un gas o gases compuestos por carbono y se almacena. MAGRAMA (2014), concreta que formaciones vegetales funcionan como sumideros por la función vital principal, de la fotosíntesis. Mediante esta función, los vegetales absorben CO<sub>2</sub> que compensa las pérdidas de este gas que sufren por la respiración y lo que se emite en otros procesos naturales como la descomposición de materia orgánica.

**Biomasa:** La biomasa de un árbol, según Walker (2011) es el peso o masa del tejido de la planta viva y es generalmente expresado en unidades de toneladas métricas –t-. La biomasa viva puede ser separada en: sobre el suelo (hojas, ramas y tallo) (aérea) y componentes bajo el suelo (raíces). Lo más común es estimar del árbol la Biomasa Seca Viva Sobre el Suelo –BSS-, lo cual es el peso del tejido vivo de la planta sobre el suelo después de que toda el agua haya sido removida, es decir, después de que las

hojas, ramas y tallos se hayan secado por completo, a menudo utilizando un horno especial de laboratorio.

**Biomasa por encima del suelo:** De acuerdo con Sagüi 2011 es toda la biomasa viva por encima del suelo incluyendo el tronco, el tocón, las ramas, la corteza, semillas y las hojas.

**Artículo 12 del Protocolo de Kyoto:** En el Protocolo de Kyoto no están incluidos los sumideros como actividades de proyectos de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL), pero se incluyeron en la COP 6 Bis. Las Partes del Anexo I pueden realizar proyectos con Partes no-Anexo I (Art.12): sólo las actividades de forestación y reforestación son elegibles durante el primer período de compromiso bajo este artículo. En la COP 9 se adoptaron las definiciones, modalidades y procedimientos para la inclusión de forestación y reforestación bajo el Artículo 12 del Protocolo de Kioto. United Nations (2014).

**Mercado de Carbono:** Estrategia con el propósito de incluir a la reducción de emisiones por deforestación en el régimen global de mitigación del cambio climático fue presentada oficialmente por Papua Nueva Guinea y Costa Rica en la Conferencia de las Partes 11 (COP11) de la Convención Marco de las Naciones Unidas para Cambio Climático (CMNUCC), en Montreal. Guatecarbón (2014).

Finalmente, se hace un llamado al Órgano Subsidiario de Asesoramiento Científico, Técnico y Tecnológico (SBSTA, por sus siglas en inglés) para que trabaje en el análisis de los aspectos metodológicos más importantes y en el desarrollo de potenciales enfoques metodológicos para un mecanismo REDD en el marco de las Naciones Unidas UICN (2009).

**Ecuaciones de la biomasa:** Las ecuaciones de biomasa se emplean para pronosticar la biomasa de un árbol o la biomasa arbórea de una determinada superficie forestal. Como lo indica FAO (2013), las ecuaciones a nivel de árbol expresan la biomasa como

una función de las dimensiones del árbol (diámetro y altura). Las ecuaciones para los pronósticos de la biomasa a nivel de superficie pueden variar en función de las variables auxiliares (X).

Schumacher, concreta una ecuación donde la biomasa total por encima del suelo de los árboles se calcula de manera individual en función de la relación alométrica con el diámetro a la altura del pecho:

$$B = e^{(b_0 + b_1 \ln(D))}$$

Dónde:

B= la biomasa total por encima del suelo (kg) de aquellos arboles cuyo diámetro a la altura del pecho sea de 2,5 cm o superior (D).

**Factor de expansión de la biomasa (BEF):** Es un coeficiente de multiplicación que brinda información sobre el crecimiento, existencias, producción futura de los bosques, Castellanos, *et al.*, (2010), recomienda que el incluir estructuras no comerciales de la biomasa tales como: las ramas, follaje, ramillas brinda información más completa.

La conversión de la biomasa y expansión de factores siglas en inglés –BCEF- derivan del cálculo de la biomasa aérea. Convierten a la biomasa seca almacenada en 0,5 toneladas de Carbono -t C- por t de biomasa fresca. (Federici, Tubiello, Salvatore, Jacobs, & Schmidhuber, 2015)

Los autores Teobalddelli & Somogyi (2009), reconocen que se utiliza el Factor de Expansión de Biomasa (BEF) debido a que es necesario, para convertir una estimación de la masa arbórea en crecimiento (X) en una estimación de la biomasa (B). Una ecuación de ampliación utilizada con frecuencia tiene la forma de:

$$BEF = b_0 + b_1 * X^{-b_2}$$

Dónde:

X= Medición de la masa arbórea en crecimiento.

**El dióxido de carbono en la vegetación:** El contenido de dióxido de carbono de la vegetación es sorprendentemente constante en una amplia variedad de tipos de tejido y especies. Schlesinger (1991), apunta que el contenido de C de la biomasa, en la mayoría de los casos, se encuentra entre el 45 y el 50% (por masa seca). En muchas aplicaciones, el contenido de dióxido de carbono (C) de la vegetación se puede calcular tomando una fracción de la estimación de biomasa seca (B), como en  $\hat{C} = 0.475 \times \hat{B}$ . La precisión de una estimación de esta naturaleza no suele ser elevada debido a los errores en  $\hat{B}$  y se debe esperar que sea sesgada.

Además la importancia de estimar cuanto carbono capturan los bosques radica en comprender la contribución de los mismos en la reducción del Carbono liberado por actividades antropógenicas según Federici, *et al.*, (2015) alrededor de  $535 \pm 55$  Pg C fueron liberados durante 1870 - 2013, de los cuales aproximadamente el 30% es de cambio de uso de la tierra ( $145 \pm 50$  Pg C).

**Formula general para cálculo de carbono:** La fórmula general para determinar el contenido de carbono en biomasa aérea; según García & Sánchez (2009), se puede utilizar la siguiente:

$$CBA = V * WD * BEF * CC$$

Dónde:

CBA: Carbono contenido en la biomasa aérea.

V: Volumen de la madera.

WD: Densidad de la madera.

BEF: Factor de Expansión de Biomasa (por sus siglas en ingles).

CC: Contenido de Carbono.

**Evaluación de la calidad del modelo:** Un modelo resume la relación conceptual que existe entre una o más variables dependientes (Y) y uno o más indicadores (X). La calidad de cualquier modelo se evalúa según su capacidad de proporcionar

estimaciones no sesgadas (precisas) de estas expectativas, así como de la precisión de las predicciones de los modelos. (FAO, 2013).

Aquellos modelos con parámetros de modelo deterministas (fijos, invariables) generan una predicción única (el valor esperado) según un conjunto de valores de indicador (FAO, 2013).

Los criterios comunes para la evaluación de la calidad de un modelo según Ripley & Venables (1994), incluyen, por ejemplo, una prueba t de la hipótesis de un error de predicción de modelo próximo a cero, la varianza de los errores de modelo, la magnitud de la desviación media absoluta.

**Contribución del error de modelo al error total:** Los métodos para calcular la precisión de las estimaciones de inventario dependen del diseño de muestreo empleado en la recopilación de los datos. Sin embargo FAO (2013), reconoce que estos métodos presuponen que las observaciones individuales se realizan libres de errores. En el caso de las estimaciones basadas en modelo, como el volumen, la biomasa y el dióxido de carbono, existen errores de modelo que es necesario tener en cuenta. Como consecuencia, podemos decir que hay tres fuentes de error principales: error de medición, error de modelo y error de muestreo.

### **2.1.2. Estudios realizados a nivel de región**

**Experiencias en Nicaragua:** El estudio realizado en Nicaragua por Calderón & Solís (2012), en *Pinus oocarpa*; genera información sobre la tasa anual de captura de carbono en cada estado de desarrollo, incluyendo únicamente la biomasa aérea.

Cuadro 1. Resultados de estudio realizado con *Pinus oocarpa* en Nicaragua, Centro América sobre la captura anual de carbono en t C/ha.

Tipo de bosque	Años	t C/ha	Tasa de acumulación de carbono (t C/año)
B. Regeneración	8	7.56	0.95
B. Joven	23	11.92	0.52
B. Maduro	33	15.74	0.48

Fuente: (Calderón & Solís, 2012)

En el cuadro 1 se indican las toneladas de Carbono por Año (t C/año) que almacenan los bosques en las distintas etapas de desarrollo y a medida que el bosque aumenta su estado de madurez, las tasas de acumulación de carbono decrece en 0.48 t C/año y aumenta considerablemente a medida que este disminuye su edad como en el caso del bosque en regeneración que refleja una tasa anual de 0.95 t C/año.

La mayoría de los trabajos realizados, relacionados al tema, tienen sus diferencias, esencialmente en cuanto a la metodología utilizada para la estimación de la parte volumétrica, así como en decidir si este cálculo se hará estática o dinámicamente; así como el análisis de las variables que tendrán influencia en él (García & Sánchez, 2009).

**Experiencias en México:** En su estudio Valenzuela (2001), indica que para calcular el contenido de carbono una vez estimada la biomasa utiliza este valor de biomasa en metros cúbicos y es multiplicada por la gravedad específica de la madera para obtener el peso y posteriormente multiplica por un factor general (0.5) para obtener Carbono.

Lazcano (2006), estudio la emisión de dióxido de carbono a la atmosfera que es provocada por el cambio de uso de suelo y la degradación forestal para la comunidad de Tingambato, Michoacán, apoyándose en estudios dasométricos y un Sistema de Información Geográfica. En donde se concluyó que las emisiones de CO<sub>2</sub> causadas por la degradación forestal son equivalentes a 13.2 t C/ha o 6,500 t C/año.

**Experiencias en Costa Rica:** Se realizó un estudio de parte de PROARCAS/CAPAS (1998), para determinar el incremento medio anual en toneladas de carbono que se obtiene con el manejo y la conservación de bosque secundario, se hizo un estimado de 1,335,558 toneladas cada año en comparación con 83,742 toneladas que aportan de incremento medio anual el área de plantaciones. No obstante el aporte de las plantaciones en el año 2000 es mayor al bosque secundario debido a que cada año se agrega nueva superficie de plantaciones.

El cuadro 2 de resultados creado por PROARCA/CAPAS (1998), indica que al final de las tres décadas se estima un incremento del carbono captado por crecimiento de bosque de 44,073,414 toneladas lo que representan en términos porcentuales un incremento del 18% con respecto al carbono estimado para el año 1997 de ahí que se derive la importancia de la ejecución de acciones para mantener e incrementar el área de bosque del país.

Cuadro 2. Proyección de carbono almacenado en bosques secundarios desde el año 1997 a 2030 en Costa Rica, Centro América.

Actividades	Carbono Conservado y Captado (toneladas)				
	1997	2000	2010	2020	2030
Almacenado bosque primario	222,489,587	222,489,587	222,489,587	222,489,587	222,489,587
Almacenado bosque secundario	17,881,400	17,881,400	17,881,400	17,881,400	17,881,400
Crecimiento bosque secundario	-	4,006,674	17,362,254	30,717,834	44,073,414
Crecimiento Plantaciones	-	2,344,793	10,090,962	22,024,231	54,264,969
<b>Total</b>	<b>240,370,987</b>	<b>246,722,454</b>	<b>267,824,203</b>	<b>293,113,052</b>	<b>338,709,370</b>

Fuente: (PROARCA/CAPAS, 1998)

**Experiencias en Guatemala:** El Centro de estudios ambientales y de biodiversidad de la universidad del valle CEAB-UVG ha desarrollado ecuaciones de biomasa específicas para algunas especies que son comunes en Guatemala (*Pinus spp.*, *Quercus spp.*, entre otras).

Las ecuaciones del Cuadro 3 nos ayudan a estimar la biomasa arriba del suelo. Para estimar la biomasa abajo del suelo se usan los factores estándares encontrados en la literatura como Federici, *et al.*, (2015), de acuerdo al tipo de árbol y bosque que pertenezca.

Cuadro 3. Resumen de las ecuaciones más comunes utilizadas para los bosques mixtos del altiplano occidental de Guatemala.

Tipo de Bosque	Precipitación (mm/año)	Ecuación	Rango de DAP (cm)	de $r^2$	Referencia
Latifoliada genérica (seco)	900-1500	$Y=0.2035*(DAP)^{2.3196}$	1-63	0.97	Pearson 2005
Latifoliada genérica (húmeda)	1500-4000	$Y=\exp[-2.289+2.649*\ln(dbh)-0.021*(\ln(dbh))^2]$	5-148	0.98	Pearson 2005
Latifoliada local Quercus spp.	900-1500	$Y=0.1773*(2,2846^{DAP})$	11-45	0.86	CEAB-UVG
Conífera local	1000-2500 Aprox.	$Y=0.1377*(DAP)^{2.4038}$	5-52	0.94	CEAB-UVG

Fuente: (Castellanos, Quilo, & Mato, 2010)

## 2.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESPECIE

### 2.2.1. Información general

La especie teca (*Tectona grandis* L.f.) es originaria de Birmania Tailandia, se ha reconocido a Trinidad y Tobago como el primer país del continente americano donde fue introducida luego fue distribuida a américa central Chávez (1991). En el cuadro 4 se presenta la clasificación taxonómica de la especie.

Cuadro 4. Clasificación taxonómica del árbol de teca

Nomenclatura	
Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Dicotyledonae
Orden	Lamiales
Familia	Lamiaceae (Verbenaceae)
Género	Tectona
Especie	<i>Tectona grandis</i> L. f.

Fuente: (Fonseca, 2004)

Es un árbol de hoja caduca de gran tamaño con una copa redondeada y cuando crece en condiciones favorables, presenta fuste cilíndrico alto y limpio de más de 25 m. A menudo, en la base del árbol aparecen contrafuertes (ensanchamientos en la base producidos por una hinchazón exagerada de las raíces) y a veces es acanalado (presenta depresiones y abultamientos irregulares en el fuste). Las hojas son elípticas u aovadas y de una longitud de 30 a 60 cm (FAO, 2000)

### 2.2.2. Requerimientos edafo-climáticos

El árbol de teca se desarrolla en climas con estación seca bien definida durante 3 a 5 meses con temperaturas medias anuales entre 22 a 28 °C, una precipitación media anual de 1250 a 2500 mm y altitudes entre 0 a 1000 msnm. Se adapta a gran variedad de suelos, pero prefiere los franco-arenosos o arcillosos, profundos, fértiles bien drenados y con pH neutros o ácidos (Chavez, 1991).

Según Fonseca (2004), considera que los factores limitantes más importantes para la especie son: Suelos poco profundos, compactados o arcillosos, con bajo contenido en calcio y magnesio, con pendiente, mal drenaje, y altitudes mayores a 1000 msnm.

### **2.2.3. Uso recomendado de la madera**

Por su calidad y solidez la madera de teca es apetecida según SERIFOR (2004), tiene otras características como resistencia, trabajabilidad y calidades estéticas, es la madera tropical más solicitada, es considerada una de las más valiosas del mundo para el mercado específico de aplicaciones suntuarias como mueblería, componentes decorativos, construcciones navales.

## **2.3. ANTECEDENTES**

Las plantaciones forestales además de ser una alternativa para detener la deforestación, brindan servicios ambientales como la fijación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este gas de efecto invernadero es el principal causante del calentamiento global debido a que se produce fácilmente por que se encuentra en los ciclos de vida específicamente en el proceso de respiración celular animal y vegetal.

Los bosques y plantaciones forestales se han convertido en el mecanismo preciso para la fijación de CO<sub>2</sub> por ello se han creado proyectos y estrategias de mitigación como lo es el protocolo de Kyoto que nace de la convención marco de las naciones unidas en el año 1992, pero finalmente fue aprobado en 1997.

Durante el período 1991-2015, los bosques plantados, han incrementado representando el 7% de área total de bosque, representaron un hundimiento o stock promedio global que es comparable a la piletta en el bosque natural (1,08 vs 1,44 Gt CO<sub>2</sub> /año). Federici, et al (2015). Indican que el lavado en bosques plantados fue impulsado por el continuo aumento de la superficie total.

En el protocolo de Kyoto se propone la creación de mercados de carbono financiado por los países industrializados, con el objetivo de fijar y evitar la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmosfera, es así como los bonos de carbono se convierten en un beneficio económico y oportunidad para los silvicultores.

La tendencia en la década de los 90's en general fue investigar cómo medir el CO<sub>2</sub> emitido y la cantidad de CO<sub>2</sub> que fijan los bosques debido a que en la literatura se indicaba que en la estructura de los árboles se almacena un porcentaje de carbono el cual permanece capturado sin ser liberado a la atmósfera, de esta manera la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) con el trabajo de Brown (1997), un esfuerzo para generar ecuaciones con las que se pueda realizar estimaciones de biomasa y carbono de las estructuras de los árboles.

El trabajo que realiza Brown en el año 1997, fue encaminado hacia la creación de ecuaciones generales de regresión biomasa de árboles específicamente en especies tropicales.

En los últimos años se han generado estudios donde se han creado ecuaciones específicas como la de Pacay (2011) donde advierten que puede haber cierta discrepancia en los resultados por las condiciones edafoclimáticas diferentes de donde fueron obtenidos los datos para generar las ecuaciones como las del cuadro 5, inclusive para la aplicación de las fórmulas generales se advierte que no se debe aplicar en caso de que el diámetro exceda en gran medida la gama de los datos originales y cuando existen diferencias significativas en las condiciones edafoclimáticas.

Cuadro 5. Ecuaciones generales para estimar carbono aéreo con base a la zona climática.

Número Ecuación	Zona climática	Ecuación	Rango en dap (cm)	Número de árboles	r <sup>2</sup> ajustado
1	<sup>Una</sup> SECO	$Y = \exp \{-1.996 + 2,32 * \ln (D)\}$	5-40	28	0.89
2		$Y = 10 \wedge \{-0.535 + \log_{10} (BA)\}$	3-30	191	0.94
3	MOIST <sup>b</sup>	$Y = 42,69 a 12,800 (D) 1,242 (D^2)$	5-148	170	0,84
4		$Y = \exp \{-2,134 + 2,530 * \ln (D)\}$			0.97
5	<sup>c</sup> WET	$Y = 21,297 a 6,953 (D) 0,740 (D^2)$	4-112	169	0.92

Fuente: (Brown, 1997)

Dónde:

Y = biomasa por árbol en kg

D = DAP en cm

BA = área basal en cm<sup>2</sup>

En Costa Rica Rodriguez & Pratt (1998), realizaron un estudio sobre la fijación de carbono por actividades de reforestación, la cuantificación inicial del carbono contenido en la biomasa del área plantada es obtenida a partir de la relación:

$$C \text{ plantación} = AT * CFH$$

Dónde:

C plantación= Carbono fijado por las actividades de reforestación

AT = Área total de la plantación,

CFH = Carbono promedio fijado por hectárea

Además los autores indican que para la cuantificación de la fijación de carbono en los escenarios provenientes de reforestación se asume un valor promedio de incremento anual en biomasa por año de plantaciones, se utiliza la ecuación siguiente:

$$C \text{ fijado} = AT * TAC * R_c$$

Dónde:

C fijado = Carbono fijado proveniente de actividades de reforestación

AT = Área total de la plantación

TAC = Tasa anual de crecimiento (toneladas de materia seca por hectárea)

R<sub>c</sub> = Fracción de carbono en la biomasa

Para la cuantificación de dióxido de carbono fijado en la plantación se utiliza la relación;

$$CO_2 \text{ fijado} = C \times (44/12) \cdot 21$$

Dónde:

CO<sub>2</sub> fijado = Toneladas de dióxido de carbono fijado

C = Carbono en la biomasa

(44/12) = Constante

El trabajo realizado por Quilo (2012), indica que Edwin Castellanos en el año 1,999 fue pionero en Guatemala en realizar estudios de cuantificación de carbono fijado por bosques naturales. En la actualidad Edwin Castellanos, es el director del Centro de Estudios CEAB de la Universidad del Valle.

En una investigación Lee (2002), generó los modelos de regresión para determinar biomasa y carbono en las siguientes especies latifoliadas:

*Cybistax donell – smithii*:

Biomasa= e (1.469255 + 0.000914 DAP + 0.470835 altura - 0.013751 altura<sup>2</sup> + 0.000676 DAP<sup>2</sup>) con un r<sup>2</sup> del 91%.

*Calophyllum brasiliense*:

Biomasa= e (3.8926 + 0.03825 DAP + 0.06518 altura) con un r<sup>2</sup> del 97%.

*Vochysia guatemalensis*:

Biomasa= e (4.420177 + 0.061182 DAP - 0.134815 altura + 0.004806 altura<sup>2</sup>) con un r<sup>2</sup> del 80%.

#### **Modelo general para la estimación de biomasa en latifoliadas:**

Biomasa= e (3.852749 + 0.086911 DAP - 0.042662 altura - 0.000406 DAP<sup>2</sup> + 0.002021 Altura<sup>2</sup>) con un r<sup>2</sup> del 89.

Además determino los factores de expansión de biomasa para cada especie, siendo éstos:

*Cybistax donell – smithii* = 1.24

*Calophyllum brasiliense* = 1.19

*Vochysia guatemalensis* = 1.17

En Guatemala específicamente en San Jerónimo, Baja Verapaz, Sagüi (2011), genera un modelo matemático para estimar la biomasa y carbono fijado por *Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.P Perry, en bosques naturales de la reserva de biosfera sierra de las minas RBSM.

Los resultados de un estudio en pino de la sierra (*Pinus tecunumanii* Eguiluz & J.P Perry) realizado por Sagüi (2011), determina la mejor relación funcional para estimar la biomasa y carbono tomando en cuenta el DAP y la Ht, representada en el modelo matemático:  $Biomasa = e^{(4.0578+0.0371*DAP+0.0381*H)}$ , el cual fue sometida a diversas pruebas estadísticas y de ajuste, con un  $r^2$  de 0.9355, valores P de <0.001 para el DAP, y 0.0336 para la altura, siendo este es el único modelo que debe ser considerado para hacer las estimaciones de biomasa y carbono de la especie evaluada.

Además se determinó que el factor o índice de expansión de la biomasa es de 1.23 unidades. Seguidamente el factor específico de conversión de biomasa a carbono determinado es de 0.489, lo cual indica que el 48.90% del contenido total de biomasa seca corresponde a carbono total retenido por la especie sometida a evaluación, difiriendo con la estandarización de 0.50 establecido por el Panel Internacional sobre el Cambio Climático IPCC para todas las especies forestales.

En su trabajo de tesis para optar al título de ingeniero forestal Pacay (2011), generó un modelo matemático para estimar biomasa y carbono específicamente para Nogal (*Juglans olanchana* Standl & L. O. Williams) en donde logro concluir que el mejor modelo matemático para la estimación de biomasa aérea es:  $Biomasa = e^{(2.8998+0.1255*DAP-0.0007*DAP^2)}$ , el cual es el que posee el mejor ajuste, debido a que su valor de P es menor a 0.001 para la constante y P es igual a 0.001; así mismo el coeficiente de determinación ( $r^2$ ) es de 0.9707. Mientras que el factor de expansión de biomasa determinado para la especie es de 1.40.

**Razones por que estudiar teca (*Tectona grandis* L.f.):**

La madera de teca ha gozado de una excelente demanda y es preferida por los inversionistas; durante la década de 1980 en Holanda la inversión oscilaba entre 650 millones y 1.35 miles de millones los Mercados Financieros de Holanda –AFM- calculaban que la inversión se incrementaban a 200 millones al año AFM (2005). A pesar que teca satisface solo una pequeña parte de la demanda total por maderas duras tropicales de alto valor (unos 3 millones m<sup>3</sup> de un total de 90 millones m<sup>3</sup>). La mayor parte de las maderas duras provienen de fuentes no sostenibles; entonces, para asegurar un futuro sostenible, deben ser sustituidas por maderas provenientes de fuentes alternativas como lo son las plantaciones forestales, Keogh (2014).

Según Keogh (2014), a la fecha en los continentes Asia, África y América Latina hay establecidas 3,116,650 ha de plantaciones de teca, mientras tanto los bosques naturales y semi naturales de teca en la India, Laos, Myanmar y Tailandia ocupan un total de 27,933,700 ha.

En Guatemala las plantaciones de teca están aumentando rápidamente, en la actualidad el área que ocupan los bosques plantados con dicha especie según Mollinedo, Herrera & Muñoz, (2016); es de 33,000 hectáreas; el 80% de las plantaciones se ubican en la región septentrional del país y derivan del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR).

### 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

#### 3.1. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

De Camino & Morales (2013), indican que desde hace un par de décadas se ha venido dando una polémica entre grupos en favor y en contra de las plantaciones forestales incluyendo especialmente especies de Pino (*Pinus spp*), Eucalipto (*Eucalyptus spp*), Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) y Teca (*Tectona grandis* L.f).

Se ha discutido incansablemente el impacto ambiental, social y económico que las plantaciones provocan. Autores como Bremer & Farley (2010), consideran que las plantaciones forestales reducen drásticamente la capacidad de sustento natural de la biodiversidad vegetal y faunística; dichos autores van más allá al afirmar que las plantaciones forestales, junto con los mono cultivos agrícolas y la ganadería, son desiertos verdes.

Las plantaciones forestales en la actualidad se utilizan como estrategia para reducir los gases de efecto invernadero, estrategias creadas por los 189 países que conforman las Naciones Unidas -ONU- (2015). Las plantaciones forestales se transforman así, en eficientes impulsoras de cambio hacia la promoción de los beneficios que significan la fijación de carbono en la madera, a la vez las plantaciones forestales han hecho que se reduzca el consumo de maderas provenientes de bosque natural por que ofrecen otros productos secundarios, como múltiples bienes y servicios a las comunidades rurales, por ende a la sociedad civil. De camino & Morales (2013).

Actualmente en Guatemala no se ha generado un modelo matemático específico para teca (*Tectona grandis* L. f.), que sirva para estimar la biomasa por encima del suelo, esta situación conduce a la utilización de fórmulas generales creadas por Brown (1997), que sirven para la estimación de biomasa en especies tropicales, a decir verdad no se sabe qué tan confiables son los resultados provenientes de estas ecuaciones por la sencilla razón que el desarrollo de los árboles, puede ser distinto en nuestro país por las características edafoclimáticas.

### 3.2. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Los árboles capturan el Dióxido de Carbono durante el proceso de fotosíntesis, para ser convertido en celulosa y permanecer almacenado en su estructura, es por ello que los bosques naturales y plantaciones forestales brindan beneficios ambientales como la fijación de carbono (Ávila, Jiménez, Beer, Gómez e Ibrahim, 2001).

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), realizó una evaluación de recursos forestales mundiales FRA (2015), y el compendio de datos refleja que en Guatemala en el año 1990 existía un área de bosque de 4,748,000 ha y para 2015 existen 3,540, 000 ha de cobertura boscosa, estos datos demuestran que existe una tasa de cambio promedio anual de -1.2%.

De acuerdo al estudio realizado por Mollinedo, Herrera & Muñoz, (2016); El área que ocupan los bosques plantados con la especie de teca es de 33,000 hectáreas; el 80% de las plantaciones se ubican en la región septentrional del país y derivan del Programa de Incentivos Forestales (PINFOR). Según INAB (2014), teca ocupa el segundo lugar de especies plantadas a nivel nacional después de Pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore). Los datos reflejan que existe la oportunidad de generar un modelo matemático específico para teca que permita cuantificar la biomasa y el carbono aéreo fijado, de esta manera surge la creación de oportunidades de generar ingresos económicos adicionales por servicios ambientales.

Según FAO (2013), cuando se utilizan modelos matemáticos generales en raras ocasiones se tienen potestad para realizar comprobaciones o validaciones. Mientras tanto el modelo matemático específico para teca, creado en el presente estudio, podrá ser utilizado por silvicultores que trabajen la misma especie, de esta manera podrán estimar el carbono aéreo fijado por sus plantaciones. Además es de beneficio para el sector forestal porque con el modelo matemático se estará cumpliendo con uno de los requisitos para la inclusión de los productores al mercado de carbono, favoreciendo de esta manera al sector social, económico y especialmente al ambiente con la fijación de gases de efecto invernadero.

## 4. OBJETIVOS

### 4.1. GENERAL:

Generar un modelo matemático para estimar la cantidad de carbono aéreo (sobre el suelo) fijado por plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) de 14 y 15 años de edad en la finca Sacuitz Chahal Alta Verapaz.

### 4.2. ESPECÍFICOS:

- Estimar el volumen total existente en plantaciones de teca de 14 y 15 años de edad en la finca Sacuitz Chahal Alta Verapaz.
- Evaluar la relación de densidad y el factor de conversión de biomasa a carbono en estructura arbórea (fuste, ramas, ramillas y hojas) de teca de 14 y 15 años de edad en la finca Sacuitz Chahal Alta Verapaz.
- Estimar carbono fijado y captura anual con base al volumen total y el Incremento Medio Anual (IMA) en volumen para las plantaciones de teca de la finca Sacuitz Chahal Alta Verapaz.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO

El municipio de Chahal, se localiza en el noreste del departamento de Alta Verapaz, a 367 km de la ciudad capital, vía cabecera departamental a 375 Km vía carretera al atlántico. De la cabecera departamental se localiza a 150 km, vía Campur, Sebol y Fray Bartolomé de las Casas, con carretera de terracería (SEGEPLAN, 2009).

El trabajo de investigación fue realizado en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L. f.) establecidas en los años 2001 y 2002, cuentan respectivamente con 14 y 15 años de edad, ubicadas en la finca Sacuitz, en el municipio de Chahal en Alta Verapaz. La finca posee 161.2 hectáreas reforestadas con dicha especie. Los árboles proceden de semilla certificada, no se utilizó ningún material genético mejorado para establecer las plantaciones.

Con base al mapa de recategorización de las zonas de vida, elaborado por el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente -IARNA-URL- (2015), se puede determinar que la finca Sacuitz, se encuentra dentro de la categoría Bosque muy húmedo tropical (bmh-T), la altitud promedio en que se encuentra la finca es de 129 msnm, con una pendiente promedio de 14%. La temperatura media es de 25.3°C y precipitación anual promedio de 3583 mm.

Según la clasificación realizada por Tobías (2010), la finca se encuentra ubicada en suelos de orden Ultisol con sub ordenes Humults y Udults caracterizados por sus niveles de productividad que son muy bajos, excepto los Humults, que son buenos suelos, pero en la medida que se les somete a actividades productivas intensivas y la pérdida de la cubierta orgánica superior, se convierten con el tiempo en Udults. Vaides (2004), indica que los sitios que presentan crecimientos menores se presentan en suelos con valores de pH menor a 5.5, localizados en los municipios de Panzós, Fray Bartolomé de las Casas, Chahal en Alta Verapaz, y Livingstone Izabal.

## **5.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN**

La investigación se basa a partir de un muestreo de datos no experimentales, obtenidos a partir de un inventario forestal como una fase primaria de la obtención de valores del volumen total de la plantación forestal de teca ya establecida con anterioridad en la finca.

Para alcanzar los objetivos propuestos en la investigación fue necesario realizar 2 fases de campo la primera fue realizar un inventario forestal y la segunda fue efectuar la recolección de muestras de la parte aérea de los árboles y pesar algunas partes en campo. Además, se realizaron dos fases de laboratorio, la primera en el Laboratorio Químico del campus San Pedro Claver S.J. La Verapaz de la Universidad Rafael Landívar, con el fin de evaluar la densidad de la madera y determinar el factor de expansión de la biomasa y la segunda fase se hizo en el Laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad del Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala, con el fin de obtener los valores de contenido de carbono de las muestras tomadas en campo y preparadas en el laboratorio de la URL.

## **5.3. PROCEDIMIENTO DE LA EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN**

Con el fin de clarificar los procedimientos establecidos para esta fase de la investigación, se presentan por objetivo abordado, especificando los pasos seguidos en campo, laboratorio y gabinete.

### **5.3.1. Estimación de volumen total de las plantaciones de teca**

La metodología que se utilizó para alcanzar el primer objetivo específico que obedece a la estimación del volumen total existente en plantaciones de teca de 14 y 15 años de edad, en la finca Sacuitz Chahal, Alta Verapaz. Fue la siguiente.

**Diseño del Inventario Forestal:** Las variables que hacen referencia a Diámetro a la Altura del Pecho (DAP), altura total (Ht), características fenotípicas y posición de los árboles se obtuvieron mediante un inventario forestal utilizando un muestreo sistemático

estratificado, debido a que la plantación fue dividida en sub poblaciones basadas en los años que fueron establecidas, con el objetivo de crear muestras independientes.

La estratificación se realizó con base a las edades, de los estratos 14 y 15 años respectivamente. Esta actividad se realizó mediante la georreferenciación del perímetro de las plantaciones, luego se utilizó el programa Arc Gis para la elaboración de mapas y la estimación del área de cada rodal.

En la figura 1, se presenta el mapa del estrato I, formado por la plantación de 14 años de edad, el estrato más grande de la finca y en la figura 2, el mapa del estrato II, superficie de menor tamaño de la evaluación con la plantación de 15 años de edad.

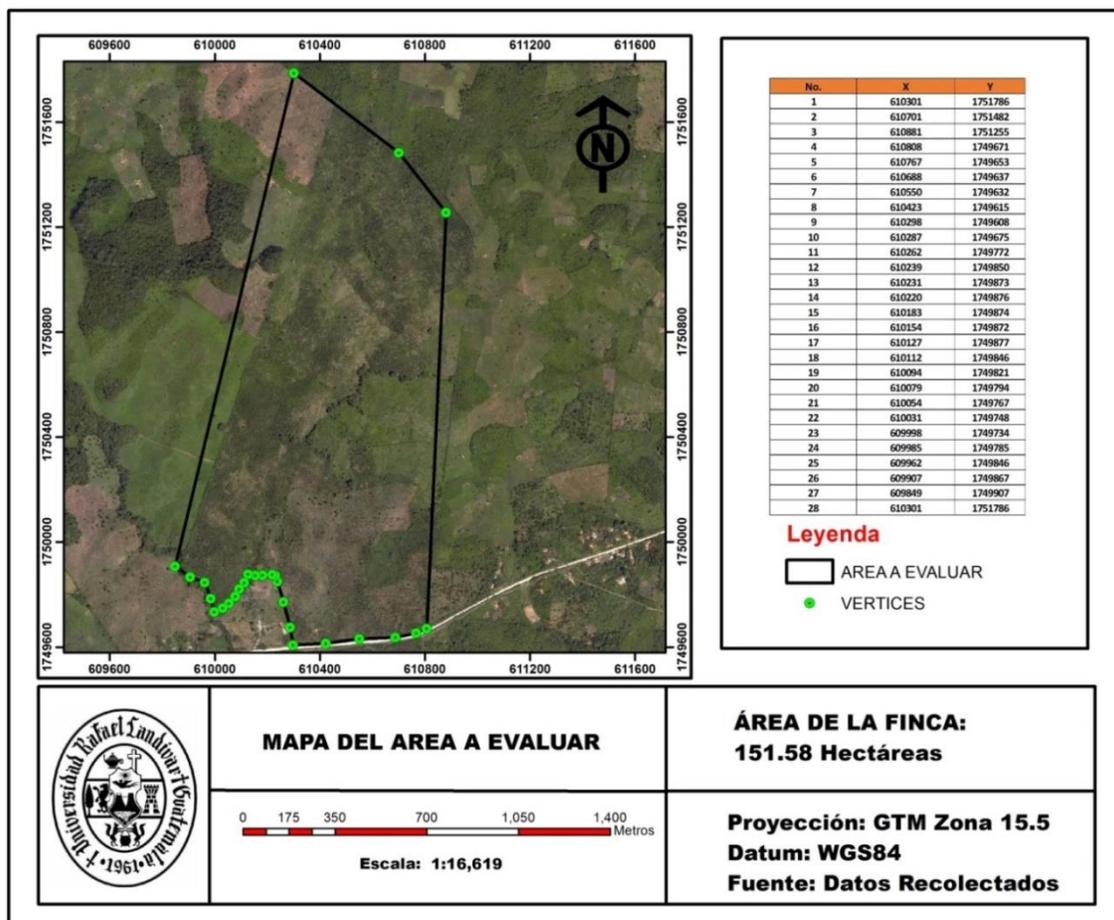


Figura 1. Polígono del estrato I con plantación de teca establecida en el año 2002 con un área de 151.58 hectáreas, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

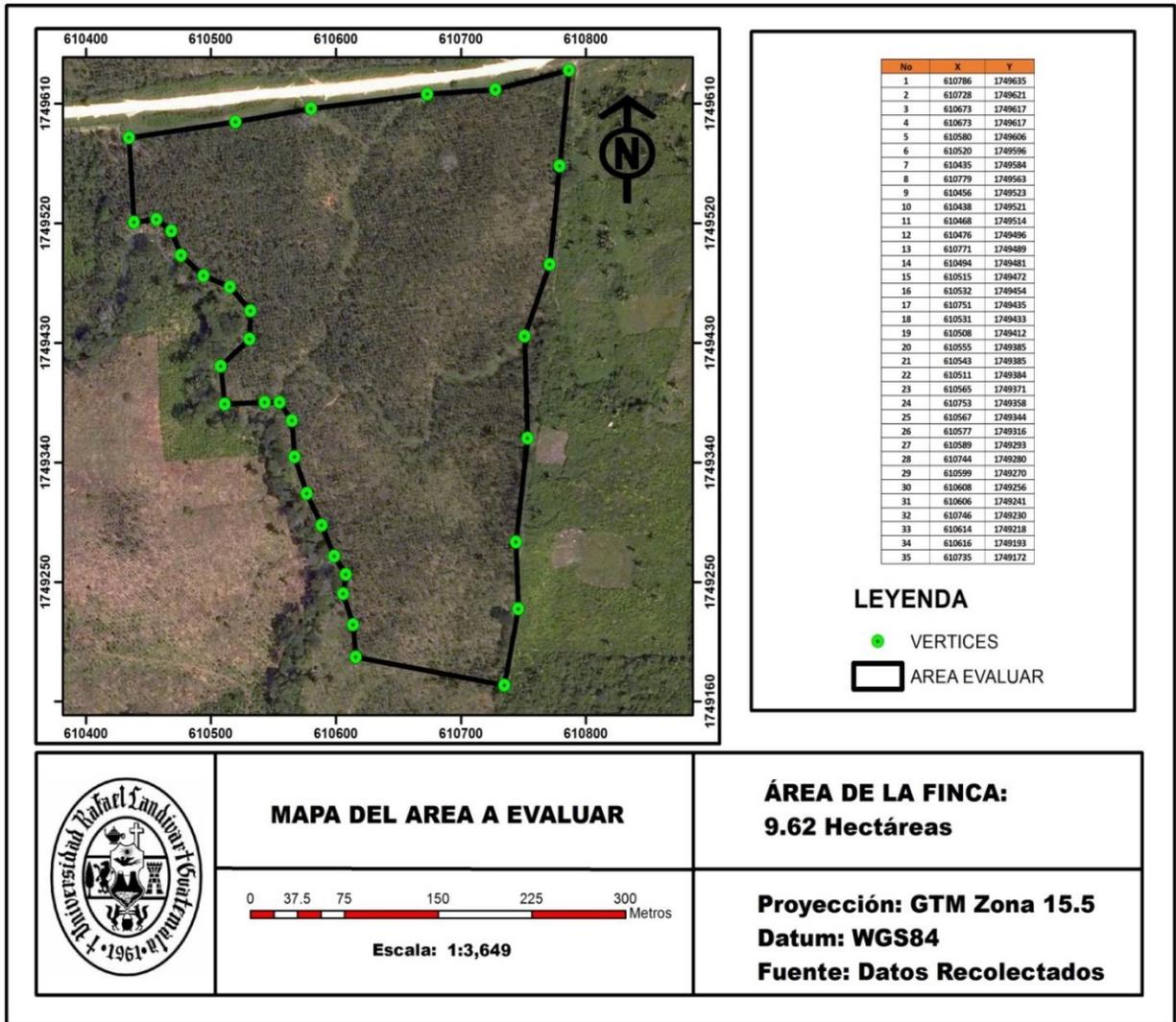


Figura 2. Polígono del estrato II con plantación de teca establecida en el año 2001 conformado por 9.62 hectáreas, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

La estratificación se realizó con el objetivo de recolectar los datos dasométricos y muestras específicamente para cada una de las plantaciones. El área total que ocupan los dos estratos evaluados es de 161.2 hectáreas.

**Distribución de las Parcelas:** Utilizando un Sistema de Información Geográfica (SIG) y con el uso de la herramienta ArcGIS, se realizó la distribución de las parcelas de forma sistemática de tal manera que las parcelas quedaron distribuidas en líneas

equidistantes para luego ubicarlas con Sistema de Geo posicionamiento Global (GPS) en campo definitivo.

Utilizando la herramienta de cuadrícula en ArcGIS, se definieron a cada 500 metros las 76 parcelas con sus respectivas coordenadas en las 151.58 hectáreas que componen el estrato I de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz (Figura 3).

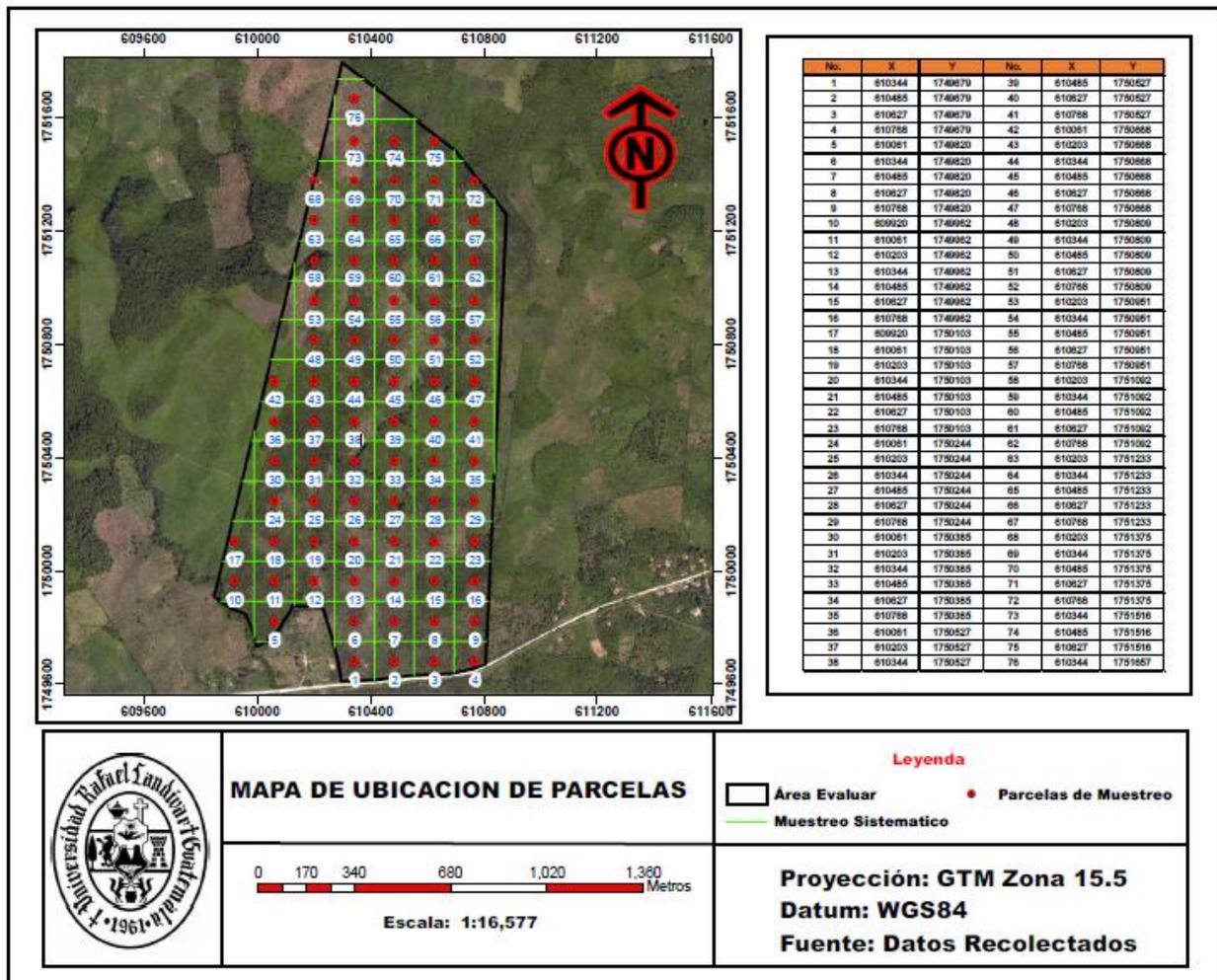


Figura 3. Distribución de parcelas para el muestreo sistemático de la plantación de teca, en el estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

En el estrato II, con un área de 9.62 hectáreas, fueron distribuidas 8 parcelas de manera sistemática, con la herramienta de la cuadrícula del programa ArcGIS,

determinando las coordenadas de cada una de las parcelas para su ubicación en campo con ayuda de un GPS navegador (Figura 4).

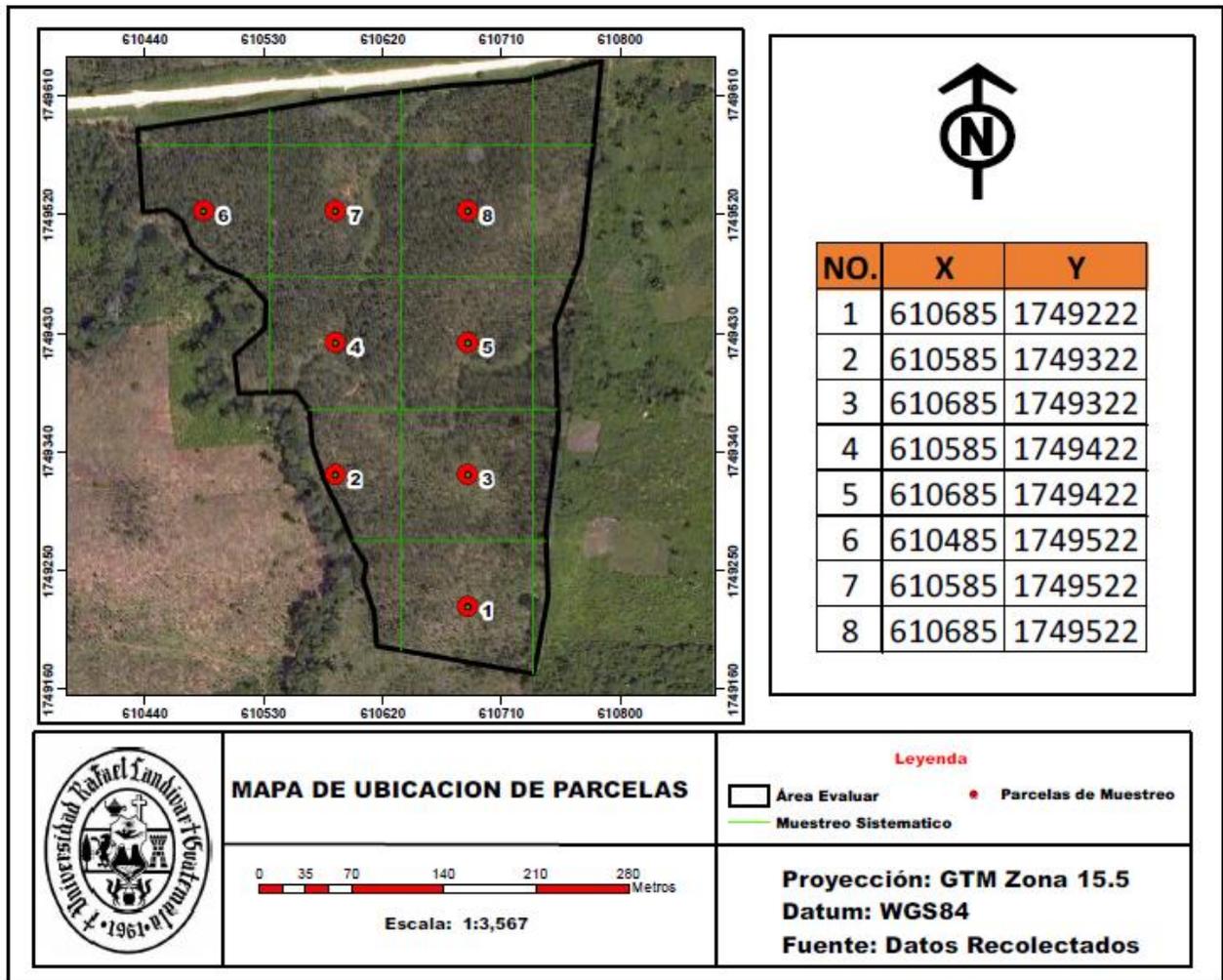


Figura 4. Distribución de parcelas para el muestreo sistemático de la plantación de teca, en el estrato II, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

**Tamaño y forma de Parcelas:** Para la recolección de información dasométrica se levantaron parcelas con área de 500 metros cuadrados ( $m^2$ ), de forma circular, utilizando para su delimitación en campo un radio de 12.6156 metros. Este tipo de parcela se utilizó por tener menos línea de borde.

**Calculo de población:** La población se estima a partir del área total de cada estrato, para este caso se utilizó la referencia del INAB (2014), que recomienda la fórmula siguiente:

$$N = (\text{Área (ha)} * 10,000 \text{ m}^2) / \text{tamaño parcelas m}^2$$

El cálculo de población para el Estrato I fue el siguiente:  $N = (151.58 \text{ ha} * 10,000 \text{ m}^2) / 500 \text{ m}^2$  dando como resultado 3,031.6 parcelas y para determinar la población del Estrato II fue:  $N = (9.62 \text{ ha} * 10,000 \text{ m}^2) / 500 \text{ m}^2$  resultando 192.4 parcelas.

**Intensidad de muestreo y número de parcelas:** Se planificó el muestreo con el 2% de intensidad, debido a que en la investigación se necesitan inferencias estadísticas cercanas a la realidad, además el Instituto Nacional de Bosques –INAB- recomienda una intensidad de muestreo entre el 1% - 3%, por que las plantaciones forestales presentan características homogéneas. El número de parcelas es calculado de la siguiente manera:

Área total=161.2 hectáreas

IM= 2%

Tamaño de parcelas= 500 m<sup>2</sup>

**Número de parcelas a levantar en Estrato I:**  $N * IM$

$$3,031.6 \text{ parcelas} * 0.02 = 60.63 \text{ parcelas (unidades de muestreo).}$$

Para obtener más información de la masa forestal y por lo tanto mayor confiabilidad de los resultados se levantaron un total de 76 parcelas para el Estrato I.

**Número de parcelas a levantar en Estrato II:**  $N * IM$

$$192.4 \text{ parcelas} * 0.02 = 3.84 \text{ parcelas (unidades de muestreo).}$$

Al igual que en el Estrato I, con el objetivo de obtener más información de la masa forestal y por lo tanto mayor confiabilidad en los resultados se levantaron un total de 8 parcelas para este estrato.

Para la elaboración de planes de manejo forestal con fines de producción, es aceptable un error de muestreo menor o igual a 15%, a un nivel de confianza de 95%; cuando hace referencia a masas forestales regulares, donde calificarían estos bosques plantados.

En resumen, fueron establecidas 76 parcelas de muestreo en el Estrato I y 8 Parcelas en el Estrato II, de 3,224 parcelas que es la población total. Con base a estos datos, se puede resumir que el levantamiento de la muestra tiene una relación de 1 parcela de 500 m<sup>2</sup> por cada 2 ha.

**Variables a medir:** Los datos que fueron evaluados en cada una de las parcelas, para la estimación del volumen total de la plantación, coinciden con lo recomendado por Castellanos, *et al.*, (2010). Las variables medias fueron: DAP del 100% de los árboles, altura total de al menos 5 árboles por cada parcela, esta información se usa para calcular mediante regresión la altura de todos los árboles. Además se evaluó la posición de los árboles con respecto del dosel y la forma del fuste, tomando esta variable en el 100% de los árboles.

#### **Equipo y materiales:**

Para recolectar la información de campo, fue necesaria la utilización de los materiales y equipo siguiente.

- GPS navegador (geoposicionador)
- Brújula
- Cinta métrica (50 m)
- Cinta diamétrica
- Hipsómetro (SUUNTO)
- Cámara fotográfica

- Reloj
- Machete y lima
- Cinta plástica fosforescente
- Libreta de campo
- Lápiz
- Fólter plástico con gancho
- Marcadores permanentes punto fino y grueso
- Botiquín de primeros auxilios
- Bolsas plásticas para los instrumentos de medición y formularios
- Baterías alcalinas para GPS

### **5.3.2. Densidad de la madera y factor de conversión de biomasa a carbono.**

En el segundo objetivo específico se priorizo evaluar la relación de densidad, factor de expansión de la biomasa y el factor de conversión de biomasa a carbono de la estructura arbórea; este procedimiento se dividió en dos fases una de campo en la que se recolectan las muestras y sub muestras, la otra fase fue de laboratorio en donde se secaron las muestras y luego se determinó la densidad de la madera el procedimiento se describe a continuación:

**Recolección de muestras:** Para la toma de datos, se utilizó la metodología propuesta por Winrock International (2012), se obtuvieron las muestras de 20 árboles con distintas clases diamétricas, que fueron tumbados y seccionados. Las plantaciones forestales con un manejo adecuado cuenta con poca variabilidad entre los individuos, por lo tanto, la información que se obtiene de las mismas es representativa. Brown (1997).

**Derribo de árboles:** El corte de los árboles se realizó, dejando un tocón a una altura de 0.25 metros, utilizando para este corte una motosierra.

**Desramado:** Con la misma herramienta del derribo (motosierra), se procedió a quitar las ramas del fuste principal de cada árbol, teniendo cuidado de no dañar las ramas porque cada una de ellas fue utilizada para obtener información de peso vivo de estas.

En su estudio Lee (2002), clasifica mediante diámetros las ramas y ramillas. Las ramas con diámetros de 3.5 a 14.5 cm y ramillas con 0.8 a 3.5 cm, utilizando esta misma clasificación para este estudio.

**VARIABLES MEDIDAS:** Las variables que se midieron para cálculo de biomasa fueron las que recomienda Winrock International (2012), siendo estas: DAP (diámetro a la altura del pecho, considerada a 1.30 m del suelo) en centímetros, Diámetro de la copa (DC), altura directa del árbol (m), altura del tocón (m), diámetro del tocón (m), longitud del fuste derribado (m), diámetro del fuste a cada dos metros del árbol derribado (cm), peso fresco total de hojas, ramas y ramillas (kg), cuando se finalizó el proceso se obtuvieron 3 sub muestras de inferencia de cada componente (hojas, ramas, ramillas y fuste ), las cuales fueron tomadas como base para hacer las estimaciones y relaciones de los pesos secos en función de los pesos frescos.

**Medición de la altura total del árbol:** Los datos de altura total se obtuvieron utilizando cinta métrica, midiendo directamente el árbol después de ser cortado, esta medición incluyó la altura del tocón hasta el ápice del árbol.

**Medición de diámetro de copa:** Esta información se obtuvo al derribar los árboles muestra, realizando mediciones de los dos radios, utilizando una cinta métrica en forma de cruz. Según García & Sánchez (2009), se debe partir del centro del fuste hasta la longitud que alcanza cubriendo la copa, estos datos constituyen una variable para ser relacionada con la biomasa total de cada árbol evaluado.

**Medición del Fuste:** Los datos que se colectaron en este proceso fueron: diámetro mayor, diámetro menor y longitud de cada troza. La cubicación de los árboles se efectuó utilizando la fórmula de Smalián desarrollada, que toma en consideración la sumatoria de todas las secciones del árbol, incluyendo la punta (INAB, 2014).

$$Vi = \frac{(D1*0.7854)^2+(D2*0.7854)^2}{2} * L \quad ; \quad Vtotal = \sum Vi$$

Dónde:

$V_i$  = volumen de cada sección,

$D_1$  = diámetro menor de sección,

$D_2$  = diámetro mayor de sección,

$0.7854 = \pi/4$  (constante),

$L$  = longitud de sección,

$V_{total}$  = volumen total del fuste.

**Sub muestras del fuste:** Se obtuvieron sub muestras en forma de rodaja utilizando la motosierra, seccionando el fuste de los arboles obteniendo la primera rodaja en el tocón, la segunda rodaja en la parte media del fuste y la tercera rodaja en la parte alta del árbol. Las sub muestras fueron identificadas con un código, fecha, parte del árbol muestreada, localización, para su posterior traslado a laboratorio.

**Muestreo de ramas y ramillas:** Luego de hacer la clasificación de ramas y ramillas por diámetros se apilaron para luego amarrarlas y pesarlas con una balanza colgante. Las ramas y ramillas no tenían hojas, que fueron separadas para pesarlas por separado. Estos datos fueron tomados como el peso húmedo de los árboles evaluados. Al igual que en los pasos anteriores este procedimiento sirvió para obtener 3 sub muestras que fueron colocadas en bolsas de polietileno debidamente identificadas trasladadas a laboratorio.

**Muestreo de hojas:** Se procedió a separar la totalidad de las hojas de las ramillas para luego colocarlas en bolsas de polietileno y realizar el pesaje. Estos datos fueron tomados como el peso húmedo o peso fresco total de las hojas. Estos procedimientos se efectuaron de acuerdo a lo citado por Castellanos, *et al.*, (2010), obteniendo 3 sub muestras de 2 Kg. Cada una de las muestras fueron trasladadas a laboratorio debidamente identificadas.

**Fase de laboratorio:** El procedimiento se llevó a cabo en dos laboratorios, el primero fue el laboratorio de química de la Universidad Rafael Landívar Campus San Pedro

Claver y el segundo laboratorio fue el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle.

**Secado de las sub muestras:** Las muestras se trasladaron al laboratorio de química de la Universidad Rafael Landívar, donde se secaron a una temperatura de 70-80 °C durante 96 horas. Cada 24 horas se pesaron utilizando balanza semi-analítica con una sensibilidad de 0.01 gramos, con la finalidad de evaluar cuando se estabiliza el peso seco de las muestras.

La metodología propuesta por (Castellanos, Quilo, Mato, 2010) indica que para poder cuantificar la biomasa total de cada parte vegetativa analizada (hojas, ramas y ramillas); es necesario utilizar los pesos secos finales (biomasa) de las sub muestras recolectadas, relacionándolas con los pesos húmedos tanto de las sub muestras como las del total del árbol pesadas durante la fase de campo. En este caso se siguió el mismo procedimiento, para lo cual se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$BH = PFH(kg) \times Promedio\left(\frac{Psm (Kg)}{Pfm(Kg)}\right)$$

$$Bram = PFRam(kg) \times Promedio\left(\frac{Psmram (Kg)}{Pfmram(Kg)}\right)$$

$$Bras = PFRas(kg) \times Promedio\left(\frac{Psmras (Kg)}{Pfmras(Kg)}\right)$$

Dónde:

BH = Biomasa de hojas.

Bram = Biomasa de ramas.

Bras = Biomasa de Ramillas.

PFH = Peso fresco total hojas.

PFRam = Peso fresco total de las ramas en Kg.

Promedio = promedio de las 3 sub muestras.

Psm = Peso seco de la sub muestra de hojas en Kg.

Psmram = Peso seco de la muestra de ramas en Kg.

Pfm = Peso fresco de la sub muestra de hojas en Kg.

Pfmram = Peso fresco de la muestra de ramas en Kg.

PFras = Peso fresco total de las ramillas en Kg.

Psmras = Peso seco de la muestra de las ramillas en Kg.

Pfmras = Peso fresco de la muestra de las ramillas en Kg.

**Análisis de sub muestras del fuste:** Para la facilidad de análisis y manejo de las muestras en laboratorio se dimensionaron a las siguientes medidas: Ancho de 3 cm y largos que van desde 7 cm hasta 15 cm, este último depende directamente del diámetro del árbol derribado.

Posterior a la preparación de las sub muestras recolectadas, el análisis del fuste se realizó en dos fases: Siendo la primera la obtención del peso fresco utilizando balanza semi-analítica o balanza portátil con una sensibilidad de  $\pm 0.01g$ , además de la estimación del volumen específico de cada una de ellas. Este último procedimiento se realizó utilizando el principio de Arquímedes, en donde todo cuerpo sumergido en un fluido o volumen específico experimenta un empuje vertical de abajo hacia arriba igual al peso del volumen del líquido desplazado, por lo que para la realización del procedimiento se utilizó una probeta de vidrio borosilicato simax con pie hexagonal graduada a 250 ml y un diámetro de 4 cm (FAO, 2013).

Las muestras de los fustes se analizaron en el orden en que fueron cortadas en el campo siguiendo el procedimiento de Arquímedes.

- Se Colocaron las muestras en un recipiente con agua por un periodo de una a dos horas, lo cual permitió llenar las células de la superficie con agua, y prevenir la absorción y adsorción de agua durante la determinación de volumen.
- Seguidamente se procedió a llenar con agua una probeta de vidrio de borosilicato simax con pie hexagonal graduada a 250 ml y con un diámetro de 4

cm, en donde se determinó el volumen sin muestra o volumen inicial (Vol. 1) en centímetros cúbicos (cc).

- El siguiente paso fue sumergir la muestra del fuste en la misma probeta, en donde se midió el volumen final o el volumen con muestra (Vol. 2) en centímetros cúbicos (cc).

Después se realizó el cálculo de Volumen de la sub muestra de madera del fuste, a través de la siguiente fórmula:

$$Vol. Submuestras(cc) = Vol. 2 (cc) - Vol. 1 (cc)$$

Luego se determinó el peso seco del fuste mediante el proceso de secado a una temperatura de 70-80 °C durante 96 horas al igual que en el proceso anterior se realizaron mediciones de peso diariamente para estabilizar el peso (Pacay, 2011).

**Pruebas de Carbono:** Esta prueba se realizó en el laboratorio especializado de la Universidad del Valle de Guatemala UVG. Preparando un total de 32 sub muestras correspondientes a 5 árboles elegidos de acuerdo al diámetro a la altura del pecho, puesto que se tiene como objetivo primordial abarcar la mayor variabilidad diamétrica de toda la muestra. De cada uno de los árboles se extrajo las muestras de hojas, ramas, ramillas y fuste, y solamente de 2 árboles se duplico la cantidad de muestras para evaluar la variación en el mismo árbol. Estos métodos se basaron a lo recomendado por Castellanos, *et al.*, (2010).

En el laboratorio cada una de las sub muestras fueron pulverizadas, se depositaron en bolsas de papel para luego ingresarlas al analizador elemental de carbono y nitrógeno (Flash EA 1112), en el cual las muestras fueron sometidas a la prueba de los elementos antes mencionados, la constancia de los resultados se presentan en el Anexo 18.

**Análisis de la información:** Esta fase consistió en trabajo de gabinete donde se tabuló la información recolectada en campo y los datos obtenidos en las dos fases de laboratorio.

**Ecuaciones para el cálculo de variables:** De acuerdo con la metodología para la estimación de carbono en bosques y sistemas agroforestales, propuesta por Castellanos, *et al.*, (2010), se utilizaron las siguientes fórmulas para determinar la densidad específica de la parte alta, baja y media del fuste en gramos por centímetros cúbicos (g/cc):

- **Densidad específica de la parte alta (D.e.A.):**

$$D. e. A. = \frac{\text{Peso secado al horno sección alta (g)}}{\text{Volumen fresco sección parte alta (cc)}}$$

- **Densidad específica de la parte media (D.e.M.):**

$$D. e. M. = \frac{\text{Peso secado al horno sección parte media (g)}}{\text{Volumen fresco sección parte media (cc)}}$$

- **Densidad específica de la parte baja (D.e.B.):**

$$D. e. B. = \frac{\text{Peso secado al horno sección parte baja (g)}}{\text{Volumen fresco sección parte baja (cc)}}$$

- **Densidad específica promedio del fuste (D.e.P):**

$$D. e. P. = \frac{(D. e. A. + D. e. M. + D. e. B.)}{3}$$

- **Biomasa del Fuste:**

$$BF = D. e. P * V_{total} * 1,000$$

En donde:

D.e.P. = Densidad específica promedio del fuste (g/cc)

BF= Biomasa del Fuste (kg)

Vtotal= Volumen total del Fuste (m<sup>3</sup>)

- **Biomasa Total del Follaje:**

$$BT_{\text{foll}} = PFT_{\text{foll}} * \frac{PSM_{\text{foll}}}{PFM_{\text{foll}}}$$

Donde:

$BT_{\text{foll}}$  = Biomasa Total del Follaje (kg)

$PFT_{\text{foll}}$  = Peso Fresco Total del Follaje (kg)

$PSM_{\text{foll}}$  = Peso Seco de la Muestra del Follaje (kg)

$PFM_{\text{foll}}$  = Peso Fresco de la Muestra del Follaje (kg)

- **Biomasa total de Ramas:**

$$B_{\text{Tram}} = PF_{\text{Tram}} * \frac{PSM_{\text{ram}}}{PFM_{\text{ram}}}$$

Donde:

$B_{\text{Tram}}$  = Biomasa Total de ramas (kg)

$PF_{\text{Tram}}$  = Peso Fresco Total de ramas (kg)

$PSM_{\text{ram}}$  = Peso Seco de la Muestra de ramas (kg)

$PFM_{\text{ram}}$  = Peso Fresco de la Muestra de ramas (kg)

- **Biomasa total de Ramillas:**

$$B_{\text{Tram}} = PF_{\text{Tramillas}} * \frac{PSM_{\text{ramillas}}}{PFM_{\text{ramillas}}}$$

Donde:

$B_{\text{Tramillas}}$  = Biomasa Total de ramillas (kg)

$PF_{\text{Tramillas}}$  = Peso Fresco Total de ramillas (kg)

$PSM_{\text{ramillas}}$  = Peso Seco de la Muestra de ramillas (kg)

$PFM_{\text{ramillas}}$  = Peso Fresco de la Muestra de ramillas (kg)

- **Biomasa total por árbol:**

Los resultados obtenidos de los cálculos anteriores se tabularon y ordenaron para obtener la biomasa total por encima del suelo de cada árbol, mediante la sumatoria de los pesos secos de cada uno de sus componentes (fuste, ramas, ramillas y hojas).

$$BT_{\text{árbol}} = BF + BT_{\text{foll}} + B_{\text{Tram}} + B_{\text{Tramillas}}$$

Dónde:

BT<sub>árbol</sub> = Biomasa Total por árbol (kg)

BF = Biomasa del Fuste (kg)

BT<sub>foll</sub> = Biomasa Total del Follaje (kg)

B<sub>Tram</sub> = Biomasa Total de ramas (kg)

B<sub>Tramillas</sub> = Biomasa Total de ramillas (kg)

**Determinación del factor de expansión de biomasa:** El Factor de Expansión de Biomasa (FEB) se calculó a partir de los datos de biomasa previamente estimados y consistió en realizar una relación matemática entre la biomasa total y la biomasa del fuste. Esto se realizó por cada árbol obteniendo los resultados sumados y promediados por los 20 árboles para obtener el FEB final. Por lo que se utilizó la siguiente fórmula para su respectivo cálculo:

$$FEB = \frac{BT_{\text{Tot}}}{B_{\text{fust.}}}$$

Donde:

FEB= Factor Expansión de Biomasa,

BT<sub>Tot</sub>= Biomasa total (kg)

B<sub>fust</sub>= Biomasa del fuste (kg)

**Sistematización de la Información:** De acuerdo con Lee (2002), al momento de finalizar la estimación de biomasa de cada uno de los componentes de los árboles, se procede a realizar el cálculo total de biomasa por cada uno de los 20 árboles, para lo cual se elaboraron tablas para lograr el ordenamiento de toda la información generada a nivel de laboratorio y a nivel de campo. La biomasa total por árbol, se calculó sumando la biomasa de los componentes, los resultados se utilizan para la determinación del modelo matemático.

**Determinación del modelo matemático:** El modelo matemático fue determinado básicamente relacionando la variable dependiente, la cual es la biomasa total por encima de suelo, con las variables independientes o de regresión como lo son el Diámetro a la Altura de Pecho –DAP-, la altura total del árbol y el Diámetro de Copa –DC-; donde dicho modelo busca ajustarse y calcular de la manera más exacta el contenido de biomasa de un árbol a partir de las variables independientes (Lee, 2002).

**Graficas de dispersión:** Las gráficas de dispersión se hacen para relacionar la variable dependiente con las variables independientes. Para conocer la tendencia de las variables de esta manera se determinó si la ecuación es lineal, cuadrática, exponencial o logarítmica (FAO, 2013). En este caso se graficaron las variables DAP, Ht y DC.

**Análisis de correlación:** De acuerdo con López (2011), para realizar el análisis de coeficiente de correlación de Pearson se puede utilizar el programa INFOSTAT el propósito de hacer este análisis es medir la magnitud de la asociación o dependencia de cada par de variables. Este análisis se efectuó para las mismas variables evaluadas a partir de dispersión.

**Inferencia a cerca de coeficiente de correlación:** Este procedimiento se realizó después de haber evaluado el grado de correlación lineal entre la variable dependiente y las independientes según López (2011), en esta fase del estudio se comprueba estadísticamente la prueba de hipótesis; la decisión se toma utilizando las siguientes reglas que si  $P=0$  no existe correlación lineal, lo cual hacía referencia a la hipótesis nula y que si  $P\neq 0$  si existía correlación lineal que se refiere a la hipótesis alternativa.

**Elaboración del análisis de regresión múltiple:** López (2011) indica que para conocer el tipo de regresión existente entre cada una de las variables independientes con la variable dependiente, se procede a elaborar el Análisis de Regresión Múltiple, el cual define la manera en que la variable dependiente (Biomasa) se relaciona con todas las variables independientes (Diámetro a la Altura del Pecho, Altura Total del árbol y Diámetro de Copa).

**Evaluación de los supuestos del modelo matemático:** Se refieren a las condiciones que se dan para garantizar la validez del modelo, en la presente investigación se utilizó el supuesto de Homocedasticidad el mismo utilizado por Pacay (2011).

**Evaluación de ajuste de regresión:** Para facilidad y rapidez del análisis de la información en su estudio Sagüi (2011), realiza este proceso mediante INFOSTAT donde se avalúan los modelos lineales, cuadráticos o polinómicos, con el propósito de evaluar las hipótesis a través de “t” de student.

**Cuantificación de carbono por encima del suelo:** Los datos de biomasa por árbol se dividió dentro de 1000, para convertirlos a toneladas de biomasa por árbol y éstos se multiplican por el factor de conversión de biomasa a carbono determinado para la especie, con el cual se cuantifica el contenido de carbono en toneladas por árbol.

$$C_{total} = \frac{B}{1000} \times FCBC$$

Dónde:

Ctotal = Carbono total (ton)

B = Biomasa (kg)

FCBC = Factor de conversión de Biomasa a Carbono

### 5.3.3 Cuantificación de carbono fijado y capturado anualmente

El procedimiento para alcanzar el tercer objetivo específico es el siguiente:

- a) **Fijación de carbono actual en la plantación:** La cuantificación del carbono que la plantación tiene fijado, se estableció a partir del volumen total de la plantación, convirtiendo esta cantidad de volumen en biomasa y luego en toneladas de carbono total en función del área plantada.

Estos valores se procesaron a partir de los resultados del inventario forestal de los dos estratos, presentando la cantidad de carbono fijado por estrato.

$$CF = \text{Área} * (\text{Vol/ha} * D.e.P.) * BEF * CC$$

Dónde:

CF = Carbono fijado (t)

Vol/ha = Volumen por hectárea (m<sup>3</sup>/ha)

D.e.P. = Densidad de la madera (t/m<sup>3</sup>)

BEF = Factor de Expansión de la Biomasa

CC= Contenido de carbono (proporción de la biomasa)

**b) Fijación de carbono o captura anual a través de Incremento Medio Anual**

**(IMA):** La cuantificación del carbono que la plantación fija anualmente se realizó con base al Incremento Medio Anual –IMA- en volumen total. Para esta estimación se utilizó la función del IMA en volumen total:

$$\text{IMA(Volumen)} = \frac{\text{Volumen total}}{\text{Edad}}$$

**Formula General:** Cuando se conoce el incremento medio anual del rodal o bosque se aplica la formula general que Masera, De Jong y Ricalde (2000), utilizaron para cuantificar carbono aéreo, la que se define a continuación:

$$CF = \text{Área} * (\text{IMA} * D.e.P.) * BEF * CC$$

Dónde:

CF = Carbono fijado (ton)

IMA = Incremento medio anual en volumen (m<sup>3</sup>/ha/año)

D.e.P. = Densidad de la madera (ton/m<sup>3</sup>)

BEF= Factor de Expansión de la Biomasa

CC= Contenido de carbono (proporción de la biomasa)

## 6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección del documento se presentan los resultados alcanzados de manera desglosada, de acuerdo a los objetivos propuestos al inicio de la investigación en las plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) evaluadas.

### 6.1 ESTIMACIÓN DE VOLUMEN EXISTENTE EN LAS PLANTACIONES

La estimación del volumen total existente de las plantaciones de teca, se realizó con base a un inventario sistemático estratificado donde se recolectó información a través de un total de 84 parcelas circulares de 500 m<sup>2</sup>. (Figuras 3 y 4 del capítulo 5)

#### 6.1.1 Análisis estadístico del Inventario Forestal

De acuerdo con los resultados del inventario forestal (Cuadro 6), la finca cuenta con un total de 161.2 ha de plantación de teca, de 2 edades que constituyeron los estratos de evaluación. El primer estrato fue identificado como estrato I (14 años) y el segundo estrato como estrato II (15 años).

Cuadro 6. Resultado de los valores promedio obtenidos en el inventario forestal, realizado a los 2 estratos con plantación de teca en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

VARIABLE	ESTRATO I	ESTRATO II
Edad en años	14	15
Área (ha)	151.58	9.62
Número de parcelas	76	8
Densidad (árboles/ha)	228	214
DAP promedio (cm)	24.43	30.44
Altura total promedio (m)	19.3	20.3
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	11.4	16.2
Volumen total (m <sup>3</sup> /ha)	105.9	149.3

El estrato I está conformado por 151.58 ha, que corresponde a plantación de 14 años de edad, donde se efectuó una Intensidad de Muestreo del 2.5% y el estrato II con plantación de 15 años de edad cuenta con 9.62 ha, donde la intensidad de muestreo establecida fue de 3.6%. Estas intensidades permiten obtener buenos indicadores para estimar las variables de la población de teca evaluada.

Para validar el muestreo, se efectuó un análisis estadístico a partir de la variable volumen total, poniendo como límite permisible para esta investigación un error de muestreo igual o menor al 15 % con un 95% de confiabilidad.

Entre el estrato I y estrato II existe una diferencia en la densidad de 14 árboles/ha, habiéndose ejecutado en estos dos estratos ya 3 raleos, de los cuales 2 han sido comerciales. Mollinedo, *et al.*, (2016), indican que en plantaciones evaluadas en la zona septentrional de Guatemala por lo general se aplican las prescripciones silviculturales para raleo, conforme se da el crecimiento de los árboles quedando densidades muy bajas hasta 100 árboles por hectárea a los 8 y 10 años. Fonseca (2004), indica que a los 25 años la densidad optima es de 220 árboles/ha, para llegar a la corta final, estando el estrato I; 8 árboles por arriba del ideal referido y el estrato II 6 árboles menos que el ideal. La variable dasométrica altura total, presenta una diferencia de 1 metro entre los dos estratos, mostrando como dice la teoría que después de la mitad de la edad de rotación el crecimiento en altura total tiende a estabilizarse.

Los resultados del análisis estadístico, obtenidos a partir del inventario forestal, para los 2 estratos se muestran en el cuadro 7, analizado tomando en cuenta una probabilidad del 95%, a partir del volumen total de cada parcela estimada en valores por ha.

Cuadro 7. Resultado del análisis estadístico para el muestreo obtenido en los dos estratos de teca de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

<b>VARIABLE</b>	<b>ESTRATO I</b>	<b>ESTRATO II</b>
Volumen total (m <sup>3</sup> /ha)	105.91	149.33
Varianza (s <sup>2</sup> )	724.88	325.05
Desviación estándar (s)	26.92	18.03
Coeficiente de variación (CV%)	25.42	12.07
Error estándar (Sx)	3.09	6.67
Valor de t de student	1.9921	2.4469
Error de muestreo absoluto (EM)	6.15	16.32
Error de muestreo relativo (EM%)	5.81	10.93
Límite superior de volumen total (m <sup>3</sup> /ha)	112.06	165.66
Límite inferior de volumen total (m <sup>3</sup> /ha)	99.76	133.01

De los dos estratos, se puede analizar a partir del coeficiente de variación, que el estrato I es más heterogéneo que el estrato II, con valores de 25.42% y 12.07% respectivamente. Con respecto del volumen total, se tienen errores por debajo del límite establecido para la presente investigación, encontrando para el estrato I que el error está en 5.81% hacia los extremos del valor promedio; y para el caso del estrato II el error está en 10.93% hacia los extremos de la media del volumen total.

### 6.1.2 Tablas de rodal del Inventario Forestal

Después de validados los resultados obtenidos del muestreo en el Inventario Forestal, donde se lograron errores de muestreo admisibles, en esta parte se presentan los resultados por separado para cada estrato, de la estructura del rodal, presentada por tabla de rodal, con una misma amplitud de clases de 5 cm, para poder ser comparables.

#### a) ESTRATO I:

Los datos del estrato I, se analizaron y los resultados se presentan en la tabla de rodal en el cuadro 8, la información dasométrica fue obtenida del 2.51% de la población total, y se agrupo de acuerdo a la clase diametral. En total se midieron 867 árboles, a partir de los cuales se generó la información por hectárea.

Cuadro 8. Tabla de rodal del estrato I, plantación de teca de 14 años de edad, ubicada en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	Muestra			Hectárea		
	F	G	V	F	G	V
05 a 09	29	0.1688	0.8286	8	0.0444	0.2181
10 a 14	55	0.7601	4.6454	14	0.2000	1.2225
15 a 19	95	2.4118	18.0144	25	0.6347	4.7406
20 a 24	250	10.1920	88.2922	66	2.6821	23.2348
25 a 29	298	17.8266	168.1238	78	4.6912	44.2431
30 a 34	114	9.1115	91.8209	30	2.3978	24.1634
35 a 39	22	2.3117	23.5150	6	0.6084	6.1882
40 a 44	4	0.5385	6.5141	1	0.1417	1.7142
<b>TOTAL</b>	<b>867</b>	<b>43.3209</b>	<b>401.7543</b>	<b>228</b>	<b>11.4002</b>	<b>105.7248</b>

Nota: F: Frecuencia, numero de arboles; G: Area basal m<sup>2</sup>; V: Volumen total en m<sup>3</sup>

La tabla de rodal generada agrupa los árboles desde 05 hasta 44 cm de DAP con un rango de análisis total de 40 cm, con el objetivo de poder analizar de una forma adecuada la estructura del bosque.

Con la información presentada en la tabla de rodal del estrato I se puede observar que el 79.39% de los arboles poseen diámetro comercial, encontrando únicamente un 20.61% de los árboles considerados como intermedios y algunos suprimidos, por debajo del dosel general del bosque que lo conforma el primer grupo de codominantes y dominantes.

Se realizó el análisis para el área total del estrato I; utilizando los datos estimados por hectárea presentados en el cuadro 8. Este procedimiento dió como resultado la información presentada en el cuadro 9, mostrando el potencial total con que cuenta la finca en los valores del total de árboles que existe en el estrato I, área basal y volumen total.

Cuadro 9. Tabla de rodal proyectada al área total del estrato I, plantación de teca de 14 años de edad ubicada en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	Área del Estrato 151.58 hectáreas		
	F	G	V
05 a 09	1157	6.73	33.05
10 a 14	2194	30.32	185.30
15 a 19	3790	96.21	718.58
20 a 24	9972	406.55	3521.93
25 a 29	11887	711.09	6706.37
30 a 34	4547	363.45	3662.69
35 a 39	878	92.21	938.00
40 a 44	159	21.48	259.84
<b>TOTAL</b>	<b>34,584</b>	<b>1,728.05</b>	<b>16,025.77</b>

Nota: F: Frecuencia, numero de arboles; G: Area basal m<sup>2</sup>; V: Volumen total en m<sup>3</sup>

El estrato I posee el 79.35% de árboles con diámetro mayor a 20 cm de DAP, que en conjunto hacen un volumen total de 15,088.81 m<sup>3</sup>; significa que hay una disponibilidad de madera importante en este bosque que puede ser fijada al momento de transformarla en muebles u otros usos industriales.

El análisis de la estructura del rodal, se presenta en la figura 5, donde se observa claramente una estructura normal característica de los bosques coetáneos o masas forestales regulares, donde la mayor cantidad de individuos tienen diámetros similares agrupados al centro de la población, encontrando en este caso que el 63.21% de los árboles se encuentran distribuidos en la clase diametral de 20 a 29 cm. Con esta información se puede inferir que el 94.15% del volumen se encuentra en los individuos que tienen más de 20 centímetros de DAP. De acuerdo al INAB (2014), en estos sitios debiera esperarse una edad de rotación de 20 años, con los cuales aseguraríamos que el 100% de los árboles ya estarían formando parte del volumen comercial de la finca.

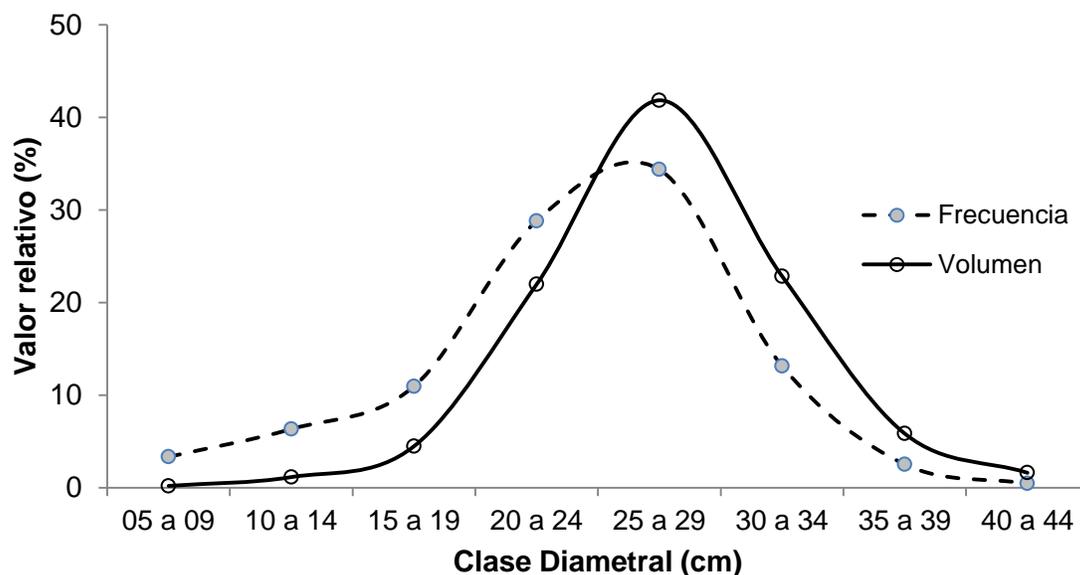


Figura 5. Estructura del rodal de teca de 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Del resultado de las variables cualitativas del estrato, en la figura 6, se muestra un análisis de la posición de los árboles del estrato I; mediante el cual se determinó que el 88.24 % de los árboles se encuentran dentro de la clase de posición del dosel intermedio, codominante y dominante; significa que los mismos reciben luz necesaria para realizar fotosíntesis y desarrollar en diámetro y altura. Además, con estos datos se puede deducir que a la masa forestal se le han realizado tratamientos silviculturales adecuados y a tiempo porque solo cuenta con un 11.76 % de árboles suprimidos.

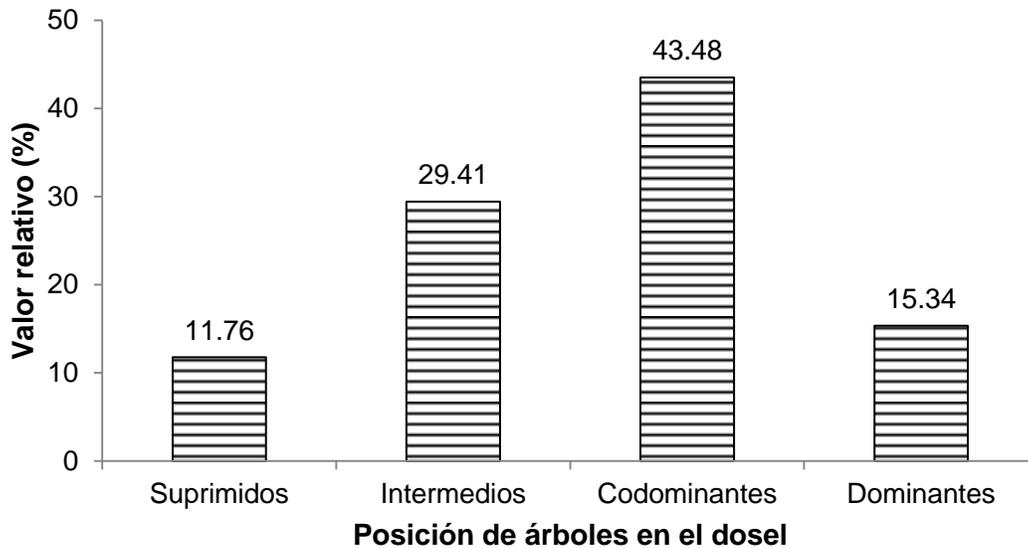


Figura 6. Gráfico de clases de posición de los árboles, en el dosel de la plantación de teca con 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

En la figura 7, se presenta el análisis de la forma de los árboles, mostrando claramente que después de los 3 raleos quedan más del 90% de árboles rectos, ideales para la comercialización del producto final.

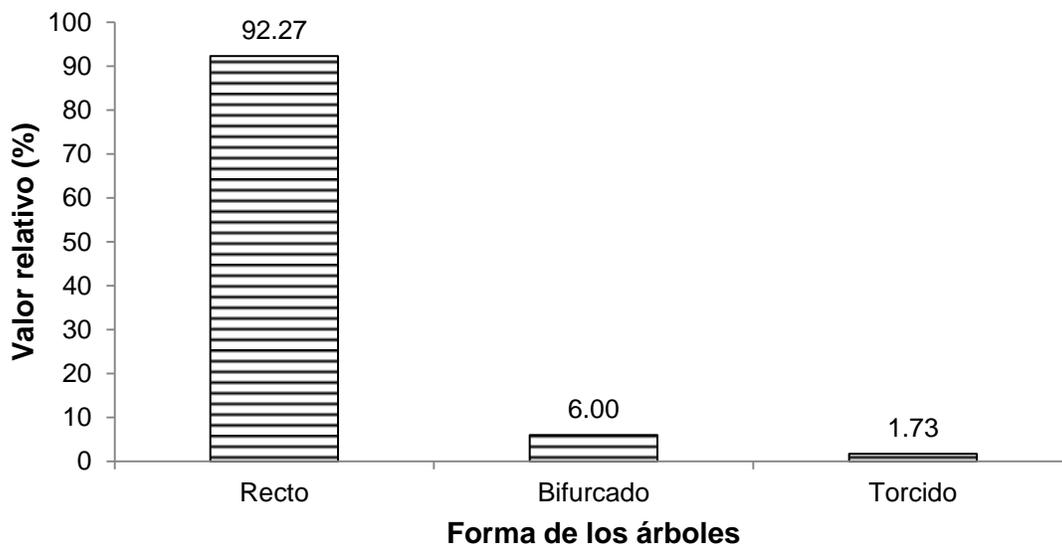


Figura 7. Gráfico de clases de forma del fuste, de los árboles de teca con 14 años de edad, estrato I, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Se denomina incremento a la manera de expresar las variables dendrométricas en función del tiempo. Según Imaña J. & Encinas O. (2008) el mejor parámetro para expresar el crecimiento de un rodal es el volumen, estimado a partir de la medición del DAP. Para el caso de la finca Sacuitz, la plantación de teca de 14 años, del estrato I, tiene un Incremento Medio Anual del DAP -IMADAP- de 1.74 cm/año, un IMA en altura total de 1.38 m/año, en área basal el IMA de 0.81 m<sup>2</sup>/ha/año y un IMA de volumen total de 7.56 m<sup>3</sup>/ha/año. Con base al IMA del volumen total y con referencia del estudio realizado por Vaides (2004), se puede definir este sitio como un sitio de crecimiento y productividad de clase media a baja.

El estado fitosanitario de la plantación también fue evaluado en cada una de las 76 parcelas muestreadas y todos los árboles de la muestra, no presentaron daños por enfermedades o plagas.

#### **b) ESTRATO II:**

Los datos del estrato II, se analizaron y los resultados se presentan en la tabla de rodal en el cuadro 10, la información dasométrica fue obtenida del 3.63% de la población total, y se agrupó de acuerdo a la clase diametral. En total se midieron 75 árboles, a partir de los cuales se estimó la información de la población por hectárea.

Cuadro 10 Tabla de rodal del estrato II plantación de teca de 15 años de edad, ubicada en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

Clase DAP	Muestra			Hectárea		
	F	G	V	F	G	V
20 a 24	8	0.3538	3.1274	23	1.0108	8.9354
25 a 29	27	1.7629	15.9854	77	5.0369	45.6725
30 a 34	27	2.1699	19.5668	77	6.1997	55.9051
35 a 39	12	1.2127	11.9763	34	3.4650	34.2181
45 a 49	1	0.1627	1.6110	3	0.4649	4.6029
<b>TOTAL</b>	<b>75</b>	<b>5.6620</b>	<b>52.2669</b>	<b>214</b>	<b>16.1772</b>	<b>149.3339</b>

Nota: F: Frecuencia numero de arboles; G: Area basal m<sup>2</sup>; V: Volumen total en m<sup>3</sup>

La tabla de rodal generada agrupa los arboles desde 20 hasta 49 cm de DAP con un rango de análisis total de 49 cm, con el objetivo de poder analizar de una forma adecuada la estructura del bosque. Con la información presentada, en la tabla de rodal del estrato II, la cual es representativa y se pueden hacer inferencias del estado actual del estrato, se observa que el 100% de los arboles poseen diámetro comercial.

Se realizó el análisis para el área total del estrato II; utilizando los datos estimados por hectárea presentados en el cuadro 10. Este procedimiento dio como resultado la información presentada en el cuadro 11, mostrando el potencial total con que cuenta la finca en las variables frecuencia (total de árboles en el estrato), área basal y volumen total.

Cuadro 11. Tabla de rodal proyectada al área total del estrato II, plantación de teca de 15 años de edad ubicada en la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

Clase DAP	Área del Estrato 9.62 Hectáreas		
	F	G	V
15 a 19	0	0	0
20 a 24	220	9.72	85.96
25 a 29	742	48.45	439.37
30 a 34	742	59.65	537.81
35 a 39	330	33.33	329.18
45 a 49	27	4.47	44.28
<b>TOTAL</b>	<b>2061</b>	<b>155.62</b>	<b>1,436.59</b>

Nota: F: Frecuencia numero de arboles; G: Area basal m<sup>2</sup>; V: Volumen total en m<sup>3</sup>

El estrato II posee el 100% de los árboles con diámetro mayor a 20 cm de DAP, que en conjunto hacen un volumen total de 1,436.59 m<sup>3</sup>; significa que en hay una disponibilidad de madera importante en este bosque que puede ser fijada al momento de transformarla en muebles u otros usos industriales, al igual que el estrato anterior.

El análisis de la estructura del rodal presentado en la figura 8; donde se observa claramente una estructura normal característica de los bosques coetáneos o masas forestales regulares, donde la mayor cantidad de individuos tienen diámetros similares

agrupados al centro de la población, encontrando en este caso que el 72% de los árboles se encuentran distribuidos en dos clases diametrales que son de 25 a 29 cm y 30 a 34 cm. Con esta información se puede inferir que el 100% de los individuos tienen más de 20 centímetros de DAP. De acuerdo al INAB (2014), en estos sitios debería esperarse una edad de rotación de 20 años, con los cuales aseguraríamos que el 100% de los árboles formen parte del volumen comercial de la finca.

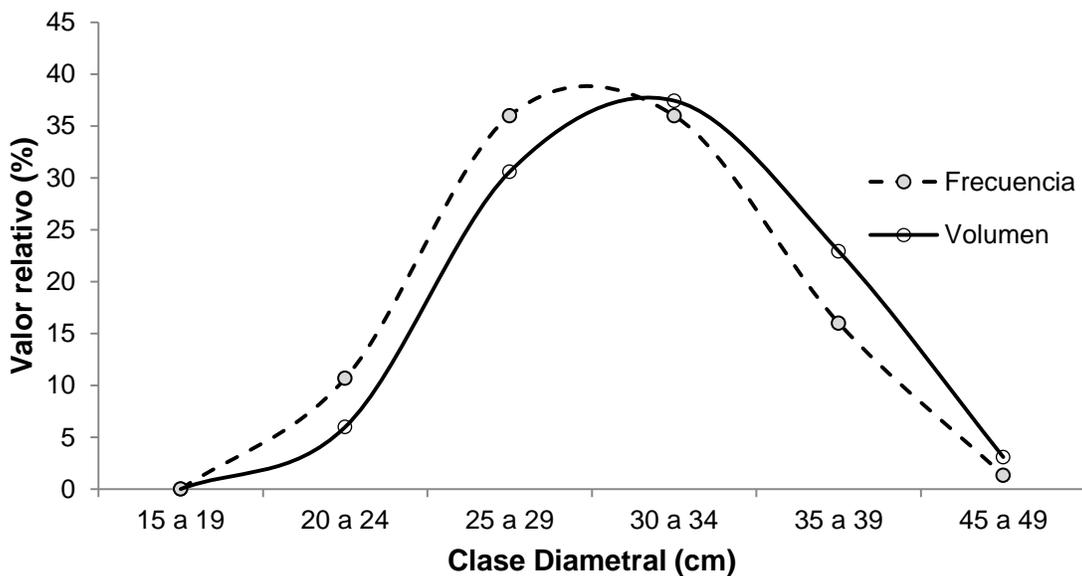


Figura 8. Estructura del rodal de teca de 15 años de edad, estrato II, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Del resultado de las variables cualitativas del estrato, en la figura 9, se muestra un análisis de posición de los árboles en el estrato II; mediante el cual se determinó que el 94.67% de los árboles se encuentran dentro de la clase de posición del dosel intermedio, codominante y dominante; significa que los mismos reciben luz necesaria para realizar fotosíntesis y desarrollarse en diámetro y altura. Además, con estos datos se puede deducir que a la masa forestal se le han realizado tratamientos silviculturales adecuados y a tiempo porque solo cuenta con un 5.33 % de árboles suprimidos.

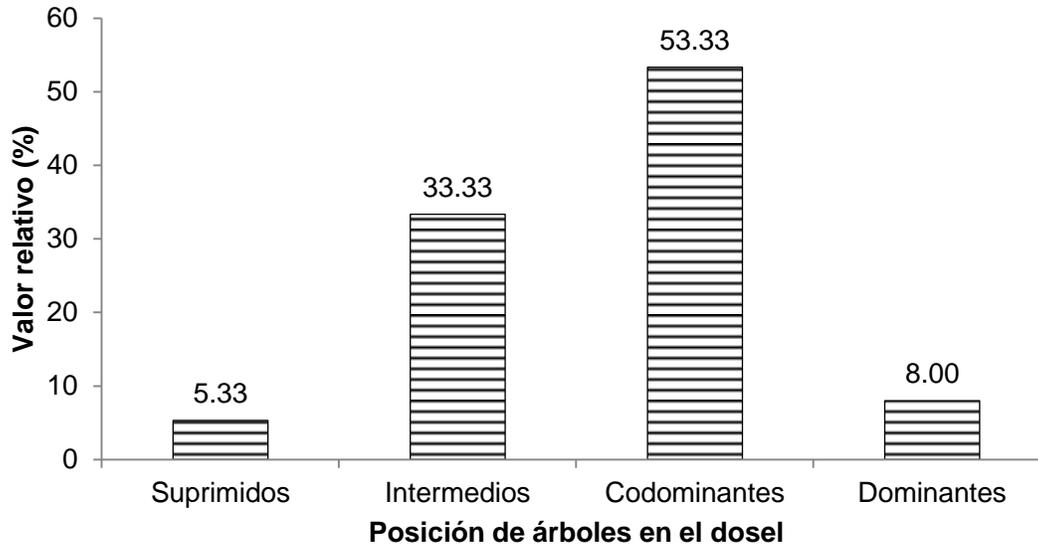


Figura 9. Análisis de la posición de los árboles en el dosel de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

El incremento medio anual de las variables dendrométricas; expresadas en los parámetros de volumen ( $m^3/ha/año$ ) y área basal ( $m^2/ha/año$ ), fueron estimados a partir de la medición de DAP y altura total. La finca Sacuitz, en la plantación de teca de 15 años, del estrato II, tiene un incremento Medio Anual del DAP –IMADAP- de 2.04 cm/año, un IMA en altura total de 1.35 m/año, en área basal el IMA de  $1.07 m^2/ha/año$  y un IMA de volumen total de  $9.95 m^3/ha/año$ . Con base al IMA del volumen total y con referencia al estudio realizado por Mollinedo, *et al.*, (2016). Se puede definir este sitio como un sitio de crecimiento y productividad medio a alto; debido a que definen el rango de productividad de estos sitios entre  $9.89 m^3/ha/año$  a  $17.22 m^3/ha/año$

El estado fitosanitario de la plantación también fue evaluado en cada una de las parcelas muestreadas y todos los árboles de la muestra, no presentaron daños por enfermedades o insectos.

## **6.2 EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE DENSIDAD Y FACTOR DE CONVERSIÓN DE BIOMASA A CARBONO**

Se tumbaron 20 árboles de teca a los cuales se les midieron directamente las variables siguientes: altura del tocón, altura total, diámetro a la altura del pecho, diámetro de copa, peso fresco de hojas, peso fresco de ramas y peso fresco de ramillas. Los resultados son los siguientes:

En el anexo 7, se muestran los resultados de la medición directa, realizada a árboles de teca que fueron tumbados; la muestra fue de 10 árboles de 14 años de edad y 10 árboles de 15 años de edad, que hacen el total de la muestra de 20 árboles. En la evaluación se encontró un rango entre el DAP menor de 25.26 centímetros, que corresponde a un árbol ubicado en la edad de 14 años y el DAP mayor de 39.15, que corresponde a un árbol con 15 años de edad. Se puede observar en este mismo cuadro, que la edad no tiene relación directamente con el tamaño de la copa de los árboles.

### **6.2.1 Cálculo de la Densidad específica de la madera de teca**

En el anexo 8 se presentan los resultados del proceso de secado de las muestras al horno en el laboratorio de la Universidad Rafael Landívar durante 96 horas, los mismos se utilizaron para realizar el cálculo de la densidad de la madera de teca dando como resultado 0.57 g/cc.

### **6.2.2 Estimación de biomasa de cada componente arbóreo por encima del suelo**

La información presentada en el anexo 9, muestra el peso de cada componente arbóreo al momento de la muestra; se determinó que la muestra que mayor peso fresco poseía era la de las ramas. Esta información en conjunto con la del volumen del fuste, se utilizó para calcular la biomasa de los 20 árboles de la muestra, presentando los resultados en el anexo 10.

Se realizó el análisis del contenido de biomasa en los árboles, a través de la figura 10 se observa que el fuste es el componente vegetal por encima del suelo que mayor cantidad de biomasa almacena, mientras que la estructura vegetal que menor biomasa tiene almacenada son las hojas, a pesar que estas tienen función imprescindible y especializada en el proceso de fotosíntesis.

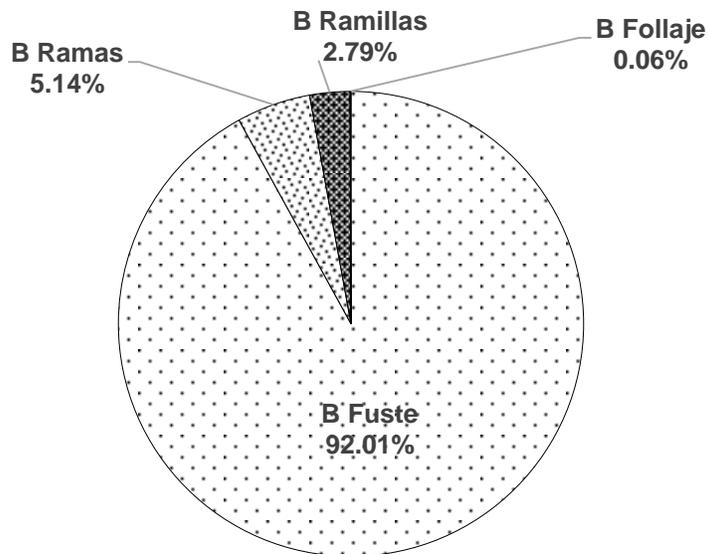


Figura 10 Porcentaje de biomasa contenida en la estructura aérea de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

### 6.2.3 Análisis de correlación de los componentes arbóreos a través de gráficas de dispersión

Se analizó la relación entre DAP y la biomasa del fuste, representada en la figura 11 una relación lineal simple la que mejor se ajusta debido a que muestra un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.7719 indicando que el 77.19% de los datos se encuentran representados en el modelo, lo que significa que existe más del 50% de certeza utilizando el DAP con la regresión lineal por lo tanto las inferencias son más cercanas a la realidad.

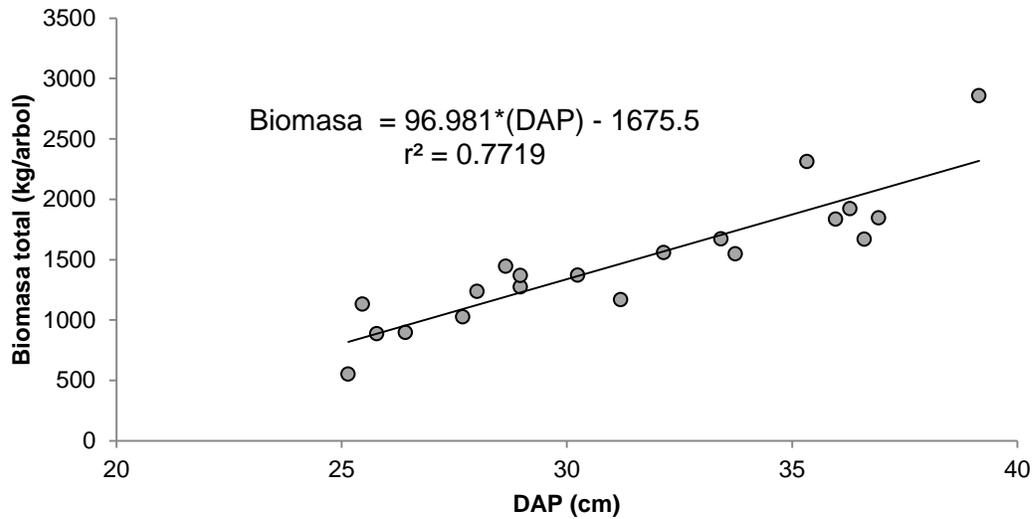


Figura 11 Diagrama de relación lineal con DAP (cm) como variable regresora.

Se realizó el análisis entre altura total y biomasa del fuste; representado en la figura 12 una relación potencial, la que mejor se ajusta con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.5537 indicando que el 55.37% de los datos se encuentran representados en el modelo.

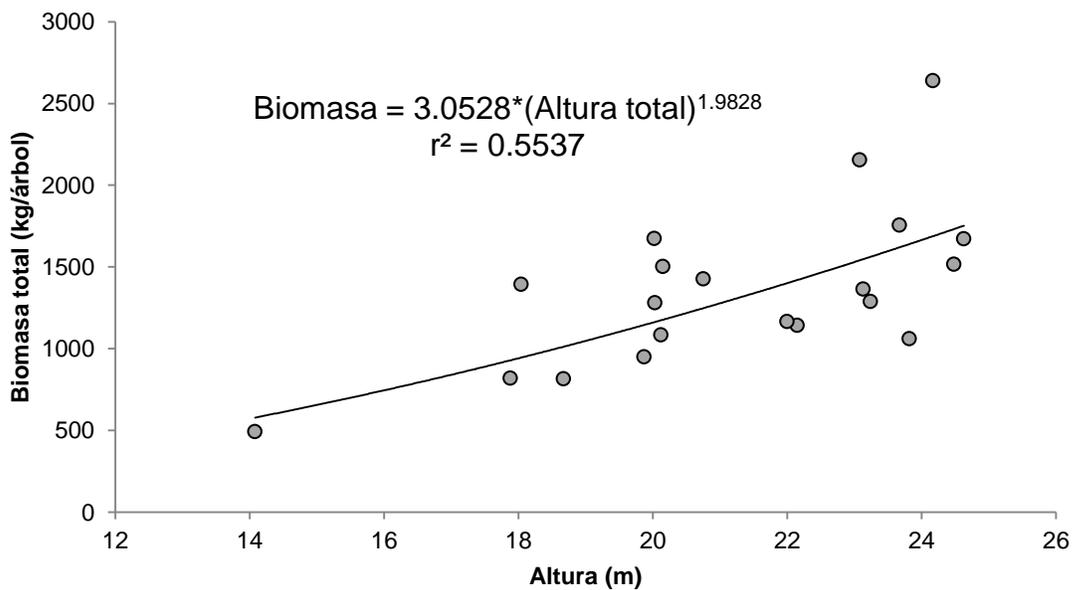


Figura 12 Diagrama de relación potencial con altura como variable regresora.

Se realizó el análisis entre diámetro de copa y biomasa del fuste; representado en la figura 13 una relación exponencial la que mejor se ajusta con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0.497 indicando que el 49.7% de los datos se encuentran representados en el modelo.

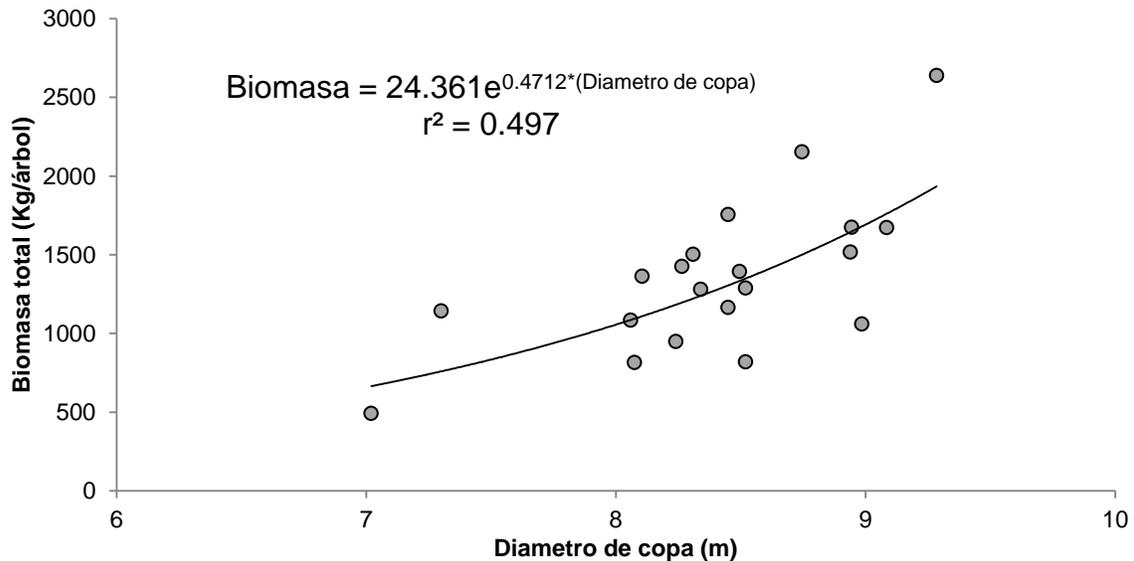


Figura 13 Diagrama de relación exponencial con diámetro de copa como variable regresora.

A través de los resultados del análisis de dispersión se puede definir que el DAP es la variable que mejor predice la biomasa total a través de relación lineal, la segunda variable que mejor se ajusta para predecir biomasa total es la de altura total con relación potencial y el diámetro de copa es la variable que menor representación tiene para la predicción de biomasa total con un  $r^2$  de 0.49.

#### 6.2.4 Determinación del factor de expansión de la biomasa

El factor de expansión de la biomasa dio como resultado 1.088; se realizó con base a los resultados presentados en el anexo 10. El factor de expansión se utiliza para estimar a partir del volumen del fuste, la cantidad de biomasa extra que tiene el árbol por sus componentes de ramas, ramillas y hojas.

En la figura 14 se presentan los 3 gráficos de dispersión con las variables evaluadas, con el fin de identificar si estas tienen alguna relación con respecto del factor de expansión. Se observa que el diámetro a la altura del pecho no influye claramente con el factor de expansión, es decir que el árbol con menor diámetro (25.26 centímetros), no registra precisamente el menor factor de expansión ni el mayor DAP presenta un mayor índice.

Para las otras dos variables (altura total y diámetro de copa) sigue sin existir una clara tendencia de la relación con el factor de expansión, solo hay diferencias entre los valores menores de estas variables. (Figura 14)

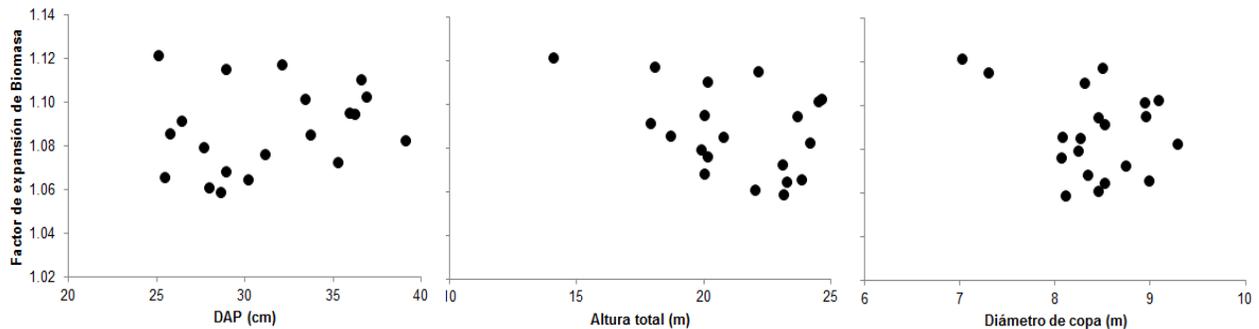


Figura 14 Análisis de dispersión de las variables. Diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetro de copa respecto a factor de expansión de biomasa de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Estos análisis permiten definir que el factor de expansión no se puede predecir de una forma adecuada a partir de un modelo, dejándolo como fijo, para multiplicarlo después de estimar la biomasa del fuste a partir de algún modelo. Estas mismas tendencias de los resultados las obtuvo Pacay y Sagüi (2011) en las evaluaciones con *Pinus tecunumanii* y *Juglans olanchana*.

### 6.2.5 Análisis de correlación de Pearson

Se realizó correlación de Pearson a través de Infostat para la comprobación de las hipótesis donde la toma de decisión fue la siguiente: para hipótesis nula ( $H_0$ ); si el nivel

de probabilidad es mayor a 0.05 no hay correlación entre las variables DAP, altura total y diámetro de copa con la biomasa del fuste; para hipótesis alternativa ( $H_a$ ) si el nivel de probabilidad es menor a 0.05 si hay correlación entre las variables con la biomasa del fuste. Las variables evaluadas presentaron alta correlación con la biomasa del fuste porque los resultados se encuentran arriba del 50%. La variable que presento mayor correlación fue la de DAP con 0.8786 los resultados se presentan en el anexo 11.

### **6.2.6 Determinación del modelo matemático**

A través del programa estadístico InfoStat se probaron distintos modelos matemáticos a través del análisis Stepwise (paso a paso), buscando obtener una ecuación con  $r^2$  ajustada más cercana a 1. Los resultados de este análisis se detallan a continuación.

Se generó el primer modelo matemático para la estimación de biomasa aérea a través de regresión lineal y regresión polinómica tomando en cuenta los 20 árboles muestreados; utilizando como variables regresoras el DAP, altura total y diámetro de copa; dando como resultado  $r^2$  ajustada de 0.8181. Analizando el gráfico de predichos y Residuos estudentizados de esta regresión, el modelo matemático resultante no tomaba en cuenta el árbol numero 20 (ver en anexo 12), dejándolo fuera de los límites de confianza del gráfico, por lo que se tomó la decisión de excluirlo de la muestra para mejorar el modelo matemático.

Utilizando InfoStat con base a la nueva muestra, se creó un segundo modelo matemático a través de regresión lineal y polinómica seleccionando el DAP, altura total y diámetro de copa como variables regresoras o independientes dio como resultado un mejor modelo con una  $r^2$  ajustada de 0.8266; significa que existe un 82.66% de probabilidad que los datos predichos sean reales. Al igual que el caso anterior, queda fuera de los límites de confianza de la predicción del modelo, el árbol número 13 (ver en anexo 13), tomando la decisión de excluirlo para mejorar el modelo.

Se generó un tercer modelo matemático con 18 árboles seleccionados por el sistema InfoStat como variables regresoras se utilizó DAP y altura total debido a que eran las

únicas variables que los modelos anteriores retenían. Con regresión lineal y polinómica los resultados fueron similares; inclusive con regresión polinómica en segundo grado los polinomios no tenían ningún tipo de ajuste por lo que la regresión se mantenía lineal. Se presenta en el cuadro 12 el modelo matemático con  $r^2$  Ajustada de 0.89, lo que significa que el 89.42% de los datos se encuentran representados en el modelo. La constante o intercepto es de -1,594.7707 la pendiente de la variable regresora DAP es 62.5925 con valor de “p” de <0.0001 y la pendiente de la variable regresora altura total (Ht) es 44.0475 con valor de “p” de 0.0008, siendo las dos menores a 0.05.

Cuadro 12 Variables y modelo matemático generado para estimación de biomasa aérea en árboles de teca.

Método de selección en InfoStat	Variable dependiente	Constante o Intercepto	Pendiente por variable	Valor de P
Stepwise	Biomasa del fuste	-1,594.77	DAP = 62.5925 Ht= 44.0475	<0.0001 0.0008

Modelo matemático:

$$Bf = -1,594.7707 + 62.5925(DAP) + 44.0475(Ht)$$

Nota: DAP: diámetro a la altura del pecho en cm; Ht: altura total del árbol en m; Bf: biomasa total del fuste en kg.

### 6.2.7 Evaluación de supuestos del modelo

Se elaboró el diagrama de dispersión entre los residuos estudentizados de la biomasa del fuste y los predichos del modelo obteniendo los resultados que se muestran en la figura 15.

En la figura 15 se puede observar que al realizar la gráfica entre los residuos estudentizados de la biomasa del fuste versus los predichos del modelo matemático para la estimación de biomasa del fuste  $Bf = -1,594.7707 + 62.5925(DAP) + 44.0475(Ht)$  la dispersión de los puntos no muestran ningún patrón por lo tanto es aleatoria y cumple el supuesto de homocedasticidad donde indica que debe haber homogeneidad en las varianzas de los residuos del modelo.

A través de este resultado se valida estadísticamente la confiabilidad del modelo generado por que supone homogeneidad constante en las varianzas de los residuos de cada variable independiente del modelo matemático generado. Además los 18 valores de la muestra quedan dentro del rango de los límites de confianza del modelo generado, con una probabilidad de 0.05 y un  $r^2$  ajustado de 0.89

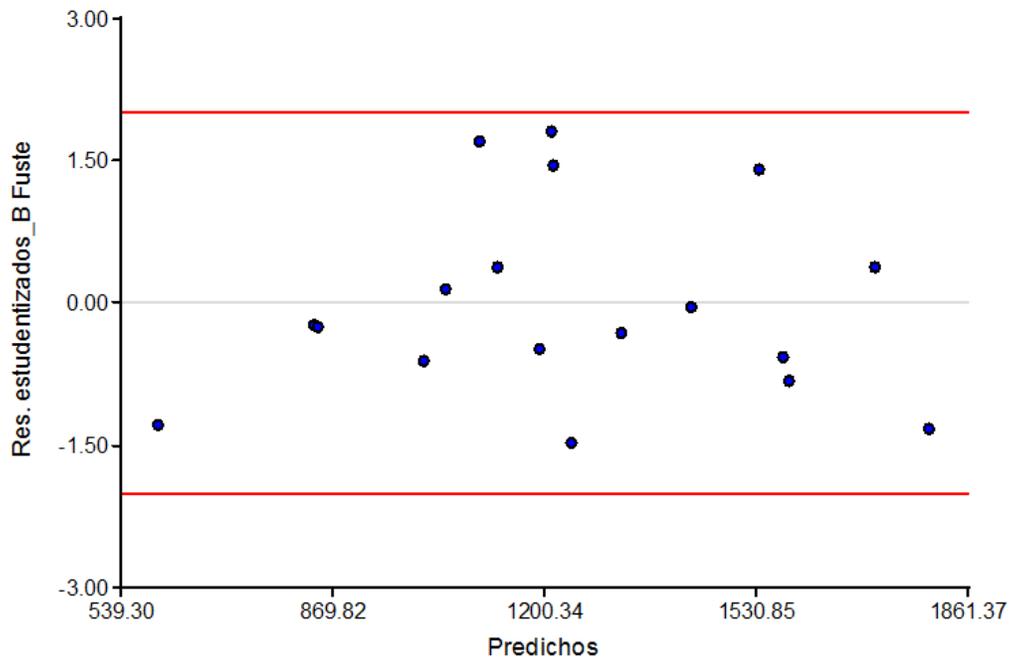


Figura 15 Gráfica de homocedasticidad del modelo matemático generado para la estimación de biomasa aérea en teca.

Se realizó la estimación de la biomasa aérea de la muestra, utilizando el modelo matemático específico generado para teca, pero se determinó que el mismo presentaba un error específicamente en el cálculo de la biomasa en diámetros menores, a través de un gráfico de dispersión (anexo 15) se analizó y determino que el modelo es funcional específicamente para árboles >16 cm de DAP; Por lo tanto fue necesario cuantificar el carbono para los árboles <16 cm de DAP a través de la formula general utilizando como base el factor de corrección; densidad en  $\text{kg/m}^3$ .

Para determinar el factor de corrección se tomó como base la densidad específica de la madera de teca 0.57 g/cc y a través de estequiometría se hizo la relación de g/cc a kg/m<sup>3</sup> resultando 570 kg/m<sup>3</sup> este factor fue aplicado al volumen de todos los árboles que presentaron DAP <16 cm. (Anexo 16)

### **6.2.7 Factor de conversión de biomasa a carbono**

En el anexo 17 se presentan los resultados del análisis de Carbono-Nitrógeno realizado en laboratorio, se determinó que el factor de conversión de la biomasa a carbono es de 0.5311 significa que de la biomasa total 53.11% corresponde a carbono. El factor específico utilizado generalmente para la determinación de carbono aéreo y utilizado también por Valenzuela (2001), es de 0.5 tonelada de Carbono por 1 tonelada de biomasa fresca, específicamente para teca este factor es bajo debido a que existe una diferencia de 3.11%, repercutiendo directamente en los resultados cuando se realizan evaluaciones en grandes extensiones.

## **6.3 CUANTIFICACIÓN DE CARBONO FIJADO Y CAPTURADO ANUALMENTE**

### **6.3.1 Carbono fijado en las plantaciones de teca**

Los resultados de la cuantificación del stock de carbono almacenado y la proyección de captura anual en las 161.2 ha de plantación de teca, se analizan y discuten por cada uno de los estratos, que tienen edad de 14 y 15 años respectivamente.

#### **a) ESTRATO I:**

La cuantificación de carbono fue realizado por separado, con el objetivo de determinar la media anual almacenada por cada uno de los estratos en el cuadro 13 se presentan los resultados de carbono almacenado en la muestra del inventario forestal y proyectado por hectárea.

La tabla generada para el estrato I agrupa a los arboles desde 5 hasta 44 cm de DAP; a los mismos se les cuantifico la cantidad de biomasa y carbono almacenado, tomando en cuenta cada una de las estructuras por encima del suelo. Dando como resultado 204.02 toneladas por hectárea -t/ha- de biomasa total y 108.35 toneladas de Carbono por hectárea -t C/ha-. El resultado se encuentra cercano a lo que indica Federici, *et al.*, (2015).

Cuadro 13 Carbono aéreo en el estrato I de la plantación de teca de 14 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	MUESTRA			HECTAREA		
	Frecuencia	Btotal (kg)	Carbono (kg)	Frecuencia	Btotal (kg)	Carbono (kg)
05 a 09	29	513.8879	272.9258	8	135.2337	71.8226
10 a 14	55	2880.9196	1530.0564	14	758.1368	402.6464
15 a 19	95	26851.2422	14260.6947	25	7066.1164	3752.8144
20 a 24	250	182735.3470	97050.7427	66	48088.2492	25539.6692
25 a 29	298	340629.0495	180908.0882	78	89639.2236	47607.3916
30 a 34	114	171891.5292	91291.5911	30	45234.6130	24024.1029
35 a 39	22	40307.8296	21407.4883	6	10607.3236	5633.5496
40 a 44	4	9483.2315	5036.5442	1	2495.5873	1325.4064
TOTAL	867	775,293.0368	411,758.1318	228	204,024.4834	108,357.4031

Nota: Btotal: Biomasa total

Se realizó la estimación para el área total del estrato I; utilizando los datos proyectados por hectárea (cuadro 13). El análisis dio como resultado la información mostrada en el cuadro 14 en donde se presenta información sobre biomasa total y carbono almacenado en la plantación de teca de 14 años de edad en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Cuadro 14 Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato I de la plantación de teca de 14 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	F	Estrato I	
		Btotal (kg)	Carbono (kg)
05 a 09	1157	20,498.7179	10,886.8691
10 a 14	2194	114,918.3687	61,033.1456
15 a 19	3790	1,071,081.9216	568,851.6086
20 a 24	9972	7,289,216.8147	3,871,303.0503
25 a 29	11887	13,587,513.5070	7,216,328.4236
30 a 34	4547	6,856,662.6325	3,641,573.5241
35 a 39	878	1,607,858.1099	853,933.4422
40 a 44	160	378,281.1161	200,905.1007
<b>TOTAL</b>	<b>34,584</b>	<b>30,926,031.1883</b>	<b>16,424,815.1641</b>

Nota: Btotal: Biomasa total

El estrato I está compuesto por una área de 151. 58 ha, en las cuales hay almacenadas por encima del suelo 30,926.0311 toneladas de biomasa y 16,424.8151 toneladas de carbono. La clase diametral que mayor cantidad de carbono almacenado posee es la de 25 a 29 cm de DAP, conteniendo un total de 7, 216.32 t C.

#### **b) ESTRATO II:**

El estrato II está compuesto por árboles de teca de 15 años de edad; el diámetro menor que poseían los árboles del presente estrato era de 20 cm, por lo tanto el modelo matemático generado es funcional para la cuantificación de la biomasa total por encima del suelo.

En el cuadro 15 se agrupan los árboles de 20 a 49 cm de DAP con un promedio de 214 árboles por ha.

Cuadro 15 Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato II de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

CLASE DAP	MUESTRA			HECTAREA		
	Frecuencia	Btotal (kg)	Carbono (kg)	Frecuencia	Btotal (kg)	Carbono (kg)
20 a 24	8	6523.5637	3464.6647	23	18638.7534	9899.0420
25 a 29	27	31940.2530	16963.4684	77	91257.8658	48467.0525
30 a 34	27	37777.7119	20063.7428	77	107936.3197	57324.9794
35 a 39	12	21091.7060	11201.8051	34	60262.0171	32005.1573
45 a 49	1	2419.0295	1284.7466	3	6911.5128	3670.7045
<b>TOTAL</b>	<b>75</b>	<b>99,752.2641</b>	<b>52,978.4275</b>	<b>214</b>	<b>285,006.4689</b>	<b>151,366.9356</b>

Nota: Btotal: Biomasa total

En el cuadro anterior a través del modelo matemático específico para teca, se cuantifico la biomasa total por encima del suelo y a través de la muestra se proyectó la totalidad de cada una de las variables por hectárea; el resultado fue de 285.0064 t/ha de biomasa por encima del suelo y 151.3669 t C/ha. Con la presente tabla (cuadro 16) se realizó la comparación con la tabla 13 del estrato I y se determinó que existe una diferencia de 43.01 t C/ha entre cada estrato. Por lo tanto se puede inferir que a mayor tiempo de establecida la plantación forestal la capacidad de ganancia de biomasa y captura de carbono es mayor.

Cuadro 16 Biomasa total por encima del suelo y carbono aéreo en el estrato II de la plantación de teca de 15 años de edad, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

CLASE DAP	Frecuencia	ESTRATO II	
		Btotal (kg)	Carbono (kg)
20 a 24	220	179,304.8082	95,228.7836
25 a 29	742	877,900.6687	466,253.0451
30 a 34	742	1,038,347.3955	551,466.3018
35 a 39	330	579,720.6049	307,889.6133
45 a 49	27	66,488.7533	35,312.1769
<b>TOTAL</b>	<b>2061</b>	<b>2,741,762.2306</b>	<b>1,456,149.9207</b>

Nota: Btotal: Biomasa total

El estrato II está conformado por una área de 9.62 ha, en las cuales hay almacenadas por encima del suelo 2,741.76 toneladas de biomasa y 1,456.15 toneladas de carbono. La clase diametral que mayor cantidad de carbono almacenado posee es la de 30 a 34 cm de DAP con un total de 551.46 t C, no obstante posee la misma cantidad de árboles con la clase diametral que agrupa los árboles de 25 a 29 cm de DAP.

Los dos estratos lo componen 161.2 ha en donde hay almacenadas 33,667.7933 toneladas de biomasa por ende 17,880.9650 toneladas de Carbono. La relación entre biomasa fresca de teca y carbono encontrado para el presente estudio es de 53.11 %. Federici, *et al.*, (2015), indican que la conversión de biomasa seca almacenada en 0.5 toneladas de carbono por tonelada de biomasa fresca.

Con la utilización del modelo matemático específico para teca se estimaron 556.08 t C extras, representando un 3.11% que cuando se utiliza un modelo general. Por lo tanto el cálculo con el modelo específico es acorde a la especie y más preciso.

El estrato I con 14 años de edad anualmente ha capturado en promedio 14.57 toneladas de biomasa encima del suelo por hectárea, 7.74 toneladas de Carbono por hectárea; el IPCC (2011) indica que el incremento medio anual de biomasa para teca es de 8 t/ha/año. El estrato II con edad de 15 años capturó anualmente 19.00 toneladas de biomasa encima del suelo por hectárea por ende 10.10 toneladas de Carbono por hectárea por año. Con el presente análisis se puede inferir que no es constante el almacenamiento de biomasa porque entre los dos estratos existe una diferencia de 4.43 toneladas de biomasa con un año de diferencia. Esta diferencia puede estar basada en la calidad de sitio debido a que en el estrato II hay mejor calidad de sitio y por lo tanto mejor productividad.

Las 17,880.9650 toneladas de Carbono permanecerán almacenadas en el xilema por largo tiempo; teca según De Camino & Morales (2013). Es valiosa e importante en el mercado. Ugalde L. (1997) indica que por su alto valor económico por lo general la madera no es quemada y el Carbono no es liberado nuevamente a la atmosfera.

### **6.3.2 Captura Anual de Carbono.**

Se realizó el cálculo para estimar la cantidad de carbono que almacenara el estrato I y estrato II cada año. Esta deducción se hizo con base al área de cada estrato y al IMA de volumen, específicamente el estrato I tiene un IMA de  $7.56 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$  y el estrato II cuenta con un IMA de  $9.95 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{año}$ .

#### **a) Calculo de captura anual de carbono.**

A través de la fórmula general utilizada por Maser, De Jong & Ricalde, (2000), se estimó cuanto carbono aéreo se estaría capturando o almacenando anualmente. La estimación se realizó con base a los factores de biomasa y carbono encontrados en esta investigación.

El estrato I, está conformado por 151.58 ha de plantación de teca de 14 años de edad. Anualmente se estarán almacenando 378.76 toneladas de Carbono a este estrato, esta información es de utilidad para hacer una aproximación de cuanto carbono será almacenado hasta la cosecha final. Con turno de 20 años el estrato I estará añadiendo a su stock de Carbono almacenando un aproximado de 2,272.56 toneladas para hacer un total de 18,697.3745 toneladas de carbono.

El estrato II cada año estará acopiando en su estructura vegetal aérea la cantidad de 31.64 toneladas de Carbono. Este dato proyectado a un turno de 20 años el estrato II agregara al stock de Carbono almacenado un aproximado de 158.18 toneladas haciendo un total de 1,614.33 toneladas de carbono. En resumen en 20 años los dos estratos habrán capturado de la atmosfera e inmovilizado 20,311.71 toneladas de carbono, siendo este un beneficio para el ambiente y la sociedad debido a que se reduce el gas de efecto invernadero que se encuentra en mayor porcentaje en la atmosfera.

## 7. CONCLUSIONES

La finca Sacuitz, cuenta con un total de 161.2 ha dividida en dos estratos el primero de 151.58 ha y el segundo de 9.62 ha, cuentan con una densidad promedio de 228 y 214 árboles por ha, 105.9 m<sup>3</sup>/ha y 149.3 m<sup>3</sup>/ha de volumen total. El estrato I cuenta con un incremento medio anual de 1.74 cm/año en DAP, 1.38 m/año en altura total, 0.81 m<sup>2</sup>/ha/año de área basal y 7.56 m<sup>3</sup>/ha/año de volumen total; el estrato II ubicado en mejor sitio que el estrato I tiene un incremento medio anual de 2.04 cm/año en DAP, 1.35 m/año en altura total, 1.07 m<sup>2</sup>/ha/año de área basal y 9.95 m<sup>3</sup>/ha/año de volumen total, en las plantaciones el volumen total es de 17,462.36 m<sup>3</sup>.

A través del análisis de laboratorio se evaluó la densidad específica de la madera de teca resultando 0.57 g/cc; el análisis del contenido de carbono de cada estructura vegetal por encima del suelo, estableció que el factor de conversión de biomasa fresca a carbono es de 0.5311. Significa que 1 tonelada de biomasa fresca está compuesta por 53.11% de carbono.

El modelo matemático generado para la estimación de biomasa del fuste específicamente para teca es  $B_f = -1,594.7707 + 62.5925(DAP) + 44.0475(Ht)$ . Posee una probabilidad menor a 0.05 y un valor  $r^2$  ajustado de 0.89.

La finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz tiene fijado en sus dos estratos un total de 17,880.96 toneladas de Carbono. El estrato II tiene mayor carbono aéreo almacenado por hectárea, con un total de 151.36 t C/ha, la diferencia entre cada estrato es de 43.01 t C/ha debido a la mejor calidad de sitio donde se ubica el estrato II y cuenta con un año más de edad. El incremento medio anual en el almacenamiento de Carbono, encontrado para la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz, es 378.76 toneladas de Carbono en las 151.58 ha del estrato I y 31.63 toneladas de Carbono en las 9.62 ha del estrato II. Proyectando a turnos de 20 años, los dos estratos habrán fijado 20,311.71 toneladas de Carbono.

## 8. RECOMENDACIONES

El modelo matemático generado para la estimación de biomasa por encima del suelo, se debe utilizar en árboles de teca (*Tectona grandis* L. f.) que midan más de 16 cm de DAP. Debido a que cuando se utilice el modelo matemático en árboles menores a 16 cm de DAP existe un error en la estimación de la biomasa.

Para la estimación de biomasa total y carbono aéreo en árboles menores a 16 cm de DAP, es necesario utilizar la fórmula general considerando multiplicar el volumen total en  $m^3$  con el factor de corrección basado en la densidad de la madera siendo este  $570 \text{ kg}/m^3$ .

El factor de expansión de la biomasa 1.088 debe multiplicarse con la biomasa del fuste cuando sea necesario conocer la biomasa total; debido que a través del mismo se agrega la biomasa almacenada en las ramas, ramillas y hojas.

Las variables independientes utilizadas para la creación del modelo matemático para estimación de biomasa son DAP y Ht, por lo tanto es necesario realizar mediciones directas a dichas variables dasométricas, cuando se realicen estimaciones de biomasa.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Aceituno, M. (2011). Área de Estadística. (en línea). Guatemala, FIUSAC. Consultado el 27 de 08 de 2015, disponible en: [http://destadistica.ingenieria.usac.edu.gt/index.php?option=com\\_content&view=article&id=48&Itemid=66](http://destadistica.ingenieria.usac.edu.gt/index.php?option=com_content&view=article&id=48&Itemid=66)
- AFM (Authority for the Financial Markets). (2005). Supervision of Investments in Teak Plantations and Other Alternative Investment Opportunities. Financial Information Capitulo 25-7-2005.
- Ávila, G.; Jiménez, F., Beer, J., Gómez, M. & Ibrahim, M. (2001). Almacenamiento, Fijación de Carbono y Valoración de Servicios Ambientales en Sistemas Agroforestales en Costa Rica. Agroforestería en las Américas Vol. 8 N° 30 2001. Avances en Investigación. 4 p.
- Bremer, L., & Farley, K. (2010). Does plantation forestry restore biodiversity or create green deserts? A synthesis of the effects of land-use transitions on plant species richness. Biodiversity Conservation 19: 3893–3915
- Brown, S. (1997). Estimación de Biomasa de los Bosques Tropicales. FAO, Estados Unidos . 55 p.
- Calderón, D., & Solís, D. (2012). Cuantificación del Carbono Almacenado en Tres Fincas en Tres Estados de Desarrollo del Bosque de Pino (*Pinus oocarpa*, L.) Dipilto, Nueva Segovia, Nicaragua. Tesis Ing. Forestal Managua, Nicaragua Universidad Nacional Agraria, 79 p.
- Castellanos, E., Quilo, A., & Mato, R. (2010). Metodología para la Estimación del Contenido de Carbono en Bosques y Sistemas Agroforestales de Guatemala. Guatemala, Guatemala. 24 p.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). (2002). Inventario Forestal para Bosques Latifoliados en América Central. (en línea). Costa Rica. Consultado 04 Noviembre 2015, 264 p. Disponible en: [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/training\\_material/docs/Inventarios Forestales%20 Bosques Latifoliados AC.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/Inventarios_Forestales%20Bosques_Latifoliados_AC.pdf)

- Centro Mario Molina (2012). Que es el Cambio Climático (en línea). Consultado 19 de marzo de 2017, 8 p. Disponible en: <http://centromariomolina.org/wp-content/uploads/2012/05/Qu%C3%A9-es-el-cambio-clim%C3%A1tico.pdf>
- Chavez, W. F. (1991). Informe tecnico No. 179. Teca (Tectona grandis L.f.) Especie de árbol de uso multiple, en America Central. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 54 p.
- CMNUCC. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático (en línea). Nueva York. Consultado el 24 de Agosto de 2015, Disponible en <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
- De Camino, M. & Morales, J. (2013). Las Plantaciones de Teca en América Latina: Mitos y Realidades. Turrialba, Costa Rica CATIE - FAO. 392 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2000). La Teca: Una visión Global. (en línea). Roma. Consultado el 24 de Agosto de 2015, Disponible en <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/X4565S/X4565s02.PDF>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2004). Manual de Campo Modelo para Inventario Forestal Nacional 2002-2003. Guatemala. Programa de Evaluación de Recursos Forestales. 89 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2013). Antología de Conocimiento para la Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales. Recreaciones para Estimación y la Supervisión. 28 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2014). Cambio Climático. (en línea). Roma. Consultado el 30 de Agosto de 2015, de Glosario Técnico. Disponible en <http://www.fao.org/climatechange/65923/es/>
- Federici, S., Tubiello, F., Salvatore, M., Jacobs, H., & Schmidhuber, J. (2015). New Estimates of CO2 Forest Emissions and Removals: In Forest Ecology and Management Editado por Kenneth Mac Dicken 1990–2015. Roma . 89-98 p.
- Finanzas Carbono. (2017). Plataforma sobre Financiamiento Climático para Latino América y el Caribe. (en línea). Consultado el 17 de Marzo de 2017. Disponible en: <http://finanzascarbono.org/nuevos-mecanismos-de-mitigacion/redd/que-es-redd/>
- Fonseca, W. (2004). Manual Para Productores de Teca (Tectona grandis L. f.) en Costa Rica. Heredia, Heredia , Costa Rica. 121 p.

- FRA (Evaluación de Recursos Forestales Mundiales). (2004). Términos y Definiciones. Actualización de la Evaluación en FAO. Roma. 36 p.
- FRA (Evaluación de Recursos Forestales Mundiales). (2015). Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2015. Compendio de datos FAO. Roma, 253 p.
- Fundacion Solar. (2000). Elementos Técnicos para Inventarios de Carbono en Uso del Suelo. (en línea). Guatemala. Consultado 25 de Agosto de 2015. 36 p. Disponible en [http:// www.capas.org](http://www.capas.org)
- García, V., & Sánchez, D. (2009). Estimación de Carbono Contenido en el Bosque Bajo Manejo Forestal del Ejido de Tlamanalco, Estado de Mexico. Tesis Ing. en Recursos Naturales, Ing. en Restauración Forestal. Universidad de Chapingo, Texcoco, Mexico. 133 p.
- Guatecarbón (Proyecto). (2014). Reduced Emissions from Avoided Deforestation in the Multiple Use Zone of the Maya Biosphere Reserve in Guatemala. (en línea). Petén Guatemala. Consultado: 17 de marzo de 2017. Disponible en: <http://guatecarbon.com/el-proyecto/>
- Global, C. c. (2015). Cambio Climatico Global. (en línea) Consultado el 23 de Agosto de 2015, disponible en <http://cambioclimaticoglobal.com/gasesinv>
- Guarin, N. (2002). Estadística Aplicada. (en línea). Medellin, Colombia. Consultado 12 de Octubre de 2015, 201 p. Disponible en: <http://tifon.unalmed.edu.co/~pagudel/estadistica.html>
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente-Universidad Rafael Landívar, IARNA-URL. (2009). Sistema de Contabilidad Ambiental y Economica Integrada de Guatemala. Guatemala Centro America. 45 p.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente-Universidad Rafael Landívar, IARNA-URL. (2012). Compilacion de Investigaciones y Análisis de Coyuntura. Guatemala. 193 p.
- Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente-Universidad Rafael Landívar, IARNA-URL. (2015). Mapa Digital Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra con resolución de 25m por píxel actualizado con áreas protegidas del 2013. Guatemala: Sin publicar

- Imaña, E. & Encinas, O. (2008). Epidimetría Forestal. Universidad de Brasilia, Departamento de Ingeniería Forestal, Brasilia. 72 p.
- Imaña-Encinas, J., Jiménez, J., Rezende, A., Rainier, C., Antunes, O., Serpa de Meria, M., (2014). Conceptos Dasométricos en los inventarios fitosociológicos. Brasilia, Brasil/Linares México. Universidade de Brasilia/Universidad Autónoma de Nuevo León, 82 p.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2014). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal. Guatemala. 62 p.
- Instituto Nacional de Bosques (INAB). (2015). Lineamientos Técnicos de Manejo Forestal. (en línea). Guatemala. 47 p. Consultado el 5 de marzo de 2017, disponible en: [http://www.itto.int/files/itto\\_project\\_db\\_input/2972/Technical/Lineamientos%20Técnicos%20de%20Manejo%20Forestal.pdf](http://www.itto.int/files/itto_project_db_input/2972/Technical/Lineamientos%20Técnicos%20de%20Manejo%20Forestal.pdf)
- Inspiracion. (2009). Cambio Climático. (en línea) Madrid. Consultado el 23 de Agosto de 2015, disponible en [www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/gases-de-efecto-invernadero](http://www.inspiration.org/cambio-climatico/efecto-invernadero/gases-de-efecto-invernadero)
- Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2011). El Cambio Climático. (en línea). Wembley. Consultado el 23 de Agosto de 2015, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático disponible en: <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/synthesis-spm/synthesis-spm-es.pdf>
- Lazcano, H. (2006). Estimación de Secuestro de Carbono para Cuatro Coníferas de la Región de Chignahuapan, Puebla. Tesis Maestría. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. . Mexico.
- Lee, G. (2002). Estudio Preliminar para la Estimación de Biomasa y Cuantificación de Carbono para *Vochysia guatemalensis*, *Calophyllum brasiliense*, *Cybistax donnell-smithii* en bosques naturales de Guatemala. Tesis de Ingeniero Agronomo. Guatemala.
- López, E. (2011). Estadística para Agronomía y Ciencias Forestales. Guatemala. 233 p.
- Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación Guatemala (MAGA) (2002). Sistema de Información Geográfica, Ministerio de Agricultura y Alimentación. (en línea).

- Guatemala. Consultado el 20 de 09 de 2015, disponible en:  
<http://www.sigmaga.com.gt/imagenes/mapas/vegetacion/zonas-de-vida.pdf>
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España (MAGRAMA). (2014). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España. (en línea) Consultado el 23 de 09 de 2015, disponible en:  
<http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mecanismos-de-flexibilidad-y-sumideros/sumideros-de-carbono/>
- Masera, O., de Jong B. y Ricalde I. (2000). Consolidación de la Oficina Mexicana para la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero. Instituto de Ecología Universidad Nacional Autónoma de México-ECOSUR. 197p.
- Mollinedo, M., Herrera, M., & Muñoz, F. (2016). Caracterización del Crecimiento de Plantaciones Jóvenes de Teca (*Tectona grandis* Linn f.) y Estimación de Curvas de Índice de Sitio en el Área Septentrional de la República de Guatemala. (En línea). Madera y bosques. Consultado el 31 de enero de 2017, disponible en:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000200089&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-04712016000200089&script=sci_arttext)
- Ocampo, N. (2014), La fotosíntesis. (en línea). Universidad Autónoma de Hidalgo. Consultado el 18 de Marzo de 2017, disponible en:  
<http://repository.uaeh.edu.mx/bitstream/bitstream/handle/123456789/15794/LECT110.pdf?sequence=1>
- Ordoñez, D. (1999). Captura de Carbono en un Bosque Templado: El Caso de San Juan Nuevo, Michoacán. INE-SEMARNAP. . Mexico. 74 p.
- Pacay, E. (2011). Generación de un Modelo Matemático para la Estimación de Biomasa y Cuantificación de Carbono en la Especie de Nogal (*Juglans olanchana* standl & l. o. williams ), en Bosques Naturales del Corredor Biológico del Bosque Nuboso, en Purulhá, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Ing. Forestal. URL. 102 p.
- PROARCA/CAPAS. (1998). Estimación de la Cantidad de Carbono Almacenado y Captado (masa aérea) por los Bosques de Costa Rica. Costa Rica. 50 p.
- Quilo, A. (2012). “Sistematización de Información Sobre Biomasa y Carbono de la Cobertura Forestal. Guatemala. 12 p.

- Ripley, W., & Venables, B. (1994). Modern Applied Statistics with S-Plus. Springer-Verlag. New York. 157 p.
- Rodriguez, J., & Pratt, L. (1998). Potencial de Carbono y Fijación de Dióxido de carbono de la Biomasa en Pie por Encima del Suelo en los Bosques de Costa Rica. Costa Rica. 69 p.
- Sagüi, N. (2011). Generación de un Modelo Matemático para la Estimación de Biomasa y Carbono para (*Pinus tecunumanii* equiluz & j.p perry), en Bosques Naturales de la Reserva de Biósfera Sierra de las Minas (RBSM), San Jeronimo, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Ing. Forestal. URL. 101 p.
- Schlesinger, W. (1991). Biogeochemistry, an Analysis of Global Change. Academic Press. New York. 187 p.
- Secretaría de Planificación y Progrmación de la Presidencia Guatemala (SEGEPLAN) (2009). Perfil Socio Economico de Chahal Alta Verapaz. (en línea). Guatemala. Consultado el 04 de Septiembre de 2015, Disponible en: [http://sistemas.segeplan.gob.gt/sideplanw/SDPPGDM\\$PRINCIPAL.VISUALIZAR?PID=ECONOMICA\\_PDF\\_1614](http://sistemas.segeplan.gob.gt/sideplanw/SDPPGDM$PRINCIPAL.VISUALIZAR?PID=ECONOMICA_PDF_1614)
- Sistema de Información de Recursos Forestales C.R. (SIREFOR). (2004). Manual para Productores de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Costa Rica. Heredia. 115 p.
- Teobalddelli, M., & Somogyi, Z. (2009). Generalized Functions of Biomass Expansion Factors for Conifers and Broad Leaved by Stand age, Growing Stock and Site Index.
- Tobias, H. (2010). Cartografía de suelos en Guatemala. Cartografía convencional de suelos, Universidad de San Carlos de Guatemala , Rio de Janeiro, Brasil 34 p.
- Trujillo, E. (s.f.). Planeacion para el éxito . *Plantación Forestal*, Costa Rica 29 p.
- Ugalde L. (1997). Resultados de 10 años de Investigación Silvicultural del Proyecto MADELEÑA en Nicaragua. Informe Técnico No. 292. CATIE, Turrialba, Costa Rica 169 p.
- Union Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). (2009). Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación de Bosques Tropicales. (en línea). San José Costa Rica. Consultado el 17 de Septiembre de 2016. Disponible en: [www.uicn.org](http://www.uicn.org)

- United Nations (ONU) (2014). United Nations Framework Convention on Climate Change. (en línea). Consultado el 23 de Agosto de 2015, disponible en: [http://unfccc.int/portal\\_espanol/informacion\\_basica/protocolo\\_de\\_kyoto/items/6215.php](http://unfccc.int/portal_espanol/informacion_basica/protocolo_de_kyoto/items/6215.php)
- United Nations (ONU) (2015). Taking Stock of the Global Partnership for Development.(en línea). Consultado el 19 de marzo de 2017, disponible en: [http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/MDG%20Gap%20Task%20Force%20Report%202015\\_full%20report\\_English.pdf](http://www.un.org/es/millenniumgoals/pdf/MDG%20Gap%20Task%20Force%20Report%202015_full%20report_English.pdf)
- Useros, J. (2012). CLIMATE CHANGE: CAUSES AND ENVIRONMENTAL EFFECTS (en línea). Consultado el 19 de marzo de 2017. Disponible en: <file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Dialnet-EICambioClimatico-4817473.pdf>
- Vaides, E. (2004). Características de Sitio que Determinan el Crecimiento y Productividad de teca (*Tectona grandis* L.f.) en Plantaciones Forestales de Diferentes Regiones en Guatemala. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR, CATIE. 81 p.
- Valenzuela, H. (2001). Estimación de Secuestro de Carbono en Bosques Naturales de Oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. Tesis Licenciatura. División de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Mexico.
- Vásquez, V. (2008). Estimación del Contenido de Carbono en Biomasa Aérea del Bosque Comunal, Cantón Paqui, Totonicapán. Tesis para optar a título de Ing. Agronomo. Quetzaltenango.
- Walker, W. (2011). Guia de Campo para la Estimación de Biomasa y Carbono Forestal. Massachusetts, USA. 49 p.
- Winrock International (2012). Tree Biomass Destructive Harvesting Calculation Tool. (en línea). Winrock International's Destructive Harvest Data Entry Tool-Versión 2012. Consultado el 2 de abril de 2017 Disponible: en <https://translate.google.com.gt/translate?hl=es&sl=en&u=https://www.winrock.org/&prev=search>

## 10. ANEXOS

Anexo 1. Boleta de campo utilizada en el inventario forestal.

No. Parcela: \_\_\_\_\_ No. Cuadrilla: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_  
Topografía: \_\_\_\_\_ Nombre del encargado: \_\_\_\_\_

No.	DAP	ALTURA TOTAL	POSICION	FORMA	OBSERVACIONES
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					
21					
22					
23					
24					
25					
26					
27					
28					
29					
30					

COMENTARIOS: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Anexo 2. Boleta utilizada para la toma de variables dasométricas, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.

Nombre recolector: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

No.	DAP (cm)	ALTURA (m)	DIAMETRO DE LA COPA (m)	OBSERVACIONES
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

COMENTARIOS: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Anexo 3. Boleta utilizada para la evaluación del peso fresco de los componentes diferentes al fuste, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.

Nombre recolector: \_\_\_\_\_ Fecha: \_\_\_\_\_

<b>PESO FRESCO EN KG.</b>					
<b>No.</b>	<b>DAP (cm)</b>	<b>HOJAS</b>	<b>RAMAS</b>	<b>RAMILLAS</b>	<b>TOTALES</b>
1					
2					
3					
4					
5					
6					
7					
8					
9					
10					
11					
12					
13					
14					
15					
16					
17					
18					
19					
20					

COMENTARIOS: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Anexo 4. Formato de la base de datos utilizada, para el vaciado de la información de biomasa, de los árboles que forman parte de la muestra en campo.

No.	DAP (cm)	ALTURA (m)	DIAMETRO DE LA COPA (m)	BIOMASA HOJAS	BIOMASA RAMAS	BIOMASA RAMILLAS	BIOMASA FUSTE	BIOMASA TOTALES
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								
12								
13								
14								
15								
16								
17								
18								
19								
20								

COMENTARIOS:

---



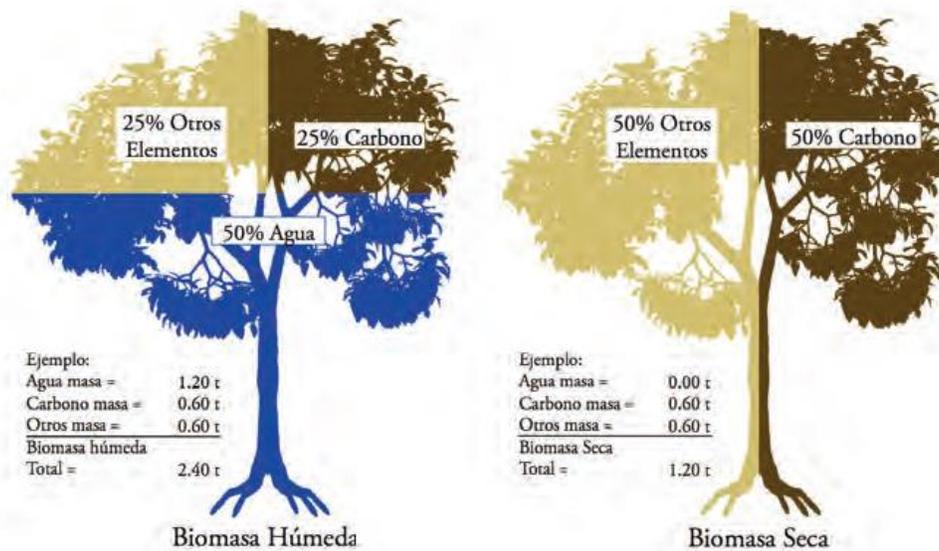
---



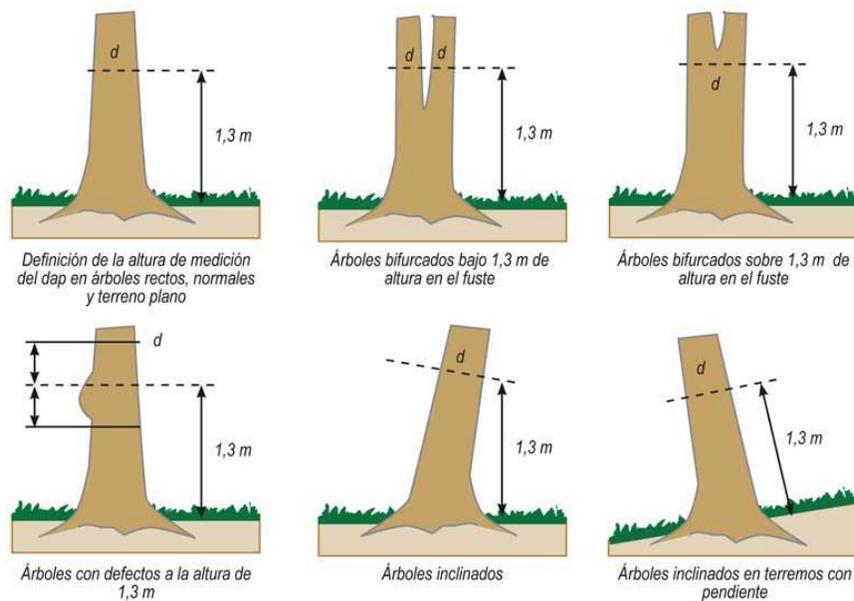
---

Anexo 5. Gráficos de las proporciones teóricas de contenido de carbono y formas de medir el DAP en las evaluaciones en campo.

La proporción relativa de carbono (C), Agua (H<sub>2</sub>O), y otros elementos (N, P, K, Ca, Mg, etc.) contenida en la biomasa (a) húmeda y (b) seca de los árboles.



Fuente: (Walker, 2011)



Fuente: (Walker, 2011)

Anexo 6. Formato de las etiquetas utilizadas para las muestras que se llevaron a laboratorio.

MUESTRA No. \_\_\_\_\_

FECHA

--	--	--

1. USUARIO O EMPRESA \_\_\_\_\_ CORREO ELECTRONICO \_\_\_\_\_

2. PERSONA QUE TOMA LA MUESTRA \_\_\_\_\_ TEL: \_\_\_\_\_ CORREO ELECTRONICO \_\_\_\_\_

3. PROCEDENCIA DE LA MUESTRA,  
(Dpto.): \_\_\_\_\_ Municipio \_\_\_\_\_

4. CORDENADAS: X \_\_\_\_\_ Y \_\_\_\_\_ Cultivo: \_\_\_\_\_

5. PARTE A EVALUAR DE LA PLANTA: Semilla \_\_\_\_\_ Raíz \_\_\_\_\_ Tallo \_\_\_\_\_ Ramas \_\_\_\_\_ Hojas \_\_\_\_\_ Flores \_\_\_\_\_  
Frutos \_\_\_\_\_

6. FACTORES ABIOTICOS; Inundación \_\_\_\_\_ Sequía \_\_\_\_\_ Heladas \_\_\_\_\_ Viento \_\_\_\_\_ Granizo \_\_\_\_\_  
Otro \_\_\_\_\_

Especifique:

7. Tipo de análisis: Carbono: \_\_\_\_\_ Nitrógeno: \_\_\_\_\_ Fitopatológico: \_\_\_\_\_ Bacteriológico: \_\_\_\_\_  
Acarológico: \_\_\_\_\_

OBSERVACIONES: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Nombre de Receptor

Nombre Enterante

Anexo 7. Resultado de la medición de las variables morfométricas a un total de 20 árboles de teca con edades de catorce y quince años, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Árbol No.	DAP (cm)	Altura (m)	Diámetro de Copa (m)	Observaciones (edad)
1	32.15	18.04	8.50	14 años
2	25.46	23.82	8.99	14 años
3	28.97	22.15	7.30	14 años
4	28.01	22.00	8.45	14 años
5	28.97	20.03	8.34	14 años
6	27.69	19.87	8.24	14 años
7	28.65	23.13	8.11	14 años
8	31.19	20.12	8.06	14 años
9	30.24	23.24	8.52	14 años
10	33.42	24.48	8.94	14 años
11	25.78	18.67	8.08	15 años
12	36.61	20.15	8.31	15 años
13	35.33	23.08	8.75	15 años
14	25.15	14.08	7.02	15 años
15	26.42	17.88	8.52	15 años
16	33.74	20.75	8.27	15 años
17	36.92	24.63	9.09	15 años
18	36.29	23.67	8.45	15 años
19	35.97	20.02	8.95	15 años
20	39.15	24.17	9.29	15 años

Anexo 8 Promedios obtenidos de las 20 muestras del fuste de los árboles de teca, de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

Código de la muestra	Volumen (cc)	Peso Húmedo (g)	Peso 24 hrs (g)	Peso 48 hrs (g)	Peso 72 hrs (g)	Peso 96 hrs (g)	Temperatura del Horno	Densidad Especifica (g/cc)
Bajo	2253	2438.05	1897.5	1501.4	1360.78	1360.78	80 °c	0.60
Medio	1163	1077.28	896.4	698.2	680.38	680.38	80 °c	0.59
Alto	503	457.3	389.6	287.8	265.1	265.1	80 °c	0.53

Anexo 9 Peso fresco en Kilogramos de cada componente de los 20 árboles de teca tumbados y medidos en finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

No.	DAP (cm)	Hojas (kg)	Ramas (kg)	Ramillas (kg)	Edad (años)
1	32.15	2.7216	187.3339	75.7500	14
2	25.46	1.8144	64.8638	46.2665	14
3	28.97	1.8144	80.7395	128.8204	14
4	28.01	0.2268	85.7291	29.4835	14
5	28.97	0.6804	106.5943	34.9267	14
6	27.69	1.1340	90.2650	31.0711	14
7	28.65	1.3608	94.3473	34.6999	14
8	31.19	1.9051	92.3062	40.3698	14
9	30.24	3.1752	85.2755	47.4005	14
10	33.42	1.3608	166.4686	82.1003	14
11	25.78	0.4536	70.3069	42.6377	15
12	36.61	1.0433	182.7979	85.5023	15
13	35.33	1.1340	174.6333	78.4716	15
14	25.15	2.0412	66.9050	28.5764	15
15	26.42	2.2680	75.2964	44.2253	15
16	33.74	2.7216	119.2949	74.8428	15
17	36.92	1.7237	185.5195	91.1722	15
18	36.29	3.6287	183.7051	82.7807	15
19	35.97	1.5876	183.7051	74.1624	15
20	39.15	2.7216	196.6325	153.7680	15

Anexo 10 Biomasa y factor de expansión estimados por componente vegetal encima del suelo; finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz

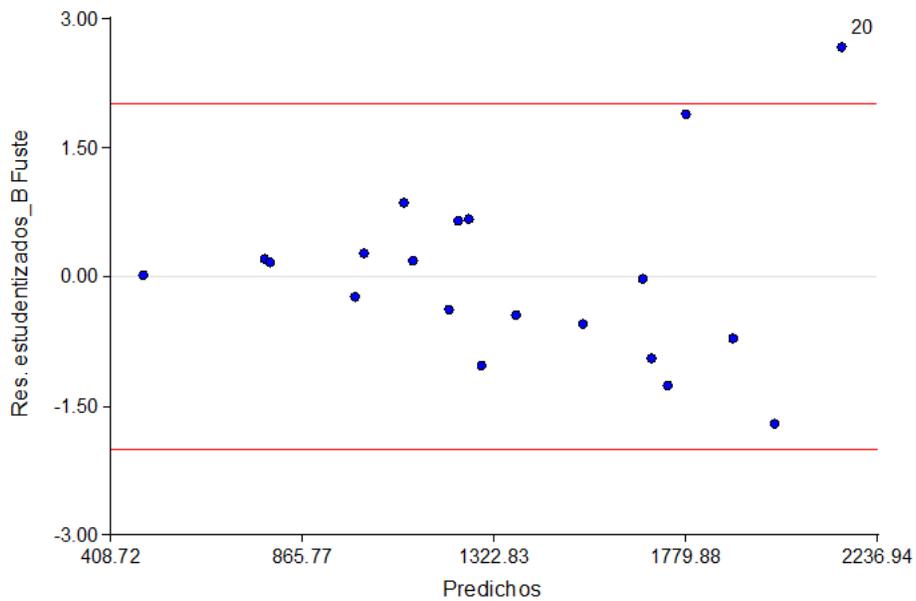
Árbol No.	DAP (cm)	Hojas	BIOMASA (kg)			Biomasa Total (kg/árbol)	Factor Expansión de Biomasa
			Ramas	Ramillas	Fuste		
1	32.15	1.4685	114.1711	47.8451	1393.7894	1557.2741	1.1173
2	25.46	0.9790	39.5314	29.2228	1061.6127	1131.3459	1.0657
3	28.97	0.9790	49.2069	81.3654	1142.6441	1274.1954	1.1151
4	28.01	0.1224	52.2478	18.6224	1165.9594	1236.9519	1.0609
5	28.97	0.3671	64.9642	22.0603	1281.0297	1368.4214	1.0682
6	27.69	0.6119	55.0122	19.6251	949.6064	1024.8556	1.0792
7	28.65	0.7342	57.5002	21.9171	1364.7031	1444.8546	1.0587
8	31.19	1.0279	56.2562	25.4983	1085.7541	1168.5366	1.0762
9	30.24	1.7132	51.9714	29.9390	1288.6255	1372.2491	1.0649
10	33.42	0.7342	101.4547	51.8561	1517.5198	1671.5649	1.1015
11	25.78	0.2447	42.8487	26.9308	816.9862	887.0104	1.0857
12	36.61	0.5629	111.4067	54.0048	1503.4547	1669.4291	1.1104
13	35.33	0.6119	106.4307	49.5641	2154.9495	2311.5562	1.0727
14	25.15	1.1014	40.7754	18.0494	492.8174	552.7436	1.1216
15	26.42	1.2237	45.8896	27.9335	820.4586	895.5054	1.0915
16	33.74	1.4685	72.7046	47.2721	1426.5595	1548.0048	1.0851
17	36.92	0.9300	113.0654	57.5861	1673.3935	1844.9750	1.1025
18	36.29	1.9580	111.9596	52.2858	1756.0479	1922.2513	1.0946
19	35.97	0.8566	111.9596	46.8424	1675.0909	1834.7495	1.0953
20	39.15	1.4685	119.8382	97.1228	2639.9699	2858.3993	1.0827

1.088

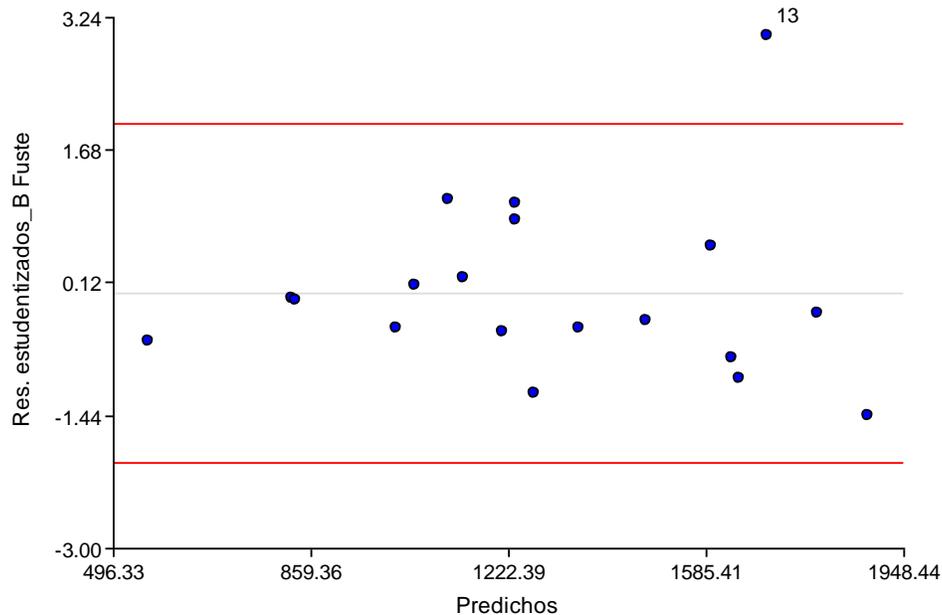
Anexo 11 Resultados de correlación de Pearson realizado a través de Infostat

	DAP	Altura	DC	B Fuste
DAP	1	0.0332	0.0114	<0.001
Altura	0.4776	1	0.0036	0.0022
DC	0.5535	0.6195	1	0.0013
B Fuste	0.8786	0.6442	0.6678	1

Anexo 12 Gráfico resultante del análisis de regresión lineal obtenido de las 20 muestras de los árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.



Anexo 13 Gráfico resultante del análisis de regresión lineal obtenido de las 19 muestras de árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.



Anexo 14 Resultado del análisis de regresión lineal aplicado a 18 muestras de árboles de teca de la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

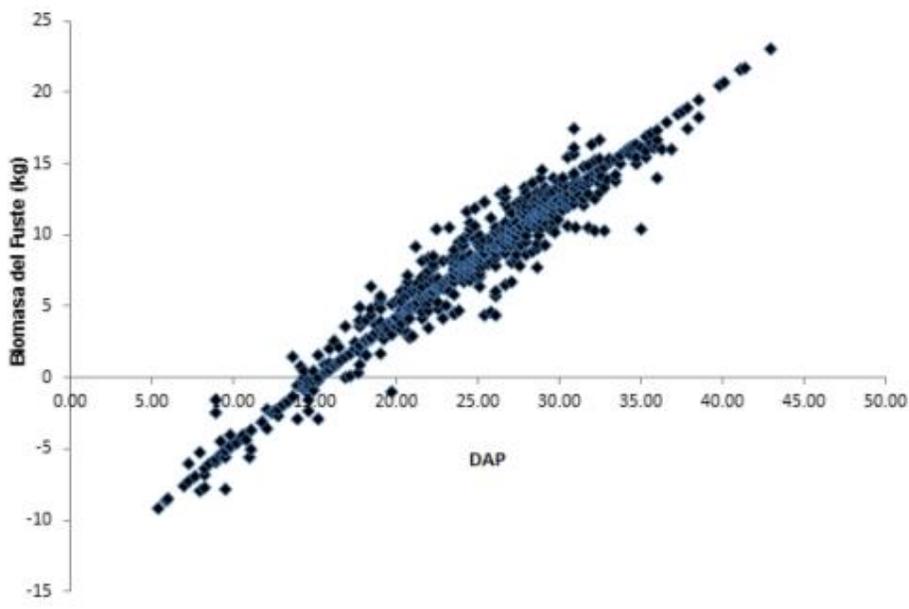
Análisis de regresión lineal						
Variable	N	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> Aj	ECMP	AIC	BIC
B Fuste	18	0.9066	0.8942	17768.46	224.9431	228.5046

Selección Stepwise.  
Máximo p-valor para entrar: 0.15  
Máximo p-valor para retener: 0.15  
Número original de regresoras: 2, regresoras retenidas en el modelo 2

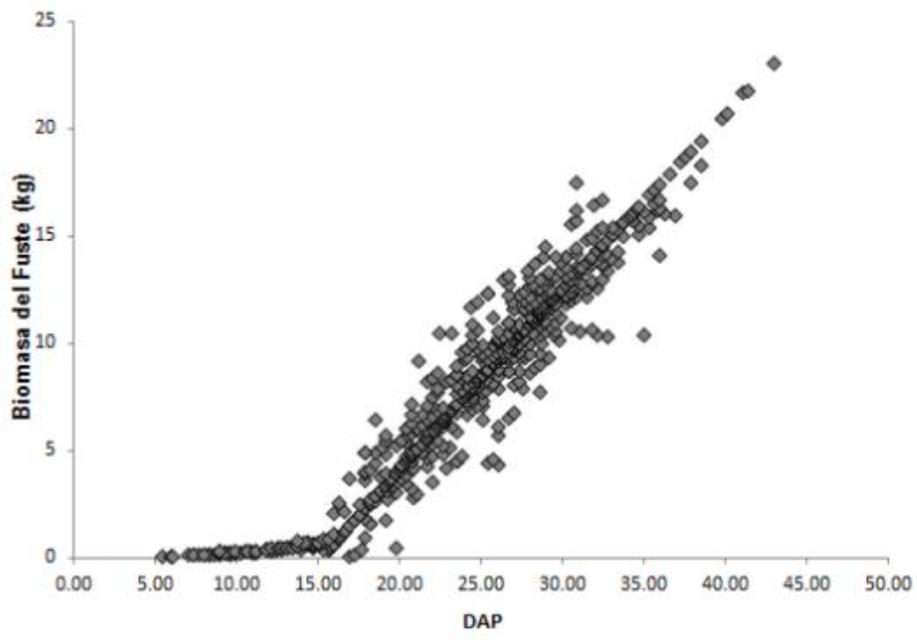
Coeficientes de regresión y estadísticos asociados								
Coef	Est.	E.E.	LI(95%)	LS(95%)	T	p-valor	CpMallows	VIF
const	-1594.7707	243.263	-2113.2733	-1076.2681	-6.5557	<0.0001		
DAP	62.5925	7.1514	47.3496	77.8355	8.7524	<0.0001	73.8797	1.1841
Altura	44.0475	10.5292	21.605	66.49	4.1834	0.0008	18.4692	1.1841

Error cuadrático medio: 12050.251999

Anexo 15 Gráfico de dispersión representando la estimación de biomasa aérea en árboles de teca <16 cm de DAP utilizando el modelo matemático específico.



Anexo 16 Gráfico de dispersión resultante de la multiplicación de 570 kg/m<sup>3</sup> como factor de corrección al volumen para la estimación de biomasa aérea en árboles de teca <16 cm de DAP.



Anexo 17 Factor de conversión de biomasa a carbono estimado por componente vegetal por encima del suelo; finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz

No. De Muestras	Porcentaje de Carbono Seco (%)	Factor de conversión de biomasa a carbono
1	6.49	
2	2.56	
3	3.33	
4	4.79	
5	6.24	
6	1.92	
7	5.56	
8	4.05	
9	5.15	
10	5.7	
11	4.06	
12	10.9	
13	3.48	
14	6.42	
15	3.06	
16	5.44	
17	2.17	<b>0.5311</b>
18	3.25	
19	4.44	
20	12.49	
21	48.82	
22	49.31	
23	49.82	
24	49.11	
25	46.4	
26	48.21	
27	49.69	
28	49.21	
29	47.08	
30	47.46	
31	49.11	
32	51.17	

Anexo 18 Constancia de resultados de las pruebas de Carbono-Nitrógeno realizado en el laboratorio del Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad del Instituto de Investigaciones de la Universidad del Valle de Guatemala.



**CENTRO DE ESTUDIOS  
AMBIENTALES Y DE BIODIVERSIDAD**  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES  
UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

18 AVENIDA 11-95, ZONA 15 VISTA HERMOSA III  
CONTACTO: 2368-8353 EMAIL: cea@uvg.edu.gt  
<http://www.uvg.edu.gt/investigacion/ceab/index.html>

Laboratorio de Análisis de Carbono

Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad  
Universidad del Valle de Guatemala

Guatemala, 24 de octubre de 2016

Estudiante  
Hubert López

Presente

Por este medio hacemos entrega de los resultados del análisis del contenido de Carbono en 32 muestras vegetales, solicitados al Laboratorio de Análisis de Carbono del Centro de Estudios Ambientales y Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala. El cuadro 1 incluye la información que fue determinada en nuestro laboratorio.

El Carbono orgánico está expresado como porcentaje peso/peso y fue determinado con un analizador elemental de carbono y nitrógeno (Flash EA 1112), después de haber secado y pulverizado las muestras.

Cuadro No 1. Resultados del Análisis de Carbono en 32 muestras vegetales entregadas su persona.

NO.	Fecha	ID	Carbono Orgánico (Base seca) (%)	Nitrógeno (Base seca) (%)
1	jul-16	1	6.49	0.17
2	jul-16	2	2.56	0.19
3	jul-16	3	3.33	0.25
4	jul-16	4	4.79	0.29
5	jul-16	7	6.24	0.53
6	jul-16	15	1.92	0.19
7	jul-16	5	5.56	0.59
8	jul-16	8	4.05	0.28
9	jul-16	9	5.15	0.54
10	jul-16	6	5.7	0.44
11	jul-16	10	4.06	0.46
12	jul-16	12	10.9	0.85
13	jul-16	11	3.48	0.38
14	jul-16	13	6.42	0.49
15	jul-16	14	3.06	0.32
16	jul-16	16	5.44	0.43
17	jul-16	17	2.17	0.21
18	jul-16	18	3.25	0.34
19	jul-16	19	4.44	0.32
20	jul-16	20	12.49	0.73
21	sep-16	Árbol 1 base de fuste (2)	48.82	0.62



NO.	Fecha	ID	Carbono Orgánico (Base seca) (%)	Nitrógeno (Base seca) (%)
22	sep-16	Árbol 1 fuste alto	49.31	0.51
23	sep-16	Árbol 1 fuste medio 2	49.82	0.66
24	sep-16	Árbol 1 fuste medio 1	49.11	0.69
25	sep-16	Árbol 1 ramilla	46.4	0.94
26	sep-16	Árbol 1 rama	48.21	0.84
27	sep-16	Árbol 1 base de fuste (2)	49.69	0.93
28	sep-16	Árbol 2 fuste medio	49.21	0.48
29	sep-16	Árbol 2 rama	47.08	0.86
30	sep-16	Árbol 2 ramilla	47.46	0.93
31	sep-16	Árbol 2 base de fuste	49.11	0.64
32	sep-16	Árbol 2 fuste alto	51.17	0.68

Cualquier consulta no dude en comunicarse.  
Sin otro particular, me despido.

Atentamente,



Licda. Gabriela Alfaro Marroquín  
Coordinadora Laboratorio de Análisis de Carbono  
Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad  
Universidad del Valle de Guatemala  
[galfaro@uvg.edu.gt](mailto:galfaro@uvg.edu.gt)