

Nota técnica

## EVALUACIÓN DE CARBONO FIJADO EN LA BIOMASA AÉREA DE PLANTACIONES DE TECA EN CHAHAL, ALTA VERAPAZ, GUATEMALA

Hubert Gerardo López\*, Edwin Estuardo Vaides<sup>1/</sup>\*, Alfredo Alvarado\*\*

**Palabras clave:** Captura de carbono; biomasa aérea; plantación forestal; teca.

**Keywords:** Carbon capture; aerial biomass; forest plantation; teak.

**Recibido:** 28/06/17

**Aceptado:** 18/09/17

### RESUMEN

En este trabajo se estimó la cantidad de carbono almacenado en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) de 14 y 15 años en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. Se generó un modelo de regresión para estimar la biomasa aérea a partir del método del Instituto Internacional Winrock. Este método 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) y el peso fresco de las ramas, ramillas y hojas de los cuales se obtienen sub muestras para realizar un posterior análisis de laboratorio. El contenido de carbono se estimó en un auto analizador de carbono y nitrógeno y la densidad de madera y el factor de expansión de la biomasa en el laboratorio químico de la Universidad Rafael Landívar, Sede La Verapaz. El modelo de predicción de biomasa del fuste obtuvo un  $r^2$  ajustado de 0,89 basado

### ABSTRACT

**Evaluation of carbon fixed in the aerial biomass of teak plantations in Chahal, Alta Verapaz, Guatemala.** This research estimated the amount of carbon stored in teak plantations (*Tectona grandis* L.f.) of 14 and 15 years old in Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. The method was a sample collections proposed by the International Winrock Institute and then to generate a mathematical model to estimate the above-ground biomass. The International Winrock Institute method consists of breaking down and sectioning trees of different diametral classes and then measuring the variables: diameter at breast height -DBH-, total height -Ht-, crown diameter -CD-, greater diameter of the log -D1-, smaller diameter of the log -D2-, length of log -L-, branches, twigs and leaves fresh weight and taking sub samples for laboratory analysis. The carbon content was estimated in a self-analyzer of carbon and nitrogen and the wood density and the factor of expansion of the biomass in

1 Autor para correspondencia. Correo electrónico: eevaides@correo.url.edu.gt

\* Campus San Pedro Claver, San Juan Chamelco, Alta Verapaz, Guatemala.

\*\* Universidad de Costa Rica, Centro de Investigaciones Agronómicas, San José, Costa Rica.

en 2 variables independientes (DAP ( $p < 0,0001$ ) y Ht ( $p = 0,0008$ )). El carbono almacenado en las edades de 14 y 15 años estudiadas fue de 108,36 y 151,37 t.ha<sup>-1</sup> respectivamente.

the chemical laboratory of the Rafael Landívar University, headquarter of La Verapaz. A model of biomass prediction of the stem was estimated, that considered the DBH ( $p < 0,0001$ ) and total height ( $p = 0,0008$ ), with an adjusted  $r^2$  of 0.89. The carbon stored in the 14 and 15 years old teak plantation was 108.36 y 151.37 t.ha<sup>-1</sup> respectively.

## INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una variación importante, ocasionada por el clima en la tierra, que provoca principalmente el calentamiento global. Ávila *et al.* (2001), indican que una de las formas de mitigar sus efectos es almacenar dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en la biomasa vegetal, mediante la fotosíntesis y en el suelo, a través de la acumulación de materia orgánica. Las plantaciones forestales se han convertido en medios estratégicos para la fijación de CO<sub>2</sub> atmosférico en la estructura vegetal que acaba por inmovilizarse cuando se construyen viviendas de madera, muebles y otros productos donde se utiliza la madera como materia prima. Otro aspecto estratégico para almacenar carbono es el mercado de carbono conocido como Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación (REDD+), que otorga beneficios económicos a los propietarios que protejan sus recursos forestales, mejoren su gestión y los utilicen de manera sostenible (Finanzas Carbono 2017).

Desde finales del siglo pasado se evaluó el potencial de carbono fijado y capturado para los países de Centro América con el fin de medir su potencial con respecto a la mitigación de los efectos de los Gases de Efecto Invernadero (GEI), como se plantea en el documento elaborado para Costa Rica en 1998 (PROARCA y CAPAS 1998). Son estudios de la Comisión Centroamericana de Ambiente y Desarrollo (CCAD) que operan

dentro del marco de trabajo sobre cambio climático a nivel regional, con el fin de facilitar el proceso de fortalecimiento de las capacidades para desarrollar las oportunidades que tiene este mercado de carbono.

En los últimos años en Guatemala se han elaborado estudios sobre estimaciones de carbono, como el de Lee (2002), para 3 especies del bosque natural latifoliado; Vásquez (2008), que realizó una evaluación para estimar carbono almacenado en bosque comunal en Cantón Paqui Totonicapán; en el 2011 Sagüi generó un modelo matemático para estimación de biomasa y carbono en pino de la sierra (*Pinus tecunumanii* Eguluz & J.P Perry) en bosques naturales de la Reserva de la Biosfera Sierra de las Minas (RBSM), San Jerónimo Baja Verapaz; Pacay (2011) con el propósito de crear un modelo matemático, para estimar el carbono en biomasa de la especie Nogal (*Juglans olanchana* Standl & L. O. Williams), realizó el estudio en el corredor biológico del bosque nuboso Purulhá Baja Verapaz; y Guatecarbon (2014), participó en la inclusión de la reducción de emisiones por deforestación en el régimen global de cambio climático.

En Guatemala y en la región centroamericana una de las especies más plantadas es teca (*Tectona grandis* L.f.), Guatemala no cuenta con información que permita estimar la cantidad de carbono aéreo capturado por estos sistemas productivos importantes para el sector forestal.

En este estudio, se presentan los resultados de la cantidad de carbono fijado al momento de la evaluación, en las plantaciones de teca, a partir de la biomasa aérea evaluada mediante un muestreo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

**Caracterización del área de estudio:** el estudio se realizó en plantaciones de teca (*Tectona grandis* L.f.) en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz, ubicada en las coordenadas geográficas latitud Norte 15,81778 y longitud Oeste 89,468056. Las plantaciones fueron establecidas en el 2001 y 2002, procedentes de semilla certificada por el CATIE como Peñas Blancas. Con base en el mapa de recategorización de las zonas de vida de Guatemala (IARNA-URL 2015), se determinó que el área de estudio se encuentra en la zona de vida bosque muy húmedo tropical (bmh-T), sobre suelos de orden Ultisol con subordenes Humults y Udults los últimos caracterizados por sus niveles de productividad muy bajos (Tobías 2010).

**Inventario forestal:** se efectuó a partir de un muestreo sistemático estratificado (subpoblaciones los estratos con edades 14 y 15 años), con unidades de muestreo (parcelas temporales) de forma circular de 500 m<sup>2</sup>. En el estrato I, correspondiente a la plantación de 14 años, se establecieron 76 parcelas (852 árboles) y en el estrato II, de 15 años, se establecieron 8 parcelas (84 árboles). Las áreas correspondientes a los 2 estratos son estrato I 151,6 ha y estrato II 9,6 ha.

**Muestreo de biomasa aérea de los árboles:** se utilizó la metodología propuesta por Winrock International (2012), como parte de la muestra se obtuvieron 10 árboles del estrato I y 10 árboles del estrato II, tomando en cuenta las distintas clases diamétricas presentes en las 2 edades. Se seleccionaron igual número de árboles en cada estrato, debido a que por ser plantaciones forestales con cortas intermedias ya efectuadas (raleos), los árboles remanentes presentan poca variabilidad entre ellos, por lo tanto, la

información que se obtiene de estos individuos seleccionados es representativa de la población, como lo indica Brown (1997), para estos estudios.

**Derribo y desramado de árboles:** el corte de los árboles se realizó con una motosierra y se dejó un tocón (base del árbol medida desde el suelo hasta una altura de 0,25 metros). Se procedió a quitar las ramas del fuste principal de cada árbol, con cuidado de no dañar las ramas, porque cada una de ellas fue utilizada para obtener la información de su peso vivo. Se tomó de referencia el estudio de Lee (2002), donde clasifica las ramas mediante sus diámetros, las ramas con diámetros de 3,5 a 14,5 cm y ramillas con 0,8 a 3,5 cm.

**Variables medidas:** las variables que se midieron para cálculo de biomasa fueron las citadas por Winrock International (2012), DAP (diámetro a la altura del pecho, considerada a 1,30 m del suelo) en centímetros, diámetro de la copa (m), altura total del árbol (m), altura del tocón (m), diámetro del tocón (cm), longitud del fuste derribado (m), diámetro del fuste a cada 2 metros del árbol derribado (cm), peso fresco total de hojas, ramas y ramillas (kg).

Para la medición del diámetro de la copa, se tomó en cuenta lo recomendado por García y Sánchez (2009), que mencionan partir del centro del fuste hasta la longitud que alcanza cubriendo la copa en 4 radios. Con el volumen total del fuste se midieron varias secciones del árbol derribado al seguir la metodología descrita en INAB (2014), se utilizó la fórmula de Smalián desarrollada, que toma en consideración la sumatoria de todas las secciones del árbol, incluyendo la punta.

El peso de ramas, ramillas y hojas se realizó con una balanza colgante directamente en campo, luego de derribar el árbol y clasificar cada una de las partes a evaluar. El peso fresco de estas secciones fue registrado en kg.

**Toma de muestra para laboratorio:** para cada árbol se tomaron 3 submuestras de las diferentes partes a evaluar. Para el fuste, las

submuestras fueron rodajas de madera obtenidas en la parte baja, media y alta del fuste del árbol, de un espesor de más o menos 3 cm. Para el caso de hojas, ramas y ramillas también se obtuvieron 3 submuestras de alrededor de 2 kg cada una. Estos procedimientos se efectuaron de acuerdo con lo citado por Castellanos *et al.* (2010) y se procedió a trasladarlas al laboratorio debidamente identificadas.

**Manejo de las sub muestras de hojas, ramas y ramillas:** se tomó el peso húmedo de cada una de las muestras, estas 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 estabilizó el peso seco de las muestras.

La metodología propuesta por Castellanos *et al.* (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 y relacionarlas 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, utilizando las siguientes fórmulas:

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

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

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

Dónde:

BH = biomasa de hojas.

Bram = biomasa de ramas.

Bras = biomasa de ramillas.

Promedio = promedio de las 3 sub muestras.

PFH = peso fresco total hojas.

Psm = peso seco de la sub muestra de hojas en kg.

Pfm = peso fresco de la sub muestra de hojas en kg.

PFRam = peso fresco total de las ramas en kg.

Psmram = peso seco de la muestra de ramas 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.

**Manejo de las sub muestras del fuste:** para facilidad de análisis y manejo de las submuestras en laboratorio, se dimensionaron estas a las siguientes medidas: ancho 3 cm y largos de 7 a 15 cm, este último depende del diámetro del árbol derribado y de la parte del fuste de la submuestra. Esta submuestra fue pesada para obtener el peso fresco y con el principio de Arquímedes (desplazamiento de agua) se obtuvo el volumen de esta (Magnussen y Reed 2013).

De acuerdo con lo descrito por Magnussen y Reed (2013) se detalla la estimación de volumen siguiendo 3 pasos:

- Primer paso: consistió en colocar las muestras en un recipiente con agua por un periodo de 2 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.
- Segundo paso: se llenó 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 inicial (Vol 1) en centímetros cúbicos.
- Tercer paso: se sumergió la submuestra del fuste en la misma probeta, se midió el volumen final (Vol 2) en centímetros cúbicos.

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

$Volumen\ de\ las\ submuestras(cc) = Vol\ 2\ (cc) - Vol\ 1\ (cc)$

Se secó la submuestra del fuste, en un horno a temperatura de 70-80°C, hasta que se estabilizó el peso en aproximadamente 96 horas, se tomó como referencia de peso seco el peso estabilizado de la submuestra. Esta metodología también la utilizó Pacay (2011) en su evaluación.

Siguiendo con la metodología propuesta por Castellanos *et al.* (2010), se utilizó la siguiente fórmula para determinar la densidad específica de la parte alta, baja y media del fuste en gramos por centímetros cúbicos ( $g\cdot cc^{-1}$ ):

Densidad específica de la parte alta, media y baja DE:

$$DE = \frac{\text{Peso secado al horno sección (g)}}{\text{Volumen fresco sección (cc)}}$$

Al obtener las densidades específicas de las 3 partes del fuste se procedió a calcular la densidad específica promedio para cada árbol, esta se utilizó para la estimación de la biomasa total del fuste (BF) con base en la ecuación:

$$BF = DEP * VF * 1000$$

Dónde:

BF= biomasa del fuste (kg).

DEP = densidad específica promedio del fuste ( $g\cdot cc^{-1}$ ).

VF = volumen total del fuste ( $m^3$ ).

**Determinación del factor de expansión de biomasa (FEB):** se calculó a partir de la relación matemática entre biomasa total y biomasa del fuste. Esto se realizó por cada árbol y se obtuvieron los resultados sumados y promediados por los 20 árboles para conseguir el FEB final. La relación matemática utilizada fue:

FEB = biomasa total (kg) por Biomasa del fuste (kg)

**Cuantificación de contenido de carbono:** se realizó a través de un analizador elemental

de Carbono y Nitrógeno (Flash EA 1112). Se analizaron en total 32 submuestras correspondientes a 5 árboles elegidos de acuerdo con el DAP. De cada uno de los árboles se extrajo la muestra de hojas, ramas, ramillas y fuste, y solamente de 2 árboles se duplicó la cantidad de muestras para evaluar la variación en el mismo árbol, al tomarse como referencia lo citado por Castellanos *et al.* (2010).

Con estas evaluaciones se obtuvo el factor de conversión de biomasa a carbono (FCBC), dada por la relación de cantidad de carbono por cantidad de biomasa. Este factor se multiplicó por el valor de la biomasa obtenida en toneladas métricas, para estimar el valor de carbono total en toneladas métricas por árbol. La fórmula utilizada para esta relación fue:

$$CT = (B / 1000) * FCBT$$

Dónde:

CT = carbono total (ton).

B = biomasa (kg).

FCBC = factor de conversión de biomasa a carbono.

**Análisis de la información y generación de modelo de regresión:** Se generó un modelo de regresión para teca, que permite estimar la biomasa aérea del árbol al utilizar el método destructivo propuesto por Winrock International 2012. Para este fin, se empleó el programa estadístico InfoStat®, con el que se probaron distintos modelos estadísticos a través de un análisis Stepwise (paso a paso), que permitió obtener una ecuación con el mejor valor de  $r^2$  ajustado y valores de probabilidad por debajo de 0,05. 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.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Análisis estadístico y estructura de los estratos a partir del inventario forestal

El inventario forestal indica que la finca cuenta con un total de 161,2 ha de plantación de teca de 14 años y 15 años (Cuadro 1). Los resultados del análisis estadístico obtenido a partir del inventario forestal fueron estimados a partir de un volumen total de madera por ha (Cuadro 2) con una probabilidad del 95%. En la plantación de 14 años se efectuó una intensidad de muestreo del 2,5% y en la de 15 años una intensidad del 3,6%, lo que permite obtener indicadores adecuados 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, en el que se puso como límite permisible

para esta investigación un error de muestreo igual o menor al 15% con un 95% de confiabilidad.

Cuadro 1. 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	Plant. 14 años	Plant. 15 años
Área (ha)	151,6	9,6
Número de parcelas	76	8
Densidad (árboles.ha <sup>-1</sup> )	228	214
DAP promedio (cm)	24,4	30,4
Altura total promedio (m)	19,3	20,3
Área basal (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	11,4	16,2
Volumen total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	105,9	149,0

Cuadro 2. Resultado del análisis estadístico para el muestreo obtenido en los 2 estratos de teca de la finca Sacuitz, Chahal Alta Verapaz.

Variable	Plant. 14 años	Plant. 15 años
Volumen total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	105,9	149,3
Varianza (s <sup>2</sup> )	724,9	325,1
Desviación estándar (s)	26,9	18,0
Coefficiente de variación (CV%)	25,4	12,1
Error estándar (Sx)	3,1	6,7
Valor de t de student	1,99	2,45
Error de muestreo absoluto (EM)	6,2	16,3
Error de muestreo relativo (EM%)	5,8	10,9
Intervalo de confianza al 95% superior de volumen total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	112,1	165,7
Intervalo de confianza al 95% inferior de volumen total (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	99,8	133,01

Entre plantaciones existe una diferencia en la densidad de 14 árboles.ha<sup>-1</sup> después del tercer raleo y los 2 últimos son comerciales. Mollinedo *et al.* (2016) indican que en plantaciones evaluadas en la zona septentrional de Guatemala por lo general se aplican los raleos conforme se da el crecimiento de los árboles, así que quedan

densidades muy bajas de hasta 100 árboles.ha<sup>-1</sup> a los 8 y 10 años. Fonseca (2004) indica que a los 25 años la densidad óptima es de 220 árboles.ha<sup>-1</sup> para llegar a la corta final, por lo que la plantación de 14 años tendría 8 árboles sobre el ideal referido y la de 15 años una cantidad inferior de 6 árboles con respecto al ideal. La variable

dasométrica altura total presenta una diferencia de 1 m entre estratos valor normal con lo encontrado anteriormente, puesto que después de la mitad de la edad de rotación el crecimiento en altura total tiende a estabilizarse.

El coeficiente de variación de la plantación de 14 años, indica que esta es más heterogénea que la de 15 años, con valores de 25,4% y 12,1%, respectivamente. Con respecto del volumen total, se tienen errores por debajo del límite establecido para la presente investigación, ya que se encontró para la plantación de 14 años que el error está en 5,8% hacia los extremos del valor promedio; para el caso de la plantación de 15 años el error está en 10,9% hacia los extremos de la media del volumen total.

El valor de N para la plantación con 14 años con un área de 151,6 ha es de 3032 unidades de muestreo de 500 m<sup>2</sup> y para la plantación de 15 años con un área de 9,6 ha es de 193 unidades de muestreo. El tamaño de la muestra está proporcional al tamaño de la sub-población (estrato), en el estrato I,

correspondiente a la plantación de 14 años, se establecieron 76 parcelas en las que se midieron 852 árboles y en el estrato II, de 15 años, se establecieron 8 parcelas y se midieron 84 árboles.

El volumen total hace referencia al volumen del fuste del árbol y se calculó con el factor de expansión de biomasa. El cálculo no incluye el volumen de las ramas, ramillas y hojas.

Los resultados de análisis de la plantación de 14 y 15 años se presentan en el Cuadro 3, en el cual se incluye la información dasométrica por hectárea. Se puede observar para el estrato I, que el 79,39% de los árboles poseen diámetro comercial, al encontrar 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 co-dominantes y dominantes. Para el estrato II, los árboles se agrupan por diámetro desde 20 hasta 49 cm, se observa que el 100% de los árboles poseen diámetro comercial.

Cuadro 3. Frecuencia (F), área basal (G) y volumen total (V) de los rodales de la plantación de teca de 14 y 15 años en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	Estrato I (14 años)			Estrato II (15 años)		
	F	G	V	F	G	V
05 a 09	8	0,04	0,22			
10 a 14	14	0,20	1,22			
15 a 19	25	0,63	4,74			
20 a 24	66	2,68	23,23	23	1,01	8,94
25 a 29	78	4,69	44,24	77	5,04	45,67
30 a 34	30	2,40	24,16	77	6,20	55,90
35 a 39	6	0,61	6,19	34	3,46	34,22
40 a 44	1	0,14	1,71			
45 a 49				3	0,46	4,60
Total	228	11,39	105,71	214	16,17	149,33

El análisis de la estructura del rodal muestra la estructura normal, característica de los bosques coetáneos o masas forestales regulares

(Figura 1), donde la mayor cantidad de individuos tienen diámetros similares agrupados al centro de la población. En este caso se puede

apreciar un mejor crecimiento diametral en la plantación del estrato II, que tiene 1 año más de edad, con menor número de individuos, por lo

que se esperaría que con estas condiciones de mejor crecimiento también la variable volumen presentara esta misma tendencia.

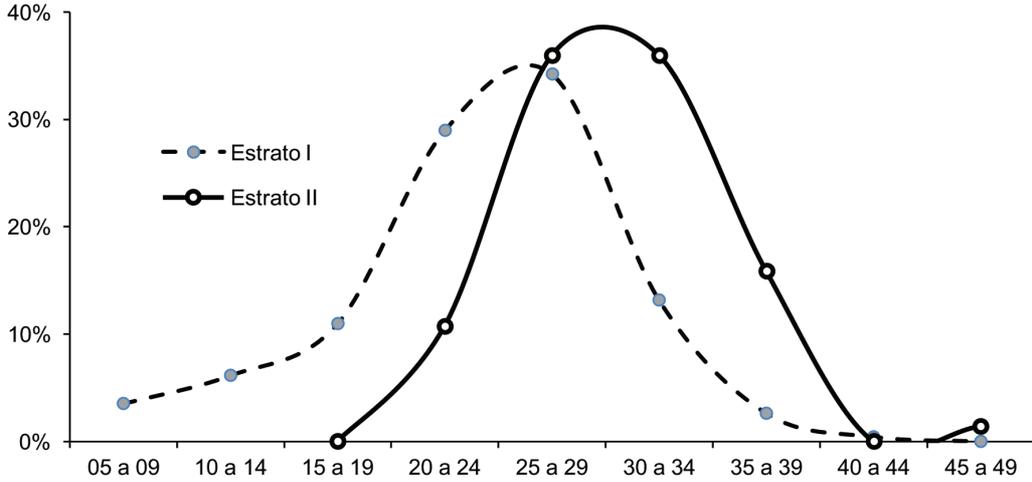


Fig. 1. Estructura de la frecuencia relativa del rodal de teca de 14 y 15 años, en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Cuando se analiza el volumen total en los 2 estratos (Figura 2), se observa que la ganancia en volumen es mayor en el estrato II, ya que la mayoría de sus individuos tendrán al menos una troza comercial. De acuerdo con

lo documentado por INAB (2014), con estos crecimientos se esperaría tener unos turnos de corta de 20 años, donde todos los árboles serían comerciales, desde el punto de vista de la dimensión de la troza.

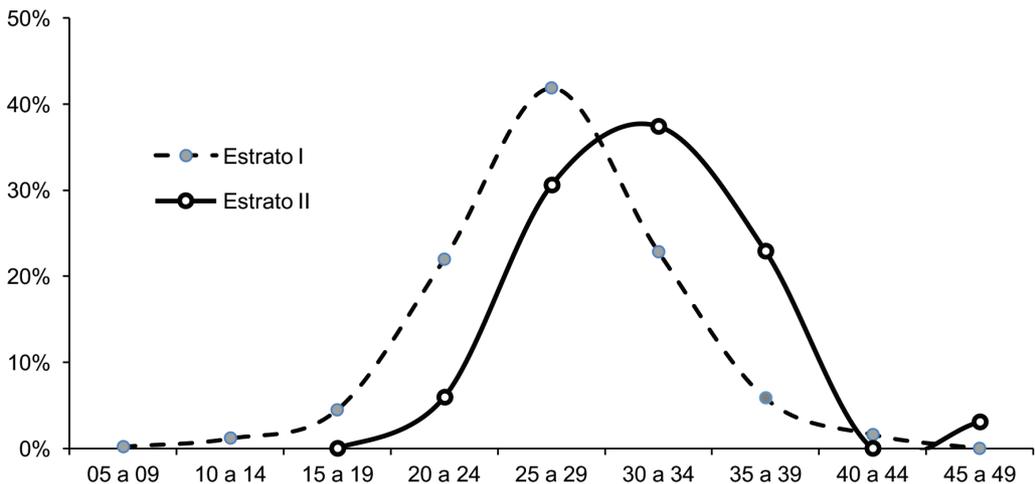


Fig. 2. Volumen total relativo del rodal de teca de 14 y 15 años, en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

El resultado de las variables cualitativas de los 2 estratos muestra que más del 80% de los árboles se encuentran dentro de la clase de posición del dosel intermedio, codominante y

dominante (Figura 3), lo que significa que reciben la luz necesaria para realizar fotosíntesis y desarrollar su diámetro y altura.

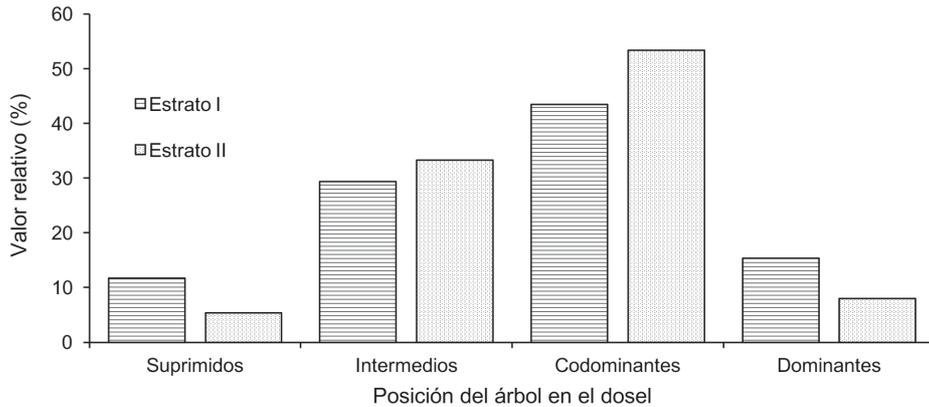


Fig. 3. Clases de posición de los árboles en el dosel de la plantación de teca de 14 y 15 años, en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Se observa también, que el estrato I presenta la mayor cantidad de árboles suprimidos, que son los que aumentan la densidad de este rodal, pero aportan muy poco al volumen del bosque.

En la Figura 4 se presenta el análisis de la forma de los árboles, el cual muestra que después de los 3 raleos quedan muy pocos individuos con

formas no deseadas, para el estrato I, más del 90% de árboles son rectos, ideales para la comercialización del producto final, mientras que para el estrato II se puede inferir a partir de la muestra que el 100% de los individuos son rectos y sin defectos, de forma que descalifiquen al árbol para tener un volumen comercial.

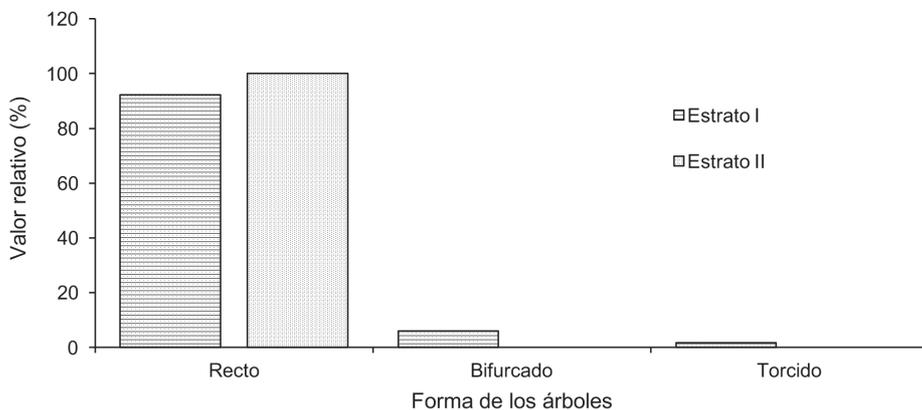


Fig. 4. Clases de forma del fuste de los árboles de teca con 14 y 15 años, en la finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Según Imaña y Encinas (2008) el mejor parámetro para expresar el crecimiento de un rodal es el volumen que se puede estimar a partir de la medición del DAP como incremento de las variables dendrométricas en función del tiempo. Para la plantación de teca de 14 años (estrato I), se encontró un incremento medio anual del DAP (IMADAP) de 1,74 cm.año<sup>-1</sup>, un IMA en altura total de 1,38 m.año<sup>-1</sup>, en área basal el IMA de 0,81 m<sup>2</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y un IMA de volumen total de 7,56 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Con base en el IMA del volumen total y con referencia al estudio realizado por Vaides (2004) se puede definir este sitio como un sitio de crecimiento y productividad de clase media a baja.

Para la plantación de 15 años (estrato II), presenta un incremento medio anual del DAP (IMADAP) de 2,04 cm.año<sup>-1</sup>, un IMA en altura total de 1,35 m.año<sup>-1</sup>, en área basal el IMA de 1,07 m<sup>2</sup> ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y un IMA de volumen total de 9,95 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>. Con base al IMA del volumen total y con referencia al estudio realizado por Mollinedo *et al.* (2016), se define este sitio como de crecimiento y productividad medio a alto (valores de productividad entre 9,89 y 17,22 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup>).

### Relación entre la densidad específica de la madera y el factor de conversión de biomasa a carbono

#### Cálculo de la densidad específica de la madera de teca

El resultado del análisis a través del proceso de secado de las muestras al horno en el laboratorio de la Universidad Rafael Landívar durante 96 horas, da como producto la densidad de la madera de teca a esta edad con 0,57 g.ml<sup>-1</sup>.

#### Estimación de biomasa aérea de cada componente

La biomasa aérea seca de los componentes de los árboles muestra que el fuste es la fracción

vegetal con mayor biomasa, mientras que las hojas tienen la menor, a pesar de que estas tienen función imprescindible y especializada en el proceso de fotosíntesis (Figura 5).

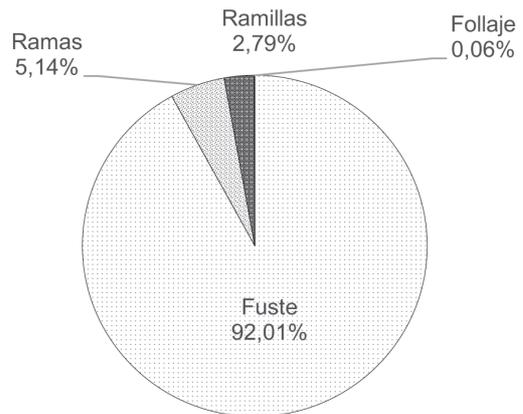


Fig. 5. Porcentaje de biomasa seca contenida en la estructura aérea de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

### Análisis de regresión de los componentes arbóreos a través de gráficas de dispersión

Se analizó la relación entre el DAP y la biomasa del fuste en la que se encontró que una relación lineal simple es la que mejor se ajusta con un coeficiente de determinación ( $r^2$ ) de 0,7719, que indica que el 77,19% de los datos se encuentran representados en el modelo (Figura 6). La regresión entre la altura total y la biomasa total se explica con un modelo potencial con un  $r^2$  de 0,5537, que señala que el 55,37% de los datos se encuentran representados en el modelo (Figura 7). La relación entre el diámetro de copa y la biomasa total se ajusta a un modelo exponencial con un coeficiente de determinación de 0,4970 (Figura 8).

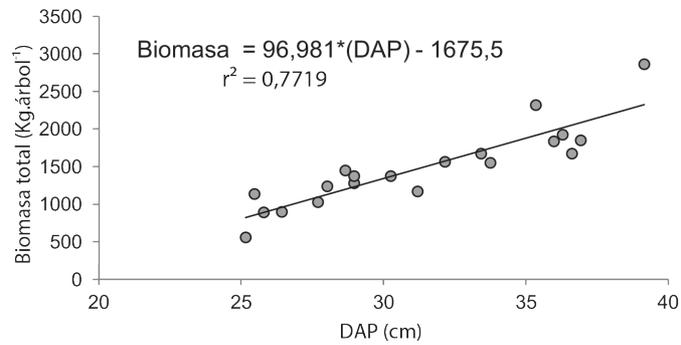


Fig. 6. Relación entre el DAP y la biomasa total como variable regresora.

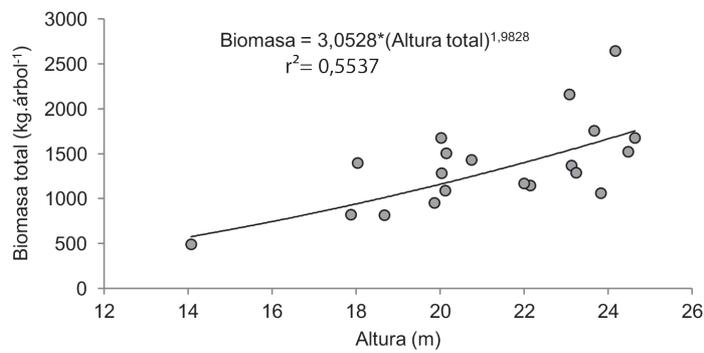


Fig. 7. Relación entre la altura de los árboles y la biomasa total como variable regresora.

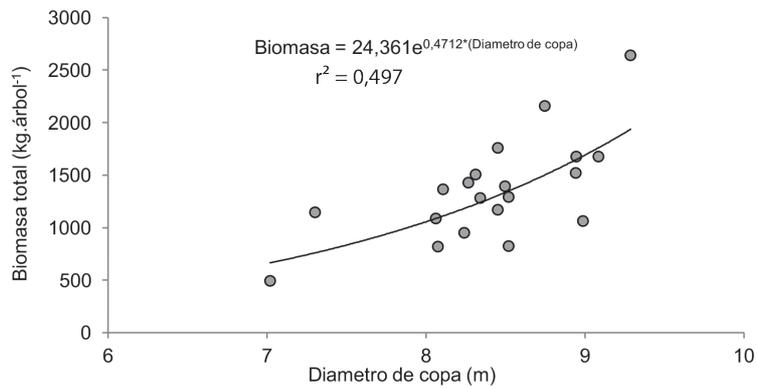


Fig. 8. Relación entre el diámetro de copa y la biomasa total como variable regresora.

De lo anteriormente mencionado, se deduce que el DAP es la variable que mejor predice la biomasa total a través de relación lineal, que 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.

### Determinación del factor de expansión de la biomasa

El factor de expansión se utiliza para estimar la cantidad de biomasa extra que tiene el árbol por sus componentes de ramas, ramillas y hojas a partir del volumen del fuste y el presente trabajo dio como resultado un factor de expansión de 1,088. Este valor se encuentra por debajo de

la mayoría de las evaluaciones encontradas para otras especies, al tomar en consideración que los otros componentes, sin incluir a las raíces, aportan únicamente el 8,8% de la biomasa del fuste; esto puede deberse a que las plantaciones han sido manejadas con podas. En la Figura 9 se presentan los gráficos de dispersión entre las variables diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetro de copa y el factor de expansión, en el que se encontró que el DAP no influye el factor de expansión, es decir, que el árbol con menor diámetro (25,26 cm) no registra el menor factor de expansión, ni el mayor DAP presenta un mayor índice. Para las variables altura total y diámetro de copa no se encontró una tendencia clara de la relación con el factor de expansión, solo hay diferencias entre los valores menores de estas variables.

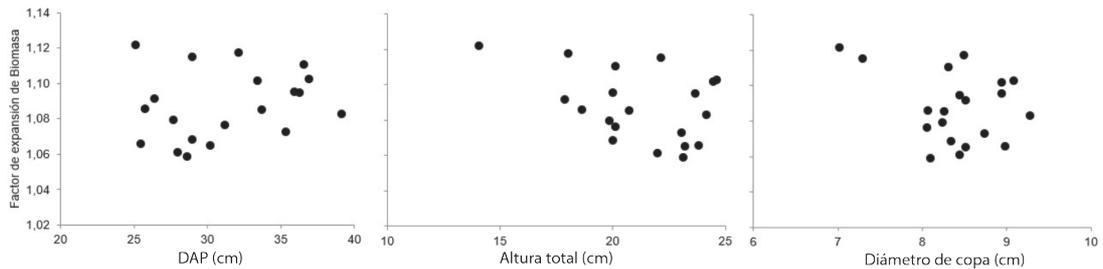


Fig. 9. Análisis de dispersión de las variables diámetro a la altura del pecho, altura total y diámetro de copa respecto a factor de expansión de biomasa de 20 árboles muestreados en finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Estos análisis permiten definir que el factor de expansión no se puede predecir de una forma adecuada a partir de un modelo, al dejarlo 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 (2011) y Sagüi (2011), en las evaluaciones con *Pinus tecunumanii* y *Juglans olanchana*.

### Análisis de correlación de Pearson

Las variables evaluadas presentaron alta correlación con la biomasa del fuste, con

resultados por arriba del 50% de dependencia. La variable que presentó mayor correlación fue la de DAP con un valor de “r” igual a 0,8786.

### Determinación del modelo de regresión

El modelo de mejor ajuste ( $r^2$  ajustada más cercana a 1) se presenta en el Cuadro 4. En este modelo la  $r^2$  ajustada de 0,89, la constante o intercepto es de -1594,77, la pendiente de la variable regresora DAP es 62,59 con un valor “p” <0,0001 y la pendiente de la variable regresora altura total (Ht) es 44,05 con valor “p” de 0,0008, por lo que son las 2 menores a 0,05.

Cuadro 4. Modelo para estimar la biomasa aérea del fuste (kg de Bf) en árboles de teca en función de las variables diámetro a la altura del pecho (DAP) y la altura total (Ht).

Método de selección en InfoStat	Variable dependiente	Constante o Intercepto	Pendiente por variable	Valor de P
Stepwise	Biomasa del fuste	-1594,77	DAP = 62,5925	<0,0001
			Ht= 44,0475	0,0008
Modelo de regresión:			Bf = -1594,7707 + 62,5925(DAP) + 44,0475(Ht)	

Nota: DAP ingresado en cm y Ht ingresado en m.

Es interesante mencionar que el mejor modelo fue obtenido a partir de las 2 variables independientes que aportan más al volumen del fuste, donde se acumula la mayor cantidad de biomasa en el árbol, como se mostró en la Figura 5. En otras evaluaciones efectuadas con varias especies y sitios, se deben agregar otras variables que permitan identificar estos cambios en los modelos alométricos generados, como lo comenta Chave *et al.* (2014), que para este caso en particular, por tratarse de una única especie y una sola localidad, las variables que más influyen son las asociadas al individuo.

### Evaluación de supuestos del modelo

En la Figura 10 se puede observar que entre los residuos estudentizados de la biomasa del fuste y los predichos por el modelo de regresión para la estimación de biomasa del fuste, la dispersión de los puntos es aleatoria y cumple el supuesto de homocedasticidad en las varianzas de los residuos del modelo. Lo anterior valida estadísticamente la confiabilidad del modelo generado, porque supone homogeneidad constante en las varianzas de los residuos de cada variable independiente del modelo. 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.

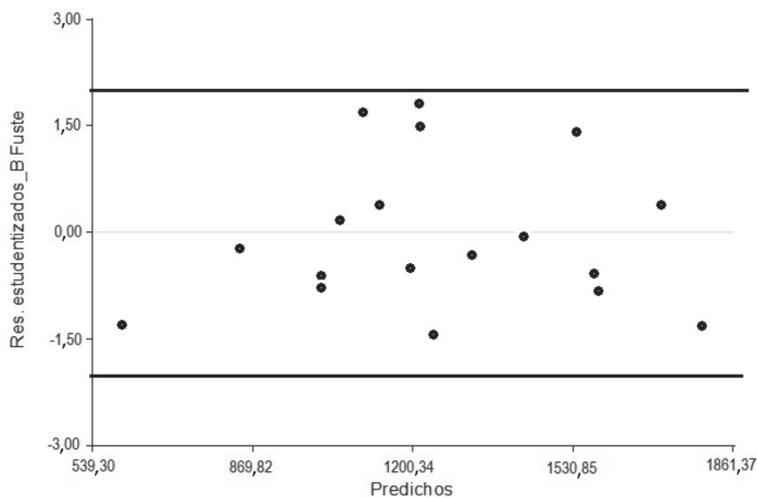


Fig. 10. Homocedasticidad del modelo estadístico generado para la estimación de biomasa aérea en teca.

Se realizó la estimación de la biomasa aérea de la muestra utilizando el modelo estadístico para teca, pero se determinó que el mismo presenta errores en el cálculo de la biomasa en diámetros menores. A través de un gráfico de dispersión se analizó y determinó que el modelo es funcional para árboles >16 cm de DAP. Para determinar el factor de corrección se tomó como base la densidad específica de la madera de teca  $0,57 \text{ g.ml}^{-1}$  y a través de estequiometría se hizo la conversión de  $\text{g.ml}^{-1}$  a  $\text{kg.m}^{-3}$ , en el que resultó un valor de  $570 \text{ kg.m}^{-3}$  factor aplicado al volumen de todos los árboles que presentaron  $\text{DAP} < 16 \text{ cm}$ .

En los casos donde no se cuenta con una fórmula específica, se utiliza la fórmula general definida por Brown (1997), sin embargo, de acuerdo con Magnussen y Reed (2013), cuando se utilizan modelos estadísticos generales en raras ocasiones se tiene potestad para realizar comprobaciones o validaciones.

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

Se determinó que el factor de conversión de la biomasa a carbono es 0,5311, lo que significa que de la biomasa total, 53,11% corresponde a carbono. El factor específico utilizado generalmente para la determinación de carbono aéreo es de 0,5 ton C por toneladas de biomasa fresca (Valenzuela 2001). Para teca este factor internacional se considera como bajo, debido a que existe una diferencia de 3,11% con valor encontrado en el presente trabajo y que repercute

directamente en los resultados cuando se realizan evaluaciones en grandes extensiones. De igual forma, el valor encontrado en el presente estudio es superior al encontrado por Martin y Thomas (2011) en Panamá, el cual evaluó el carbono fijado por los árboles nativos.

#### **Cuantificación de carbono fijado y capturado anualmente**

Los resultados de la cuantificación de la cantidad de carbono almacenado y la proyección de captura anual en las 161,2 ha de plantación de teca, se analizaron y discutieron comparativamente para las plantaciones de 14 y 15 años estudiadas.

En el Cuadro 5 se presentan los resultados de carbono almacenado en la muestra del inventario forestal proyectado por hectárea para los 2 estratos. En el cuadro se agrupa a los árboles desde 5 a 49 cm de DAP, a los cuales se les cuantificó la cantidad de biomasa y carbono almacenado. Para el estrato I, se tiene como resultado  $204,02 \text{ t.ha}^{-1}$  de biomasa total y  $108,35 \text{ t.ha}^{-1} \text{ C}$ . Para el estrato II, el resultado fue de  $285 006 \text{ t.ha}^{-1}$  de biomasa asociada a  $151 367 \text{ t.ha}^{-1} \text{ C}$ . Se tomaron en cuenta los datos generados para las 2 plantaciones, se determinó que existe una diferencia (incremento anual) de  $43,01 \text{ t.ha}^{-1} \text{ C}$ , al comparar las 2 plantaciones con 1 año de diferencia. Los valores encontrados hacen referencia a valores cercanos a lo que indican Federici *et al.* (2015) en las evaluaciones de este tipo.

Cuadro 5. Carbono aéreo por hectárea en la plantación de teca de 14 y 15 años, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	Estrato I (14 años)			Estrato II (15 años)		
	Frecuencia	B total (kg)	Carbono (kg)	Frecuencia	B total (kg)	Carbono (kg)
05 a 09	8	135,23	71,82			
10 a 14	14	758,14	402,65			
15 a 19	25	7066,12	3752,81			
20 a 24	66	48 088,25	25 539,67	23	18 638,75	9899,04
25 a 29	78	89 639,22	47 607,39	77	91 257,86	48 467,05
30 a 34	30	45 234,61	24 024,10	77	107 936,32	57 324,98
35 a 39	6	10 607,32	5 633,55	34	60 262,02	32 005,16
40 a 44	1	2495,59	1325,41			
45 a 49				3	6911,51	3670,70
Total	228	204 024,48	108 357,40	214	285 006,47	151 366,94

Nota: B total: Biomasa total

En el Cuadro 6, se muestran los valores de teca, de los 2 estratos evaluados, en relación totales estimados del carbono en las plantaciones con toda el área objeto de estudio.

Cuadro 6. Carbono aéreo total en la plantación de teca de 14 y 15 años, finca Sacuitz, Chahal, Alta Verapaz.

Clase DAP	Estrato I (151,58 ha)			Estrato II (9,62 ha)		
	Frecuencia	B total (kg)	Carbono (kg)	Frecuencia	B total (kg)	Carbono (kg)
05 a 09	1157	20 498,72	10 886,87			
10 a 14	2194	114 918,37	61 033,14			
15 a 19	3790	107 081,92	568 851,61			
20 a 24	9972	7 289 216,81	3 871 303,05	220	179 304,81	95 228,78
25 a 29	11 887	13 587 513,51	7 216 328,42	742	877 900,67	466 253,04
30 a 34	4547	6 856 662,63	3 641 573,52	742	1 038 347,40	551 466,30
35 a 39	878	1 607 858,11	853 933,44	330	579 720,60	307 889,61
40 a 44	160	378 281,12	200 905,10			
45 a 49				27	66 488,75	35 312,18
Total	34 584	30 926 031,19	16 424 815,16	2061	2 741 762,23	1 456 149,92

En total en las 161,2 ha estudiadas se almacenan 33 667,79 t de biomasa aérea asociadas a 17 880,96 t C. Con la utilización del modelo estadístico para teca se estimaron 556,08 t C

extras, lo que representa 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.

En la plantación de 14 años anualmente se captura en promedio 14,57 t por hectárea de biomasa aérea y 7,74 t por hectárea de C; en el caso de la plantación de 15 años capturó anualmente 19,0 t de biomasa aérea y 10,10 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> C. El IPCC (2001) documenta un incremento medio anual de biomasa para teca es de 8 t.ha<sup>-1</sup>.año<sup>-1</sup> y para este estudio se encuentran valores por arriba de estos, debido a la mejor calidad de estos sitios.

En total el área de estudio tiene fijado un total de 17 880,96 t C, las que de acuerdo con De Camino y Morales (2013) permanecerán almacenadas en el xilema por largo tiempo. Ugalde (1997) indica que esto es importante y valioso para los mercados de servicios ambientales mientras no se quemé y el C regrese nuevamente a la atmósfera.

### AGRADECIMIENTOS

Se agradece el espacio brindado por el propietario de la finca, señor Juan Sovio, a los laboratorios de la Universidad Rafael Landívar del Campus San Pedro Claver y de la Universidad del Valle de Guatemala, Campus Central, por su colaboración en el desarrollo del presente estudio.

### LITERATURA CITADA

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* 8(30):32-35.

Castellanos, EJ; Quilo Coronado, AE; Mato Amboage, R. 2010. Metodología para la estimación del contenido de carbono en bosques y sistemas agroforestales de Guatemala, Guatemala, Centro de Estudios Ambientales y de Biodiversidad de la Universidad del Valle de Guatemala (CEAB-UVG) y CARE-Guatemala. 24 p.

Chave, J; Rejou-Mechain, M; Burquez, A; Chidumayo, E; Colgan, MS; Delitti, WB; Duque, A; Eid, T; Fearnside, PM; Goodman, RC; Henry, M; Martinez.Yrizar, A; Mugasha, WA; Mullerlandau, HC; Mencuccini, M; Nelson, BW; Ngomanda, A; Nogueira, EM; Ortiz-Malavassi, E; Pelissier, R; Platon, P; Ryan, CM; Saldarriaga, JG; Vieilledent G. 2014. Improved allometric models to estimate

the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology* 20(10):3177-3190.

- De Camino, M; Morales, JP. 2013. Las plantaciones de teca en América Latina: mitos y realidades. (Serie Técnica). Informe técnico N°. 397. Turrialba, Costa Rica, CATIE-FAO. 410 p.
- Di Rienzo, JA; Casanoves, F; Balzarini, MG; Gonzalez, L; Tablada, M; Robledo, CW. (2008). InfoStat, versión 2016 (programa informático), Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. Urbana, Illinois, USA. Roma, FAO (Food and Agriculture Organization). 55 p.
- Federici, S; Tubiello, F; Salvatore, M; Jacobs, H; Schmidhuber, J. 2015. New Estimates of CO<sub>2</sub> forest emissions and removals: 1990–2015. In MacDicken, K. (ed.) *Forest Ecology and Management*, Roma. p. 89-98.
- Finanzas Carbono. 2017. Plataforma sobre financiamiento climático para Latino América y el Caribe (en línea). Consultado 17 mar. 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, s.e. 121 p.
- García Aguilar, V; Sánchez López, DL. 2009. Estimación de Carbono Contenido en el Bosque Bajo Manejo Forestal del Ejido de Tlamanalco. Estado de Mexico. Tesis Ing. Universidad de Chapingo, Texcoco, México. 133 p.
- Guatecarbón (Proyecto). 2014. Reduced Emissions from Avoided Deforestation in the Multiple Use Zone of the Maya Biosphere Reserve in Petén, Guatemala (en línea). Consultado 17 mar. 2017. Disponible en <http://guatecarbon.com/el-proyecto/>
- IARNA-URL (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente-Universidad Rafael Landívar). 2015. Mapa Digital Mapa de Capacidad de Uso de la Tierra con resolución de 25 m por píxel actualizado con áreas protegidas del 2013. Guatemala. 53 p.
- Imaña, E; Encinas, O. 2008. Epidemiología forestal. Universidad de Brasilia, Departamento de Ingeniería Forestal, Brasilia. 72 p.
- INAB (Instituto Nacional de Bosques, Guatemala). 2014. Lineamientos técnicos de manejo forestal. Guatemala. 47 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Wembley). 2001. El cambio climático: resumen para responsables de políticas. Wembley, Reino Unido. 38 p. Informe de Síntesis.
- Lee, GA. 2002. Estudio preliminar para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono para *Vochystia guatemalensis*, *Calophyllum brasiliense*, *Cyrtistax donnell-smithii* en bosques naturales de Guatemala. Tesis Lic. Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala. 75 p.

- Magnussen, S; Reed, D. 2013. Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. Recreaciones para estimación y la supervisión. Roma, FAO (Food and Agriculture Organization). 28 p.
- Martin, AR; Thomas, SC. 2011. A reassessment of carbon content in tropical trees. *PloSone* 6(8): e23533.
- Mollinedo, MS; Herrera, MA; 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. *Madera y Bosques* 22(2):89-103.
- Pacay, EF. 2011. Generación de un modelo matemático para la estimación de biomasa y cuantificación de carbono en la especie de nogal (*Juglans olanchana* Standl & I. O. Ewilliams), en bosques naturales del corredor biológico del bosque nuboso, en Purulhá, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Lic. Universidad Rafael Landívar. 102 p.
- PROARCA/CAPAS (Programa Ambiental Regional para Centro América/Sistema Centro Americano de Áreas Protegidas, Costa Rica). 1998. Estimación de la cantidad de carbono almacenado y captado (masa aérea) por los bosques de Costa Rica. Costa Rica. 50 p.
- Sagüi, NJ. 2011. Generación de un modelo matemático para la estimación de biomasa y carbono para (*Pinus tecunumanii* Eguliz & J.P Perry), en bosques naturales de la reserva de biósfera Sierra de las Minas (RBSM), San Jerónimo, Baja Verapaz, Guatemala. Tesis Lic. Universidad Rafael Landívar. 101 p.
- Tobias, H. 2010. Cartografía de suelos en Guatemala. Cartografía convencional de suelos, Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala 34 p.
- Ugalde, LA. 1997. Resultados de 10 años de Investigación Silvicultural del Proyecto MADELEÑA en Nicaragua. Informe técnico N°. 292. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 169 p.
- Vaides, EE. 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 M.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 81 p.
- Valenzuela, HT. 2001. Estimación de secuestro de carbono en bosques naturales de oyamel (*Abies religiosa*) en el sur del Distrito Federal. Tesis Lic. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, México. Chapingo, México. 127 p.
- Vásquez, VJ. 2008. Estimación del contenido de carbono en biomasa aérea del cosque comunal, cantón Paqui, Totonicapán. Tesis Lic. Universidad Rafael Landívar Quetzaltenango, Guatemala. 99 p.
- Winrock International 2012. Tree biomass destructive harvesting calculation tool (en línea). Winrock International's Destructive Harvest Data Entry Tool-Versión 2012. Consultado 2 abr. 2017. Disponible en <https://translate.google.com.gt/translate?hl=es&sl=en&u=https://www.winrock.org/&prev=search>



