

# Modelos alométricos para biomasa y carbono de *Albizia carbonaria* durante la fase de crecimiento vegetativo

ISSN 0122-8420  
eISSN2539-0899Fecha de recepción: 07 de julio de 2020  
Fecha de aceptación: 06 de agosto de 2020Hernando Criollo Escobar • 1  
Johanna Muñoz Belalcázar • 2  
Tulio César Lagos Burbano • 3DOI: <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11384>

## Resumen

La generación de conocimiento en sistemas agroforestales con café requiere de una oferta importante de especies arbóreas que regulen la luminosidad y sean amigables con la biodiversidad y el suelo, funciones que cumple *Albizia carbonaria*. En una zona cafetera del departamento de Nariño se sembraron 50 plantas para evaluar biomasa seca total (BT) y captura de carbono (Ca) en la especie, a partir de modelos alométricos. Durante 600 días después de la siembra, se hicieron mediciones bimensuales en cinco plantas de altura de planta (AP), diámetro basal del tallo (DIA), diámetro normalizado a altura de pecho (DAP), número de hojas (NH) y número de ramas (NR). Mediante el método destructivo se determinó el peso fresco de raíces, tallos y hojas, para obtener la BT. El Ca se consiguió del producto  $BT \times 0,5$ . Además, se calcularon la tasa relativa (TRC) y absoluta de crecimiento (TAC). A excepción de  $NH$  vs  $TRC$ , el análisis de correlación indicó alta asociación entre todas las variables estimadas. El  $NH$  y el  $DIA$  se ajustaron al modelo lineal, la  $AP$  al modelo cuadrático, la  $TRC$  a un polinomio de tercer grado, con bajas calificaciones en el coeficiente de determinación, cuadrado medio del error, AIC y BIC. La  $BT$  y el  $Ca$  se explican a través del  $DIA$  y  $AP$ , mediante los modelos Husch y Shumacher-Hall, caracterizados por sus bajos valores de cuadrado medio del error, AIC y BIC y alto coeficiente de determinación. El tallo fue la fuente de la  $BT$  con porcentajes superiores al 50 %.




**Palabras clave:** agroforestería en café, crecimiento, TRC, modelo de Husch, Shumacher-Hall, captura de carbono.

## Allometric models for biomass and carbon of *Albinizia carbonaria* during the vegetative grow phase

### Abstract

Generation of knowledge in agroforestry systems with coffee requires a significant supply of tree species that regulate light, are friendly to biodiversity and the soil; these functions are fulfilled by *Albizia carbonaria*. In a coffee zone in the Nariño state, 50 plants were planted to evaluate total dry biomass (BT) and carbon capture (CC) in the species, from allometric models. During 600 days after sowing, bimonthly measurements were made in five plants of plant height (PH), basal stem diameter (BSD), normalized diameter at breast height (BH), leaves number (LN) and branches number (BN). Using the destructive method, the fresh weight of roots, stems and leaves was obtained to get the BT. Ca was taken from the product  $BT \times 0.5$ . In addition, the relative (RGR) and absolute growth rate (AGR) were calculated. With the exception of  $NH$  vs  $TRC$ , the correlation analysis indicated a high association between all the estimated variables. LN and BSD were adjusted to the linear model, the PH to the quadratic model, the RGR to a third-degree polynomial, with low scores in the coefficient of determination, mean square of the error, AIC and BIC. BT and Ca are explained through BSD and PH, using the Husch and Shumacher-Hall models, characterized by their low mean square error values, AIC and BIC and high coefficient of determination. The stem was the source of BT with percentages higher than 50%.

**Keywords:** agroforestry in coffee, growth, RGR, Husch model, Shumacher-Hall, carbon sequestration.

1. PhD. Universidad de Nariño. Ciudad Universitaria Torobajo, Pasto. [hcriolloescobar@gmail.com](mailto:hcriolloescobar@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0002-8690-4486>
2. MScC. Universidad De Nariño. Grupo de Investigación en Frutales Andinos. [mjohannaalixa@gmail.com](mailto:mjohannaalixa@gmail.com)  <https://orcid.org/0000-0003-4466-192X>
3. PhD. Universidad de Nariño. Ciudad Universitaria Torobajo, Pasto. [tlagosbl@udenar.edu.co](mailto:tlagosbl@udenar.edu.co)  <https://orcid.org/0000-0001-9222-4674>

# I. Introducción

---

Los bosques naturales y las plantaciones forestales ayudan a mitigar el cambio climático, dado que regulan el ciclo del carbono a través del proceso de fotosíntesis, la fijación de CO<sub>2</sub> y la acumulación de biomasa. Parte de esta biomasa se transfiere al suelo mediante el aporte de hojarasca, la cual se convierte en reserva de carbono (Vásquez & Arellano, 2012; Ramachandran & Nair, 2014; Santibáñez, 2014; Carrillo et al., 2016).

Dentro del contexto mundial, los sistemas agroforestales (SAF) surgen como una alternativa sostenible para el uso del suelo y el manejo de los recursos naturales, al lograr asociar leñosas perennes con cultivos y/o animales. Los SAF tienen diversas ventajas, dentro de las cuales están la captura y la fijación de carbono, la conservación de fuentes hídricas y el mantenimiento de la biodiversidad biológica (Ramachandran & Nair, 2014; Uribe, 2015). La diversidad de especies arbóreas permite diseñar e implementar diferentes arreglos agroforestales en forma de bosques protectores, de barreras rompevientos y árboles dentro de los cultivos (Farfán, 2012); además, contribuye a mantener la fertilidad del suelo, a reducir la erosión e incrementar la materia orgánica del suelo (Murgueitio et al., 2016). En café, por ejemplo, se han evaluado SAF que han incluido varios tipos de policultivos con especies fijadoras de nitrógeno, maderables, musáceas, palmas, frutales y otros componentes (Ramírez & Calvo, 2003; Villavicencio-Enríquez, 2013), donde el sombrío origina microclimas (Peng et al., 2009) que alargan los periodos de almacenamiento del carbono en el suelo (De Carvalho et al., 2016).

Entre las especies arbóreas preferidas por los agricultores para el establecimiento de SAF, están las leguminosas, especies de gran importancia en el asocio con cultivos perennes como el café; también es común emplearlas en sistemas agrosilvícolas, silvopastoriles, cercas y barreras vivas (Farfán, 2012). En este sentido, una de las leguminosas promisorias como sombrío para el cultivo de café es *Albizia carbonaria*, especie que crece en bosques húmedos y se encuentra naturalmente en Panamá, norte de Colombia y oeste de Venezuela. Ha sido introducida como planta de sombra en cafetales de Centroamérica, Sudamérica y las Antillas, y se conoce con los nombres comunes de carbonero, mucho, pinon y pisquín (Avilés, 2017). En Colombia se encuentra en zonas localizadas entre 700 y 1700 msnm, con una precipitación anual entre 1500 y 1900 mm, tolera suelos arcillosos, suelos ácidos (pH=4,5) y zonas inundables (Bernal et al., 2012). Esta especie es importante por los servicios ambientales que proporciona, gracias a su rápido crecimiento y aporte de sombrío, así como por su papel en la restauración de zonas degradadas, control de erosión, conservación de la biodiversidad, fijación de nitrógeno al suelo y como fuente de proteína animal.

*Albizia carbonaria* es una especie que mantiene el follaje en los periodos secos (Alegre et al., 2000; Cordero et al., 2003), con altos contenidos de nitrógeno y aporta gran cantidad de biomasa al suelo (Farfán, 2007). A pesar de sus múltiples servicios, la especie no ha sido de gran interés para los investigadores.

Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio se enfocó en entender el comportamiento del crecimiento, el aporte de biomasa y la captura de carbono de la especie, a partir de la evaluación de modelos matemáticos.

Los modelos alométricos permiten calcular variables, algunas de difícil medición, con base en las correlaciones existentes entre ellas (Watzlawick et al., 2001; Álvarez, 2008). En ocasiones, los modelos alométricos presentan limitaciones debido a los factores que influyen en el crecimiento de la especie, como los genéticos y los ambientales, condiciones que determinan su comportamiento (Álvarez, 2008); de ahí la importancia de la generación de modelos regionales, que configuren el crecimiento bajo las condiciones particulares de una región.

Acorde con lo expuesto, Espinoza-Domínguez et al. (2012) estimaron el almacén de carbono en SAF con café (*Coffea arabica* L.) en una región del estado de Veracruz, México. El SAF que presentó la mayor cantidad de carbono aéreo, estimado con modelos alométricos, fue café-cedro rosado con  $114 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , seguido de los sistemas café-macadamia con  $34 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , café-chalahuite con  $29 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , café-plátano velillo con  $27 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ ; y por último el sistema silvopastoril con  $2 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ . De los sistemas evaluados se concluye que, en promedio, los SAF almacenan  $102 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , el potrero almacena  $52 \text{ t C}\cdot\text{ha}^{-1}$ , y el bosque primario es el sistema que más carbono total almacena, con un valor de  $355 \text{ Mg C}\cdot\text{ha}^{-1}$ .

Ortiz et al. (2008) modelaron el crecimiento y almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*) plantados en Changuinola, Panamá, para estimar el potencial de captura de carbono de SAF con cacao. El carbono almacenado en 25 años varió entre  $43\text{-}62 \text{ t C ha}^{-1}$ , con tasas de acumulación entre  $1,7$  y  $2,5 \text{ t C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . Las mayores tasas de acumulación de carbono ocurrieron durante los primeros siete años de implantado el arreglo agroforestal.

En consecuencia, el objetivo del presente trabajo fue analizar el crecimiento y determinar modelos alométricos que permitan calcular la biomasa y la captura de carbono de la especie *Albizia carbonaria*.

## II. Metodología

---

El estudio se realizó en la vereda Ortega (municipio de Buesaco, departamento de Nariño), localizada a  $1959 \text{ msnm}$ , temperatura promedio de  $16 \text{ }^\circ\text{C}$ , precipitación anual de  $1400 \text{ mm}$  y humedad relativa promedio del  $80\%$ . El área de estudio se caracteriza por ser una zona de vida de bosque húmedo premontano (bh-PM), favorable para el crecimiento de especies forestales (Guapucal et al., 2013).

En la parcela experimental se sembraron 50 plántulas de *Albizia carbonaria*. Para la siembra se hicieron hoyos de  $0,30 \times 0,30 \times 0,30 \text{ m}$ , se roturó el fondo del hoyo, con el fin de evitar encharcamiento y facilitar la penetración de las raíces; además, 15 días antes del trasplante, se adicionó  $1\text{kg/hoyo}$  de materia orgánica compostada. Los árboles utilizados en el ensayo fueron obtenidos de un vivero especializado. La altura de las plantas en el momento de trasplante fue de  $8 \text{ cm}$ . Se sembraron a una distancia de  $2 \text{ m}$  entre plantas y surcos y a libre exposición solar. El tiempo de evaluación fue de 20 meses a partir de la fecha de siembra, con una frecuencia entre evaluación de sesenta días.

### **Variables evaluadas**

La altura de planta se midió en centímetros (AP) con una cinta métrica, tomada desde la base de la planta hasta la base del pecíolo de la última hoja emitida. El diámetro de tallo se calculó en centímetros (DIA) con un pie de rey, tomado a  $10 \text{ cm}$  del suelo. El diámetro a la altura de pecho en centímetros (DAP) se evaluó cuando las plantas alcanzaron una altura mayor a  $1,30 \text{ m}$ , su medición se hizo con un pie de rey. Para el número de hojas (NH) y número de ramas (NR), el conteo se llevó a cabo por árbol evaluado. El registro de las variables antes citadas se realizó en cinco plantas por evaluación.

Se obtuvo la biomasa aérea (g por árbol), definida como el contenido de biomasa viva (tallos, ramas y hojas) existente por encima del suelo (FAO, 2010). La estimación precisa de esta variable es esencial para

Comprender mejor los ciclos de carbono en los ecosistemas terrestres, donde los bosques actúan como depósito primario del carbono terrestre (Houghton, 2005; Álvarez, 2008). Para determinar la biomasa seca total (BT), las cinco plantas extraídas del campo se dividieron en tallos, ramas y hojas, se pesaron y se llevaron al Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Universidad de Nariño, para colocarlas en el horno de conexión marca Cole-Parmer, a 70 °C, por 48 horas. Los pesos secos de tallos (PSTA) y hojas (PSHO) se determinaron con una balanza de precisión Cole-Palmer Symmetry.

La biomasa de raíces (Br) se determinó con el fin de no subestimar la cantidad de biomasa aportada y el carbono retenido por este componente, ya que en algunas especies puede representar un porcentaje considerable; por ejemplo, en coníferas representa hasta 18 % y en otras especies del 17.1 al 36.2 % de la biomasa total de la planta (Kurz et al., 1996; Gargaglione et al. 2010). Se calculó mediante la aplicación del modelo propuesto por Penman *et al.* (2003):

$$Br = e^{(-1,06+0,88*Ln(Ba))}$$

Donde: Br = biomasa de raíces, Ba = biomasa aérea  
La biomasa total correspondió a la suma de Br y Ba.

La tasa relativa de crecimiento (TRC) en g/(g.día), se calculó a partir de la aplicación de la fórmula propuesta por Hunt (1978):

$$TRC = \frac{\ln W2 - \ln W1}{T2 - T1}$$

Donde: Ln: Logaritmo natural; W2 y W1: peso seco de planta en los tiempos 1 y 2; T2 y T1: tiempos de lectura de la variable.

También se calculó la tasa absoluta de crecimiento (TAC) en g/día (Hunt, 1990):

$$TAC = \frac{W2 - W1}{T2 - T1}$$

El contenido de carbono de la especie se calculó según lo expuesto por Penman *et al.* (2003), quienes consideran que el contenido de carbono de una especie vegetal corresponde aproximadamente al 50% de la biomasa total, dada por la suma de biomasa aérea más biomasa de raíces; por lo tanto, la biomasa total se multiplicó por la fracción 0,5, lo cual corresponde a la captura de carbono en toneladas de materia seca a la menos uno (t d.m)<sup>-1</sup>.

Para establecer el grado de asociación entre las variables evaluadas se hizo el análisis de correlación de Pearson con base en los promedios de cada evaluación. Luego, acorde con las recomendaciones de Segura y Andrade (2008) y Picard *et al.* (2012), se procedió a la selección de variables a través de la regresión lineal paso a paso a partir de un modelo completo donde la biomasa total (BT) y el carbono (Ca) fueron las variables dependientes en función de las variables tiempo (T), AP, DIA, NH, NR y DAP. Las variables que se incluyeron en las ecuaciones alométricas, se seleccionaron con base en el modelo de menor AIC (criterio de información Akaike, en español) y la significancia (P<0,05) de la hipótesis diferente de cero. Las ecuaciones alométricas probadas fueron las genéricas de Berkhout, Husch, Spurr y Shucmacher-Hall, sugeridas por Segura y Andrade

(2008). Teniendo en cuenta las recomendaciones de estos autores, para la selección de los mejores modelos se consideró el cuadrado medio del error (CME), el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) ajustado, el AIC y el criterio de información bayesiano (BIC). En cada uno de estos indicadores se calificaron los modelos asignando uno al mejor, dos al segundo y así sucesivamente. Posteriormente, se sumaron las calificaciones de los cuatro indicadores evaluados para cada modelo. Los modelos de menor sumatoria en la calificación fueron los seleccionados para explicar la relación de la BT y el carbono (Ca) en función de las variables explicativas en *Albizia carbonaria*, en su fase inicial de crecimiento vegetativo. Los procedimientos estadísticos se realizaron con el software gratuito R-Studio (RStudio Team, 2020).

### III. Resultados y Discusión

En todas las correlaciones entre todas las variables, a excepción de TRC y NH, el grado de asociación es alto, con correlaciones que oscilan entre 0,74 y 1. La asociación perfecta entre carbono (Ca) y BT se explica, porque la primera es derivada de la segunda, tal como se indicó en la metodología. La correlación como regresión es esencial para poder predecir patrones. Un patrón es una tendencia establecida de tipo ascendente, descendente o constante (Guillen et al., 2014). En este caso, las variables de crecimiento de *A. carbonaria* medidas a través del tiempo muestran la misma magnitud de covarianza entre ellas. La covarianza determina si los valores de una característica cambian consistentemente conforme a los de la otra, o si, por el contrario, no hay ningún patrón que las asocie (Hernández et al., 2018). Por lo visto, en esta especie los patrones de crecimiento en la fase de crecimiento vegetativo están relacionados en la magnitud de su covarianza, aunque el tipo de relación es explicado por los modelos de regresión lineal o no lineal, los cuales se discuten más adelante.

**Tabla 1.** Análisis de correlación múltiple entre las variables de crecimiento, la biomasa total y el carbono evaluadas en *Albizia carbonaria* durante la fase inicial de crecimiento vegetativo

Variable	T	AP	DIA	NH	NR	DAP	BT	TAC	TRC	Ca
T	1									
AP	0,97*	1								
DIA	0,97*	0,96*	1							
NH	0,78*	0,75*	0,83*	1						
NR	0,96*	0,95*	0,98*	0,74*	1					
DAP	0,97*	0,93*	0,97*	0,83*	0,96*	1				
BT	0,97*	0,91*	0,96*	0,81*	0,93*	0,97*	1			
TAC	0,97*	0,97*	0,92*	0,69*	0,93*	0,94*	0,91*	1		
TRC	0,90*	0,93*	0,87*	0,60 <sup>ns</sup>	0,88*	0,83*	0,78*	0,94*	1	
Ca	0,97*	0,91*	0,96*	0,81*	0,93*	0,97*	1,00*	0,91*	0,78*	1

\*=Correlación significativa (ha:  $r \neq 0$ ); T: tiempo en día; AP: altura de planta en cm; DIA: diámetro basal de tallo en cm; NH: número de hojas; NR: número de ramas; DAP diámetro a la altura de pecho en cm; BT =biomasa total en g; TAC: tasa absoluta de crecimiento en g/día; TRC: tasa relativa de crecimiento en g/(g.día); Ca: captura de carbono en  $(t.d.m)^{-1}$ .

## A. Crecimiento de *Albizia carbonaria*

Acorde con el análisis de correlación, la altura de planta (AP) de *A. carbonaria* está correlacionada en forma directa y positiva con las demás variables, lo cual indica que, al describir la AP, indirectamente se está explicando el comportamiento de las variables con las cuales tiene una asociación significativa (Lagos et al., 2013); por lo tanto, se discutirá la AP. La AP mantuvo un incremento continuo hasta los 540 días después de la siembra con una alta tasa de crecimiento hasta un periodo superior al año (420 días), época en que disminuye, debido a que el desarrollo de nuevas ramas hace que los fotoasimilados se distribuyan más uniformemente y se reduzcan los sustratos energéticos que llegan a la zona apical (Di Benedetto & Tognetti, 2016) (Tabla 2). La dinámica del crecimiento del diámetro basal siguió un comportamiento lineal durante los 600 días de evaluación; además, es necesario tener en cuenta que son muchos los factores que influyen en el crecimiento, aunque Van Breugel *et al.* (2007) indican que los factores más importante para el desarrollo son la precipitación y la duración del período seco (Enquist & Leffler, 2001), entre otros.

**Tabla 2.** Valores promedios de variables de crecimiento evaluadas en *Albizia carbonaria*

T	AP	TC <sub>AP</sub>	DIA	TC <sub>DIA</sub>	NH	TC <sub>NH</sub>	NR	TC <sub>NR</sub>
60	7,75+-0,35	0,13	0,22+-0,01	0,004	3,5+-0,71	0,06	0,0+-0	0,00
120	26+-1,4	0,30	0,65+-0,07	0,007	22+-1,4	0,31	0,0+-0	0,00
180	125+-7,1	1,65	1,65+-0,07	0,017	29,5+-2,1	0,13	4,5+-0,71	0,08
240	172+-50,9	0,78	2,65+-0,2	0,017	16+-2,8	-0,23	8,5+-2,1	0,07
300	173+-1,4	0,02	2,18+-0,01	-0,008	26,5+-6,4	0,18	9,0+-1,4	0,01
360	217,5+-34,6	0,74	2,55+-0,5	0,006	88,5+-2,1	1,03	8,0+-5,7	-0,02
420	315,5+-14,9	1,63	3,95+-0,35	0,023	82,5+-34,7	-0,10	14,0+-2,8	0,10
480	320+-14,4	0,08	4,05+-0,8	0,002	121+-33,9	0,64	11,5+-0,7	-0,04
540	355+-91,9	0,58	5,8+-0,85	0,029	363+-9,9	4,03	17,0+-7,07	0,09
600	335+-91,9	-0,33	5,74+-0,23	-0,001	173+-4,2	-3,17	20,0+-2,8	0,05
Media	<b>204,8+-30,9</b>	<b>0,56</b>	<b>2,94+-0,31</b>	<b>0,01</b>	<b>92,6+-9,8</b>	<b>0,29</b>	<b>10,28+-2,6</b>	<b>0,03</b>
T	DAP	TC <sub>DAP</sub>	BT	TAC	TRC	Ca	TCa	
60	0,00	0,00	0,58	0,01	-0,01	0,29	0,005	
120	0,00	0,00	5,90	0,10	0,03	2,95	0,04	
180	0,00	0,00	49,93	0,83	0,07	24,96	0,37	
240	1,10+-0,14	0,018	145,35	2,42	0,08	72,67	0,80	
300	1,25+-0,07	0,003	284,28	4,74	0,09	142,14	1,16	
360	1,55+-0,07	0,005	453,83	7,56	0,10	226,92	1,41	
420	1,85+-0,07	0,005	641,69	10,70	0,11	320,84	1,57	
480	2,2+-0,1	0,006	840,73	14,01	0,11	420,36	1,66	
540	3,3+-0,1	0,018	1049,56	17,49	0,12	524,78	1,74	
600	3,4+-0,3	0,002	1270,80	21,18	0,12	635,40	1,84	
Media	<b>2,09+-0,12</b>	<b>0,01</b>	<b>474,26</b>	<b>7,90</b>	<b>0,08</b>	<b>237,13</b>	<b>1,06</b>	

T: tiempo (días); AP: altura de planta en cm; DIA: diámetro basal de tallo en cm; NH: número de hojas; NR: número de ramas; DAP diámetro a la altura de pecho en cm; TAC = tasa absoluta de crecimiento; TRC: Tasa de crecimiento relativo; TC: tasa de crecimiento.

En la Tabla 3 se presentan los modelos de regresión evaluados en función del tiempo, para la AP, DIA, NH y TRC. El comportamiento de la variable AP se ajustó a un modelo cuadrático, el cual obtuvo la menor calificación total de los índices utilizados para seleccionar el mejor modelo de los tres evaluados. La variabilidad del DIA y el NH se explicó mejor a través del modelo lineal con una calificación total de seis y cinco, respectivamente (Figura 1). La TRC se ajustó al modelo polinomial de tercer grado. En este sentido, la biomasa de una planta durante su

etapa inicial de crecimiento tiene una fase de lento crecimiento y continúa con una fase de crecimiento acelerado hasta que la planta alcanza su etapa de madurez, cuando el crecimiento se estabiliza (Carrera, 2010).

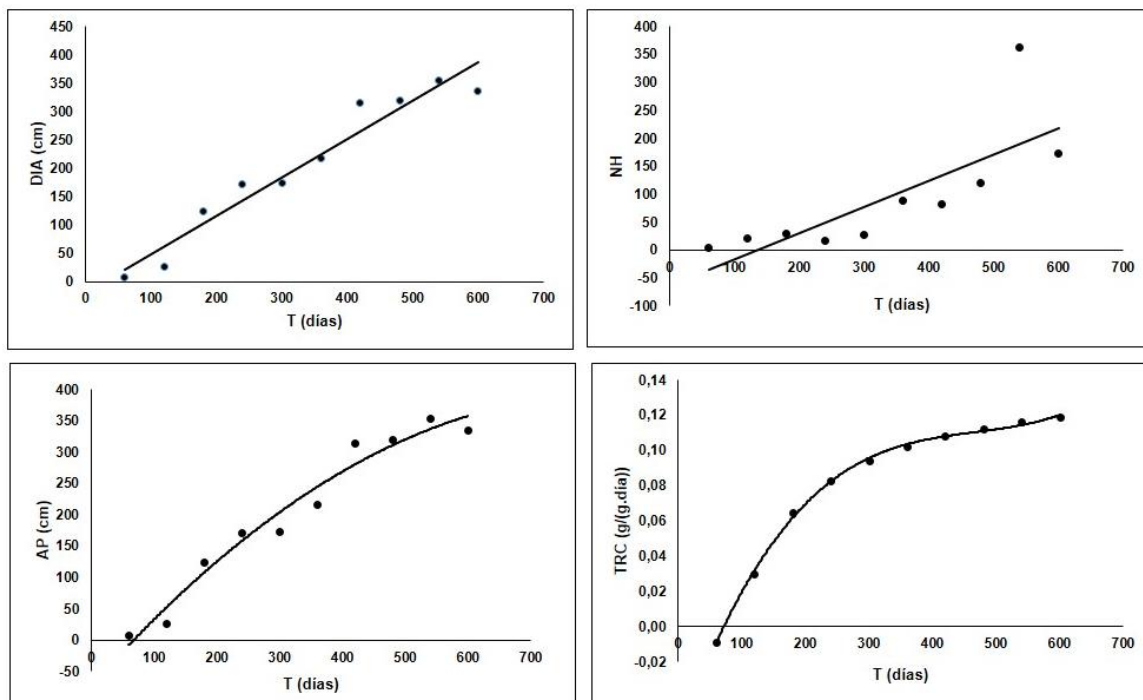
**Tabla 3.** Modelos de crecimiento para las variables altura de planta (AP), diámetro basal de tallo (DIA), diámetro a la altura de pecho (DAP), número de hojas (NH) y número de ramas (NR) evaluados en *Albizia carbonaria*

Modelos	R <sup>2</sup> a	C	CME	C	AIC	C	BIC	C	CT
<b>Lineal</b>									
AP=-18,6 <sup>ns</sup> +0,68 <sup>*</sup> T	0,93	1	1062	3	101,82	2	102,7	2	8
DIA=-0,46 <sup>ns</sup> +0,01 <sup>*</sup> T	<b>0,94</b>	<b>3</b>	<b>0,23</b>	<b>1</b>	<b>17,58</b>	<b>1</b>	<b>18,49</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
NH=-61,83 <sup>ns</sup> +0,47 <sup>*</sup> T	<b>0,55</b>	<b>2</b>	<b>0,13</b>	<b>1</b>	<b>117,96</b>	<b>1</b>	<b>118,9</b>	<b>1</b>	<b>5</b>
TRC=0,12 <sup>ns</sup> +0,47 <sup>*</sup> T	0,79	3	0,0004	3	-47,04	2	-46,1	3	11
<b>Cuadrático</b>									
AP= -7,3e+01 <sup>ns</sup> +1,13e+00 <sup>*</sup> T-6,85e-04 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )	<b>0,95</b>	<b>2</b>	<b>755</b>	<b>2</b>	<b>99,07</b>	<b>1</b>	<b>100,3</b>	<b>1</b>	<b>6</b>
DIA= -1,03e-01 <sup>ns</sup> +7,36e-03 <sup>ns</sup> T-4,46e-06 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )	0,93	2	0,25	2	18,83	2	20,04	2	8
NH= 15,1 <sup>ns</sup> -0,17 <sup>ns</sup> T+0,001 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )	0,57	3	5170	2	118,32	2	119,5	2	9
TRC= -3,6e-02 <sup>*</sup> +6,14e-03 <sup>*</sup> T-6,12e-06 <sup>*</sup> (T <sup>2</sup> )	0,97	2	4,9e-05	2	-66,39	3	-65,2	2	9
<b>Polinómico cúbico</b>									
AP= -2,84e+01 <sup>ns</sup> +4,7e-01 <sup>ns</sup> T+1,7e-03 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )-2,4e-06 <sup>ns</sup> (T <sup>3</sup> )	0,95	2	7,42	1	99,36	2	100,9	3	8
DIA= -6,2e-01 <sup>ns</sup> +1,5e-02 <sup>ns</sup> T-2,31e-05 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )-2,8e-08 <sup>ns</sup> (T <sup>3</sup> )	0,92	1	0,27	3	20,2	3	21,7	3	10
NH= -7,6e+01 <sup>ns</sup> -1,1e-00 <sup>*</sup> T-4,2e-03 <sup>ns</sup> (T <sup>2</sup> )-3,3e-06 <sup>ns</sup> (T <sup>3</sup> )	0,51	1	5771	3	119,9	3	121,4	3	10
TRC= -6,32e-02 <sup>*</sup> +1,0e-03 <sup>*</sup> T-2,09e-07 <sup>*</sup> (T <sup>2</sup> )+1,5e-09 <sup>*</sup> (T <sup>3</sup> )	<b>0,99</b>	<b>1</b>	<b>4,1e-06</b>	<b>1</b>	<b>-90,76</b>	<b>1</b>	<b>-89,2</b>	<b>1</b>	<b>4</b>

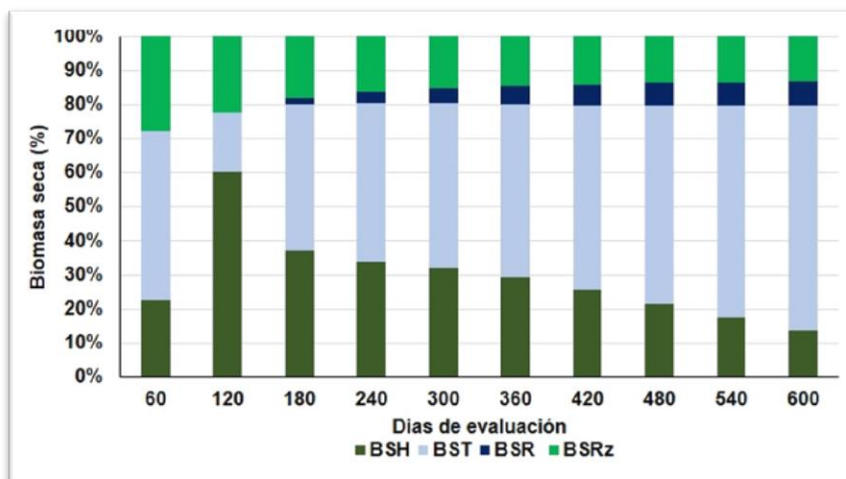
AP: altura de planta; DIA: diámetro basal de tallo; NH: número de hojas; TRC= tasa relativa del crecimiento; T: tiempo; ns = no significativo; \*: significativo (p<0,05); R<sup>2</sup>a: coeficiente de determinación ajustado; CME: cuadrado medio del error; C: calificación del índice de calidad del modelo; CT: calificación total.

El crecimiento expresado en peso fresco obtenido a lo largo del tiempo mostró que en las evaluaciones dos, tres y cuatro, las hojas representaron el mayor aporte al peso total de la planta, el cual osciló entre 54,2 y 72,9%, mientras que en el resto de las evaluaciones el componente que hizo el mayor aporte a la biomasa total de la planta fue el tallo (superior al 50,3%). La contribución de la biomasa de ramas durante el tiempo de evaluación fue inferior al 7,7%. En cuanto a la distribución de la biomasa seca total de la planta, en el 90% de las evaluaciones, el mayor peso lo llevó la biomasa seca del tallo, con aportes superiores al 50% después del primer año, seguido de los componentes hojas, raíces y ramas (Figura 2).

Esto concuerda con Villar *et al.* (2008), quienes afirman que la producción de biomasa en la planta varía de acuerdo con el desarrollo ontogenético. Además, indican que, en el estado de plántula, las especies leñosas tienen una proporción del 40% en biomasa foliar sobre el peso total, mientras que en árboles y arbustos adultos, la mayor parte de biomasa está en forma de tallos (tronco y ramas).



**Figura 1.** Modelos de crecimiento a lo largo del tiempo de la altura de planta (AP), diámetro basal del tallo (DIA), número de hojas (NH) y tasa relativa de crecimiento relativo (TRC) en *Albizia carbonaria*.



**Figura 2.** Distribución del peso seco (biomasa) de hojas (BSH), tallos (BST), ramas (BSR) y raíces (BSRz) de la especie *Albizia carbonaria* a lo largo del tiempo

Respecto a la tasa relativa de crecimiento relativo (TRC), se observó un incremento constante de la biomasa por unidad de biomasa por unidad tiempo, ajustado a un modelo de tipo polinomial de segundo y tercer grado (Tabla 3; Figura 1), lo cual concuerda con Villar *et al.* (2008) cuando afirman que durante los primeros estadios de una planta el contenido de biomasa suele tener una dinámica exponencial.

### B. Captura de carbono de *Albizia carbonaria*

La estimación de la biomasa y la captura de carbono en especies forestales son variables de difícil medición; de ahí la importancia de los modelos matemáticos que permiten calcular dichas variables sin tener que recurrir a la tala de árboles para su determinación. Los cálculos se basan en la correlación que puede existir entre variables de difícil medición (biomasa) y aquellas que pueden medirse directamente y con facilidad, como altura planta, diámetro basal y diámetro a la altura de pecho (Álvarez, 2008).



Es importante resaltar que la captura de carbono puede aumentar durante la fase de crecimiento del árbol (Tabla 2) y disminuir después de la senescencia, cosecha o quema (Kim et al., 2016). Según Hergoualch *et al.* (2012) y De Carvalho *et al.*, (2016), el almacenamiento de carbono depende de la especie, de las condiciones climáticas, de la densidad de siembra, de la capacidad de descomposición y de la presencia de actividad microbiana.

En el caso de *A. carbonaria*, la mayor cantidad de captura de carbono (Ca) correspondió al acumulado en el tallo con un 49,67%, seguido del follaje con un 29,37%, raíces con un 16,81%; mientras que las ramas aportaron un 5,18% al total de carbono almacenado por la especie. Acorde con el proceso de selección de variables (Tabla 4), las variables que se consideraron en la selección de modelos fueron el DIA y la AP, dado que mostraron dentro del último modelo (P4) los menores valores de AIC. El T no presentó significancia en la hipótesis nula que considera el valor del parámetro igual a cero, por tal razón no fue incluido en el proceso de selección de las ecuaciones alométricas.

**Tabla 4.** Proceso de selección paso a paso de variables para la selección de modelos que expliquen el ajuste de la biomasa total (BT) y el contenido de carbono (Ca) cuál es la “mejor” expresión posible del modelo entre todas aquellas que fueron ajustadas

BT Variable	Modelo P1 (AIC=98,91)		Modelo P2 (AIC=96,91)		Modelo P3 (AIC=95,32)		Modelo P4 (AIC=94,14)	
	SCR	AIC	SCR	AIC	SCR	AIC	SCR	AIC
NH	48702	96,90						
DAP	50240	97,22	50752	95,32				
NR	50878	97,35	53542	95,86	55107	94,15		
DIA	53043	97,76	57819	96,63	69141	96,41	69851	94,52
AP	69030	100,40	69086	98,41	89923	99,04	95965	97,69
T	89780	103,03	92901	101,37	162427	104,95	162447	102,96
<b>Modelo para BT</b>								
BT=-337,67+3,08T-2,32AP+93,93DIA; R <sup>2</sup> = 0,97; R <sup>2</sup> a = 0,96 ; EER = 95,84								
Ca Variable	Modelo P1 (AIC=85,05)		Modelo P2 (AIC=83,05)		Modelo P3 (AIC=81,46)		Modelo P4 (AIC=80,28)	
	SCR	AIC	SCR	AIC	SCR	AIC	SCR	AIC
NH	12176	83,01						
DAP	12560	83,36	12688	81,46				
NR	12720	83,48	13385	81,99	13777	80,28		
DIA	13261	83,90	14455	82,76	17285	82,55	17463	80,65
AP	17258	86,53	17272	84,54	22481	85,18	23991	83,83
T	22445	89,16	23225	87,50	40607	91,09	40612	89,09
<b>Modelo para Ca</b>								
Ca=-168,83+1,53T-1,16AP+46,96DIA; R <sup>2</sup> = 0,97; R <sup>2</sup> a = 0,96; EER = 47,9								

BT: biomasa total; Ca: carbono; AP: altura de planta; DIA: diámetro basal de tallo; NH: número de hojas; NR: número de ramas; DAP: diámetro a altura de pecho; T: tiempo; R<sup>2</sup>a: coeficiente de determinación ajustado; EER = error estándar residual tasa relativa del crecimiento.

### C. Modelos alométricos para biomasa total y carbono de *Albizia carbonaria*

Las variables seleccionadas para determinar los modelos alométricos fueron la AP y el DIA. Los valores absolutos de la AP oscilaron entre 7,75+-0,35 y 335+-91,9 cm con una tasa de crecimiento (TC) promedio de 0,6 cm/día. El rango del DIA osciló entre 0,22+-0,01 y 5,74+-0,2 cm con una TC de 0,01 cm/día, mientras que los promedios de la BT estuvieron entre 0,58 y 1270,80 g con una TAC de 7,9 g/día y una TRC de 0,08 g/(g.día) (Tabla 2). La mayor cantidad de BT correspondió a la acumulada en el tallo, con porcentajes que variaron entre 42,8% y 66,29%, a excepción de la evaluación dos, donde presentó un 17,34%. El contenido de Ca de *A. carbonaria* en los primeros 600 días de crecimiento vegetativo osciló entre 0,29 y 635,45 (t d.m)<sup>-1</sup> con una tasa de crecimiento promedio de 1,06 (t d.m)<sup>-1</sup>/día. Acorde con Hunt (1990), la TAC corresponde a tasas simples de

cambio que involucran solo una variable de la planta y al tiempo (T), en este caso, la BT; mientras que la TRC incumbe a tasas de cambio más completas, pero aun así, involucra una sola variable de la planta con relación al T y concierne a la tasa de incremento de la BT por unidad de peso seco. Al existir una alta correlación entre la BT, la TAC, la TRC, el Ca y el T, los modelos alométricos se probaron con la BT y Ca en función de la AP y el DIA (Tabla 5).

Los modelos alométricos (Tabla 5) presentaron coeficientes de determinación ajustados ( $R^2a$ ) por encima de 0,88, lo cual indica un alto porcentaje de explicación de la variación de la BT y Ca debido a las ecuaciones evaluadas, que consideran una o dos variables (DIA y/o AP). El tener solo una o dos variables en los modelos, es una ventaja, dado que reduciría los costos de inventarios de biomasa y carbono (Fonseca et al., 2013) en *A. carbonaria*.

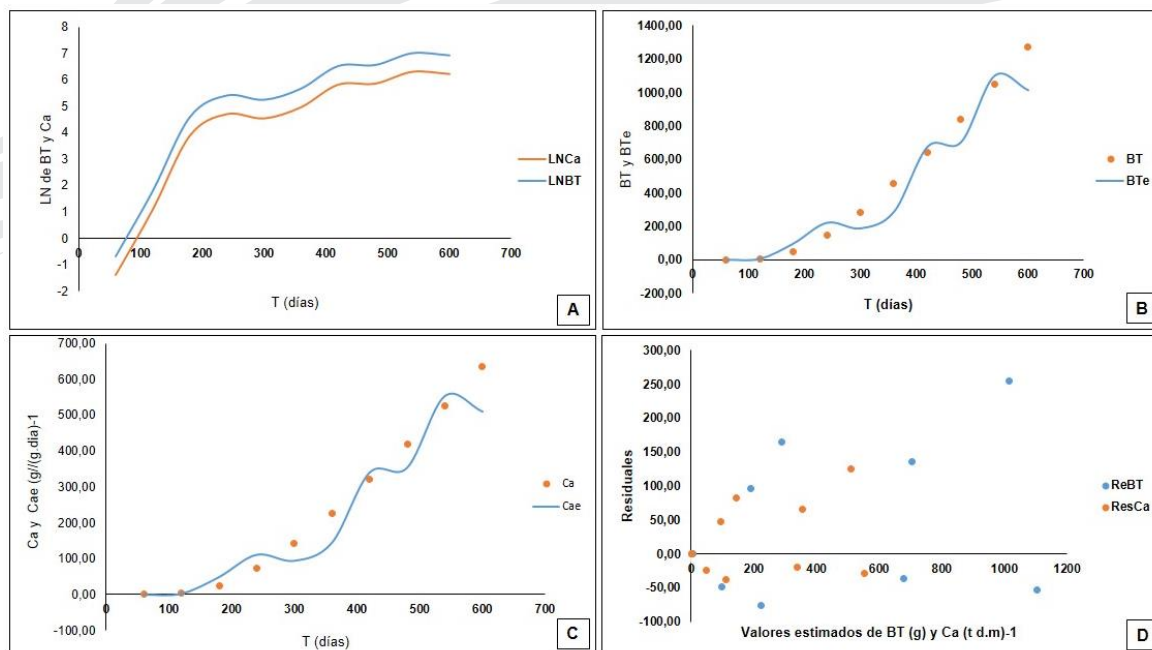
El mejor modelo que explica la BT y el Ca en función del DIA fue el de Husch con una calificación total de ocho, y en función del DIA y la AP fue el de Shumacher-Hall (Figura 3), el cual obtuvo la menor calificación total de los modelos probados (Tabla 5). Según Solano *et al.* (2014) y Carrillo *et al.* (2016), la altura de planta es una variable de difícil medición cuando el árbol alcanza una altura considerable, ya que se pueden cometer errores y se necesita de un mayor tiempo para su medición; por lo tanto, en los primeros estados de desarrollo de la planta se puede asumir cualquiera de los modelos antes mencionados para estimar tanto la BT como el Ca.

**Tabla 5.** Selección de modelos para la biomasa total (BT) y el contenido de carbono (Ca) de *Albizia carbonaria* en los primeros 600 días de crecimiento vegetativo en función de las variables seleccionadas diámetro basal (DIA) y altura de planta (AP)

Modelo alométrico	CME		$R^2a$		AIC		BIC		CT
	Valor	C	Valor	C	Valor	C	Valor	C	
<b>Berkhout</b>									
BT = $-196,5+227,8DIA$	20379	4	0,91	3	131,37	5	132,28	5	17
Ca = $-98,23+113,9DIA$	5095	3	0,91	3	117,51	3	118,41	3	12
<b>Husch</b>									
BT = $3,10+2,42\ln DIA$	0,22	2	0,97	2	16,85	2	17,76	2	8
Ca = $2,4+2,42\ln DIA$	0,22	2	0,97	2	16,85	2	17,76	2	8
<b>Spurr</b>									
BT = $119,24+0,1DIA^2*AP$	24700	6	0,88	4	133,29	6	134,20	6	22
Ca = $59,62+0,05DIA^2*AP$	24437	5	0,88	4	119,43	4	120,34	4	17
<b>Schumacher-Hall</b>									
lnBT = $1,94+0,88\ln DIA+1,26\ln AP$	0,16	1	0,98	1	14,43	1	15,64	1	4
lnCa = $2,63+0,88\ln DIA+1,26\ln AP$	0,16	1	0,98	1	14,43	1	15,64	1	4

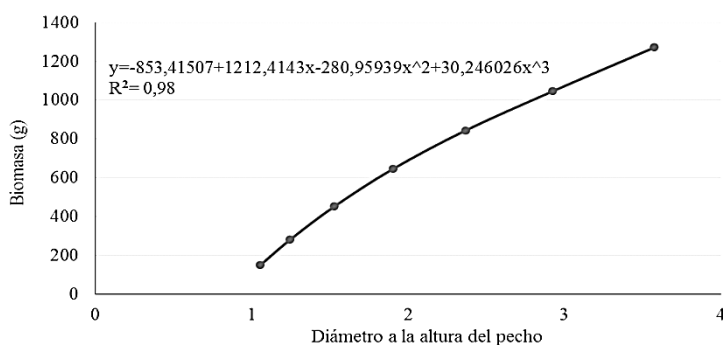
ln= logaritmo natural; CME: cuadrado medio del error;  $R^2a$ : coeficiente de determinación ajustado; C: calificación del índice de calidad del modelo; CT: calificación total.

En otras especies como *Quercus magnoliaefolia* (Gómez-Díaz et al., 2011), la biomasa fue explicada solamente por el área basal (AB), lo cual es semejante a lo encontrado en este estudio, en donde la BT se puede explicar por el DIA, tal como se observa en la Tabla 5. Ahora bien, con base en las figuras 3A-C, se observa el mismo comportamiento de BT y Ca, lo cual se debe a la correlación perfecta dada por la estimación del Ca en función del BT. La relación de los residuales versus los valores estimados de BT y Ca (Figura 3D), indica una tendencia a aumentar la varianza a medida que el árbol crece. En los primeros estados de desarrollo hay una reducción de la varianza, aunque el comportamiento de la varianza es heterogéneo a lo largo del tiempo.



**Figura 3.** Modelo de Schumacher-Hall (S-H) para la biomasa seca total (BT) y el contenido de carbono (Ca) de *Albizia carbonaria* en función del diámetro de tallo (DIA) y la altura de planta (AP). A: curvas ajustadas; B: dispersión de los promedios absolutos de BT y la cueva ajustada de S-H; C: dispersión de los promedios absolutos de BT y la cueva ajustada de S-H; D: dispersión de los residuales versus valores estimados de BT y Ca.

El DAP (Figura 4) es una variable que frecuentemente se correlaciona con la biomasa y es la de más fácil medición en campo, ya que la altura y otras variables son menos precisas de identificar y medirlas (Solano et al., 2014). El comportamiento de la función DAP-BT presentó un modelo de tipo exponencial con un nivel de ajuste ( $R^2$ ) del 0,98. Según Fonseca et al. (2013), DAP es la variable que más frecuentemente se correlaciona con la biomasa y es la más fácil de identificar (1,30 m del suelo) y de medir.



**Figura 4.** Comportamiento de la biomasa seca total de *Albizia carbonaria* en función del diámetro a la altura de pecho.

En las tres relaciones establecidas se obtuvieron valores de correlaciones significativas, lo que coincide con Segura et al. (2005) y Segura et al. (2006), cuando afirman que al combinarse las variables altura de planta, altura comercial y DAP, se obtienen modelos que se ajustan bien a los datos, y cuando se utilizan ecuaciones de dos o más variables se consiguen estimaciones de biomasa más exactas.

Los modelos determinados sirven para pronosticar la biomasa de la especie en una superficie forestal específica. Como lo indica la FAO (2013), las ecuaciones relativas al árbol expresan la biomasa como una función de las dimensiones de este (altura y diámetro).

## V. Conclusiones

---

El número de hojas por planta y el diámetro basal del tallo de *A. carbonaria* se ajustaron al modelo lineal; la altura de planta, al modelo cuadrático; la tasa relativa de crecimiento, a un polinomio tercer grado; modelos que obtuvieron calificaciones sobresalientes en el coeficiente de determinación, cuadrado medio del error, AIC y BIC.

La biomasa seca total y el contenido de carbono de *A. carbonaria* durante los primeros 600 días de crecimiento vegetativo, puede determinarse con base en las variables diámetro basal del tallo y/o altura de la planta mediante los modelos Husch y Shumacher-Hall, los cuales fueron seleccionados por bajos valores de cuadrado medio del error, AIC y BIC y altos coeficientes de determinación. El tallo fue la fuente de la biomasa seca total de *A. carbonaria*, con porcentajes superiores al 50 %, después del primer año.

## Agradecimientos

---

El Grupo de Investigación en Producción de Frutales (GPFA) desea expresar su sentimiento de dolor y tristeza por la partida del autor principal de este artículo, el Dr. Hernando Criollo Escobar (QEPD), a quien le profesamos nuestra gratitud eterna por sus contribuciones al desarrollo científico del grupo y de la Universidad de Nariño. Los autores agradecen al GPFA el proyecto “Investigación evaluación del efecto de sombra de diferentes especies arbóreas en el comportamiento agronómico y calidad de Café, Consacá, Nariño, Occidente”, financiado por el SGR, por haber apoyado la realización de esta investigación.

## Referencias

---

Alegre, J., Arévalo, L., Guzmán, W. & Rao, M. (2000). Barbechos mejorados para intensificar el uso de la tierra en los trópicos húmedos de Perú. *Agroforestería en las Américas*, 7(27), 7-12.

Álvarez, G. (2008). *Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia*. (Tesis de maestría). CATIE, Turrialba, Costa Rica. [http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4357/Modelos\\_alometricos\\_para\\_la\\_estimacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4357/Modelos_alometricos_para_la_estimacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

Avilés, G. (2017). *Análisis filogenético de las especies americanas de Albizia*. (Tesis para título de Maestro en Ciencias). Ciencias Biológicas: Opción Recursos Naturales. Centro de investigación científica Yucatán. Yucatán, México.

Bernal, R., Galeano, G., Rodríguez, A., Sarmiento, H. & Gutiérrez, M. (2012). Carbonero gigante (*Albizia carbonaria*). En *Nombres comunes de las plantas de Colombia*. <http://www.biovirtual.unal.edu.co/nombrescomunes/es/resultados/ncientifico/Albizia%20carbonaria/>.

Carrera, V. (2010). *Almacenamiento de carbono en plantaciones forestales de balsa (Ochroma lagopus Sw.) ubicadas en las regiones de Chimoré, Mariposas y Puerto Villarroel Subtrópico de Cochabamba-Bolivia*. Universidad Mayor de San Simón, Vicerrectorado, Centro de Levantamientos Aeroespaciales y Aplicaciones SIG para el Desarrollo Sostenible de los Recursos Naturales Cochabamba.

Carrillo, F., Acosta, M., Jiménez, C., Gonzales, L. & Etchevers, J. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Rev, Mex, Cienc, Agríc*, 7(3), 681-691. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-09342016000300681&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-09342016000300681&lng=es&nrm=iso&tlng=es).

Cordero, J., Boshier, D., Barrance, A., Beer, J., Boshier, D., Chamberlain, J., Cordero, J., Detlefsen, G., Finegan, B., Galloway, G., Gómez, M., Gordon, J., Hands, M., Hellin, J., Hughes, C., Ibrahim, M., Kass, D., Leakey, R., Mesén, F., Montero, M., Rivas, C., Somarriba, E., Stewart, J. & Pennington, T. (2003). *Árboles de Centroamérica: un manual para extensionistas*. Oxford Forestry Institute.

De Carvalho, L., Cardoso, M., De Sá Mendonça, E., Fernández, A., López S. & Oliveira, S. (2016). Trees Modify the Dynamics of Soil CO<sub>2</sub> Efflux in Coffee Agroforestry Systems. *Rev, Agricultural and Forest Meteorology*, 224(1), 30-39. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.05.001>.

Di Benedetto, A. & Tognetti, J. (2016). *Técnicas de análisis de crecimiento de plantas: su aplicación a cultivos intensivos*. [http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/revisiones/di-benedetto-castellano-4\\_1.pdf](http://ria.inta.gob.ar/sites/default/files/revisiones/di-benedetto-castellano-4_1.pdf).

Enquist, B. & Leffler, A. (2001). Long-term Tree Ring Chronologies from Sympatric Tropical Dry-Forest Trees: Individualistic Responses to Climatic Variation. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 41-60.

Espinoza-Domínguez, W., Krishnamurthy, L., Vázquez-Alarcón, A. & Torres-Rivera, A. (2012). *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 18(1), 57-70. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2011.04.030>. <https://www.researchgate.net/publication/262620739>.

Farfán, F. (2007). *Sistemas de producción de café en Colombia producción de café en sistemas agroforestales*. Cenicafé, FNC. [https://www.cenicafe.org/es/publications/sistemas\\_de\\_produccion.pdf](https://www.cenicafe.org/es/publications/sistemas_de_produccion.pdf).

Farfán, F. (2012). *Árboles con potencial para ser incorporados en sistemas agroforestales con café*. Cenicafé.

Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M. & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales (Trop J Environ Sci)*. 46(2), 37-50. <http://dx.doi.org/10.15359/rca.46-2.4>

Food and Agriculture Organization -FAO-. (2010). *Antología de conocimiento para la evaluación de los recursos forestales nacionales. Recreaciones para estimación y supervisión*. [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/national\\_forest\\_assessment/images/PDFs/Spanish/kr2\\_es\\_10\\_.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/national_forest_assessment/images/PDFs/Spanish/kr2_es_10_.pdf).

Gargaglione, V., Peri, P. & Rubio, G. (2010). Allometric Relations for Biomass Partitioning of *Nothofagus Antarctica* Trees of Different Crown Classes over a Site Quality Gradient. *Forest Ecol. Manag*, 259(6), 1118-1126.

Gómez-Díaz, J.D., Etchevers-Barra, J.D., Monterrosos-Rivas, A.I., Campo-Alvez, J. & Tinoco-Rueda, J.A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 17(2), 261-272.

Guapucal, M., Burbano, C. & Estacio, L. (2013). Caracterización de fincas con sistemas agroforestales tradicionales en la vereda Franco Villa, municipio de Buesaco, Nariño. *Agroforestería Neotropical*, (3).

Guillen, A., Badii, M.H. & Acuña, M.S. (2014). Aplicación de correlación en la investigación. *International Journal of Good Conscience*, 9(2), 18-23.

Hergoualch, K., Blancart, E., Skiba, U., Henault, C. & Harmand, J. (2012). Changes in Carbon Stock and Greenhouse Gas Balance in Coffee (*Coffea arabica*) Monoculture Versus an Agroforestry System with *Inga densiflora* in Costa Rica. *Revista Agric Ecosyst Environ*, 148(1), 102–110.

Hernández, J.D., Espinosa, J.K., Peñaloza, M.E., Rodríguez, J.E., Chacón, J.G., Toloza, C.A., Arenas, M.K., Carrillo, S.M., Bermúdez, V.J. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5), 592-595.

Houghton, R. (2005). Aboveground Forest Biomass and the Global Carbon Balance. *Global Change Biology*, 11(6), 945-958.  
file:///C:/Users/USUARIO/Downloads/Aboveground\_Forest\_Biomass\_and\_the\_Global\_Carbon\_B.pdf.

Hunt, R. (1978). *Plant Growth Analysis*. Edward Arnold Publishers.

Hunt, R. (1990). *Basic Growth Analysis: Plant Growth Analysis for Beginners*. Unwin Hyman.

Kim, D., Thomas, A., Pelster, D., Rosenstock, T. & Sanz, A. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Natural Ecosystems and Agricultural Lands in Sub-Saharan Africa: Synthesis of Available Data and Suggestions for Further Research. *Biogeosciences*, 13, 4789-4809. <https://doi.org/10.5194/bg-13-4789-2016>

Kurz, W., Beukema, S. & Apps, M. (1996). Estimation of Root Biomass and Dynamics for the Carbon Budget Model of the Canadian Forest Sector. *Can. J. Forest Res*, 26(11), 1973-1979.

Lagos, L.K., Vallejo, F.A., Lagos, T.C. & Duarte, D.E. (2013). Correlaciones genotípicas, fenotípicas y ambientales, y análisis de sendero en tomate de árbol (*Cyphomandra betacea* Cav. Sendt.). *Acta Agronómica*, 62(3), 215- 222.

Murgueitio, E., Uribe, F., Molina, C., Molina, E., Galindo, W., Chará, J., Flores, M., Giraldo, C., Cuartas, C., Naranjo, J., Solarte, L. & González, J. (2016). *Establecimiento y manejo de sistemas silvopastoriles intensivos con leucaena*. Editorial CIPAV. <http://www.cipav.org.co/emssil/SSPiLeucaena.pdf>.

Ortiz, A., Riascos, L. & Somarriba, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). *Agroforestería en las Américas*, (46), 26-29. [https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files\\_mf/ortiz2008.pdf](https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/ortiz2008.pdf).

Peng, S., Piao, S., Wang, T., Sun, J. & Shen, Z. (2009). Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(5), 1008-1014.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendía, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. & Wagner, F. (2003). *Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry*. Institute for Global Environmental Strategies.

Picard, N., Saint-André, L. & Henry, M. (2012). *Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción*. CIRAD-FAO.

Ramachandran, N. & Nair, V. (2014). Solid-fluid-gas: The State of Knowledge on Carbon Sequestration Potential of Agroforestry Systems in Africa. *Rev. Current Opinion in Environmental Sustainability*, 6, 22-27.

Ramírez, E. & Calvo, J.C. (2003). Caracterización de los sistemas agroforestales con café en el área de amortiguamiento de la reserva de biosfera La Amistad, Pejibaye de Jiménez, Costa Rica. *Agroforestería en las Américas*, 10(37-38), 69-73.

RStudio Team. (2020). *RStudio: Integrated Development for RStudio*. PBC. <http://www.rstudio.com/>

Santibáñez, E. (2014). Captura y almacenamiento de carbono para mitigar el cambio climático: modelo de optimización aplicado a Brasil. *Rev. Inst. Contam. Ambie*, 30(3), 235-245.

Segura, M. & Andrade, H.J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*, (46), 89-96.

Segura, M., Kanninen, M., Alfaro, M. & Campos, J. (2005). Almacenamiento y fijación de carbono en bosques de bajura de la zona atlántica de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 6.

Segura, M., Kanninen, M. & Suárez, D. (2006). Allometric Models for Estimating Aboveground Biomass of Shade Trees and Coffee Bushes Grown Together. *Agroforest Systems*, 68, 143-150.

Solano, D., Vega, C., Eras, V. & Cueva, K. (2014). Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador. *Cedamaz*, 4(1). <https://revistas.unl.edu.ec/index.php/cedamaz/article/view/227>.

Uribe, E. (2015). *Estudios del cambio climático en América Latina, El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América Latina*. Cepal. [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295\\_en.pdf;jsessionid=EB0A737262F9AC72B521059A66CF33A7?sequence=1](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39855/S1501295_en.pdf;jsessionid=EB0A737262F9AC72B521059A66CF33A7?sequence=1).

Van Breugel, M., Bongers, F. & Martínez, M. (2007). Species Dynamics during Early Secondary Forest Succession: Recruitment, Mortality and Species Turnover. *Biotropica*, 35(5), 610-619.

Vásquez, A. & Arellano, H. (2012). *Estructura, biomasa aérea y carbono almacenado en los bosques del sur y noroccidente de Córdoba. Colombia*. <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1208/1208.0248.pdf>.

Villar, R., Ruiz, J., Quero, J., Poorter, H., Valladares, F. & Marañón, T. (2008). *Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas*. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/47933/1/Tasas%20de%20crecimiento%20en%20especies%20le%C3%B1osas.pdf>.

Villavicencio-Enríquez, L. (2013). Caracterización agroforestal en sistemas de café tradicional y rústico en San Miguel, Veracruz, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 19(1), 67-80. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-40182013000100006](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-40182013000100006).

Watzlawick, L., Sanquetta, C. & Aperecida, A. (2001). *Ecuaciones de biomasa aérea en plantaciones de Araucaria angustifolia en el sur del estado de Paraná, Brasil.* [https://www.uach.cl/externos/procarbono/pdf/simposio\\_carbono/41\\_Watzlawick.PDF](https://www.uach.cl/externos/procarbono/pdf/simposio_carbono/41_Watzlawick.PDF).

**Cómo citar este artículo:** Criollo, H., Muñoz, J. & Lagos, T. (2020). Modelos alométricos para biomasa y carbono de *Albizia carbonaria* durante la fase de crecimiento vegetativo. *Cien. Agri.* 17(3), 95-110. <https://doi.org/10.19053/01228420.v17.n3.2020.11384>