



**Crecimiento y productividad de Sistemas Agroforestales (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T) del departamento de Antioquia**

**Growth and productivity of Agroforestry systems (AFS) with cocoa in early stages of development in the tropical dry forest (T-df) of the department of Antioquia**

**María Damaris Agudelo Berrío**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Medellín, Colombia  
2016

**Crecimiento y productividad de Sistemas Agroforestales (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T) del departamento de Antioquia**

**María Damaris Agudelo Berrío**

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ciencias Agrarias**

Director:  
Doctor Enrique Guillermo Martínez Bustamante

Codirector:  
Doctor Guillermo Antonio Correa Londoño

Línea de Investigación:  
Plantaciones Agrícolas Tropicales

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agrarias  
Medellín, Colombia  
2016

*Dedicatoria*

*A Dios por ser mi guía en todas las metas forjadas  
A mi familia, en especial a mis hijos que son la inspiración de mi vida  
A todos mis amigos y profesores tutores, por todo el apoyo incondicional*

## **Agradecimientos**

La realización de esta investigación no hubiese sido posible sin la ayuda, colaboración, asesoramiento y buen consejo de las siguientes Personas:

Profesor Enrique Guillermo Martínez Bustamante.

Profesor Guillermo Antonio Correa Londoño

Grupo de Investigación en Ecofisiología Agraria – ECOFIAGRO

Carlos Hernán Escobar Ramírez, I.A

Juan José Guerra Hincapié, I.A

Martín Rodrigo Villa, I.A

Estación Agraria Cotové, Santa Fe de Antioquia  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

Laboratorio de Fisiología Vegetal  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

## **Colaboradores**

ESTACIÓN AGRARIA COTOVÉ  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

LABORATORIO DE FISIOLOGÍA VEGETAL  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

CARLOS HERNÁN ESCOBAR RAMÍREZ, I.A  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

JUAN JOSÉ GUERRA HINCAPIÉ, I.A  
Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín

# Contenido

Lista de Figuras.....	iv
Lista de Tablas .....	vi
Lista de Símbolos y Abreviaturas .....	xi
Resumen .....	xii
Abstract .....	xiv
Introducción .....	1
Pregunta de investigación .....	9
Hipótesis .....	9
Objetivos .....	10
Capítulo 1. Crecimiento alométrico del Sistema Agroforestal (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T).....	11
1.1. Marco teórico.....	11
1.1.1. Sistemas Agroforestales con cacao.....	11
1.1.2. Condiciones agroecológicas para el cultivo de cacao.....	14
1.1.3. Crecimiento alométrico de las especies vegetales.....	16
1.2. Materiales y métodos.....	17
1.2.1. Localización.....	17
1.2.2. Suelos.....	17
1.2.3. Material vegetal.....	17
1.2.4. Diseño experimental.....	18
1.2.5. Variables de evaluación.....	19
1.2.5.1. Crecimiento y desarrollo.....	19
1.2.5.2. Acumulación de la fitomasa.....	21
1.3. Resultados .....	23
1.3.1. Crecimiento alométrico del cacao durante su fase vegetativa.....	23
1.3.1.1. Análisis de las variables alométricas.....	23
1.3.1.2. Modelo de crecimiento ajustado para el cacao.....	25
1.3.1.3. Acumulación de la fitomasa del cacao en su fase vegetativa.....	30
1.3.1.4. Modelo ajustado para biomasa del cacao.....	34

1.3.2. Crecimiento alométrico del plátano durante su primer ciclo productivo	43
1.3.2.1. Análisis de las variables alométricas del plátano.....	43
1.3.2.2. Modelo ajustado para el crecimiento del plátano.....	46
1.3.2.3. Acumulación de la fitomasa del plátano.....	52
1.3.2.4. Modelo ajustado para biomasa del plátano.....	55
1.3.3. Crecimiento alométrico de melina durante la fase vegetativa del cacao..	62
1.3.3.1. Análisis de las variables alométricas.....	62
1.3.3.2. Modelo de crecimiento ajustado para melina .....	65
1.3.3.3. Acumulación de la fitomasa de la melina.....	68
1.3.3.4. Modelo ajustado para biomasa de la melina.....	70
1.4. Discusión.....	78
Conclusiones.....	83
Capítulo 2. Productividad del Sistema Agroforestal (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T).....	86
2.1. Marco teórico.....	86
2.2. Materiales y métodos.....	90
2.2.1. Localización.....	90
2.2.2. Suelos.....	90
2.2.3. Material vegetal.....	90
2.2.4. Diseño experimental.....	91
2.2.5. Variables de productividad del SAF.....	92
2.2.5.1. Aporte de biomasa de las especies que conforman el SAF con cacao...	92
2.2.5.2. Cantidad de Carbono, CO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> capturado por el SAF cacao.....	93
2.2.5.3. Cuantificación de la cosecha de plátano hartón.....	93
2.2.5.4. Volumen de madera de la especie melina .....	94
2.3. Resultados .....	95
2.3.1. Aporte de biomasa de las especies que conforman el SAF.....	95
2.3.2. Cantidad de Carbono, CO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> capturado por el SAF cacao .....	96
2.3.3. Cuantificación de la cosecha de plátano Hartón como aporte al SAF cacao .....	98
2.3.4. Volumen de madera para la especie melina .....	99
2.3.5. Modelo ajustado para el volumen de madera de melina.....	100

2.4. Discusión.....	103
Conclusiones.....	104
Bibliografía.....	105

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1.</b> Evolución crecimiento alométrico del cacao (según el modelo de Gompertz) durante la fase vegetativa e inicio de la productiva en el bosque seco tropical (bs-T). Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013.....	29
<b>Figura 1.2.</b> Evolución de la acumulación de biomasa en los diferentes órganos del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.): Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Total en las diferentes edades de su fase juvenil, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	38
<b>Figura 1.3.</b> Distribución de la biomasa del cacao, en su fase juvenil, en proporciones, por órgano, en porcentaje de materia seca, en el bs-T, Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013.....	40
<b>Figura 1.4.</b> Área foliar para la especie cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.), en cm <sup>2</sup> en su fase juvenil en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2011-2013.....	41
<b>Figura 1.5.</b> Modelo ajustado para Biomasa total en función de Área foliar en cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.), durante la fase juvenil en el bs-T de la Estación Agraria Cotové.....	42
<b>Figura 1.6.</b> Número de puyones producidos por edades en el primer ciclo productivo del plátano. Estación Agraria Cotové 2012.....	45
<b>Figura 1.7 (a)</b> Evolución del crecimiento del plátano para variables alométricas: Altura de la planta, número de puyones y diámetro delseudotallo en el bs-T en la estación agraria Cotové .....	50
<b>Figura 1.7 (b)</b> Evolución del crecimiento del plátano para variables alométricas: Hojas totales, hojas presentes y área foliar, en el bs-T en la estación agraria Cotové .....	51
<b>Figura 1.8 (a)</b> Acumulación de la biomasa del plátano en los órganos: Raíces, corno yseudotallo de acuerdo a las diferentes edades del ciclo productivo.....	58
<b>Figura 1.8 (b)</b> Acumulación de la biomasa del plátano en los órganos: Hojas, puyones, y biomasa total de acuerdo a las diferentes edades del ciclo productivo.	59

<b>Figura 1.9.</b> Distribución de la biomasa del plátano en su primer ciclo productivo, en proporciones, por órgano, en porcentaje de materia seca, en el bs-T, Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013.....	61
<b>Figura 1.10</b> Evolución del crecimiento de melina según variables alométricas, durante la fase juvenil del SAF cacao en el bs-T.....	67
<b>Figura 1.11 (a)</b> Acumulación de la biomasa de melina en los órganos: Raíces, fuste y hojas de acuerdo a las diferentes edades en el bs-T .....	74
<b>Figura 1.11 (b)</b> Acumulación de la biomasa de melina en los órganos: Ramas gruesas, ramas delgadas y biomasa total de acuerdo a las diferentes edades, en el bs-T.....	75
<b>Figura 1.12</b> Distribución de biomasa de melina en los distintos órganos en porcentaje, durante la fase juvenil del SAF cacao, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	77
<b>Figura 2.1</b> Acumulación de la biomasa total para las especies que conforman el SAF CACAO, melina, plátano y cacao.....	96
<b>Figura 2.2</b> Volumen de madera para la especie melina (m <sup>3</sup> ), conforme a las diferentes edades de la plantación en las condiciones del bs-T, de la Estación Agraria Cotové 2010-2013melina (m <sup>3</sup> ).....	101

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1-1.</b> Densidades poblacionales de las especies en el SAF en la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	19
<b>Tabla 1-2.</b> Análisis de varianza del comportamiento alométrico del cacao, en respuesta a la edad, tipo de maderable y densidad de población del sombrero, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	23
<b>Tabla 1-3.</b> Comparación de medias de los parámetros alométricos durante la fase vegetativa del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	24
<b>Tabla 1-4.</b> Parámetros del modelo de Gompertz para las diferentes variables alométricas del cacao, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	26
<b>Tabla 1-5.</b> Comparación de Tasas de crecimiento para las variables alométricas en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.), plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	27
<b>Tabla 1-6.</b> Valores P del análisis de varianza para la biomasa del cacao en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en el bs-T de la Estación Agraria ové 2011-2013.....	30
<b>Tabla 1-7.</b> Comparación de medias para la acumulación de la biomasa de cacao en su fase vegetativa e inicio de la productiva en cada órgano en kg en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	31
<b>Tabla 1-8.</b> Acumulación de la biomasa de cacao en su fase vegetativa e inicio de la productiva por órgano (Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y total) en g/individuo en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	33
<b>Tabla 1-9.</b> Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de biomasa del cacao, en el bs-T, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.) en las condiciones del bs-T. Estación	

Agraria Cotové. 2011- 2013.....	35
<b>Tabla 1-10.</b> Comparación de las tasas de acumulación de biomasa para las variables Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa Total en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao, ( <i>Theobroma cacao</i> L.) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	36
<b>Tabla 1-11</b> Distribución de la fitomasa del cacao, en proporciones, para los distintos órganos en las diferentes edades de su fase juvenil, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	39
<b>Tabla 1-12</b> Coeficientes de regresión lineal simple para variables Biomasa total, en función del área foliar, en cacao ( <i>Theobroma cacao</i> L.), en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2011-2013.....	42
<b>Tabla 1-13.</b> Análisis de varianza del comportamiento alométrico del plátano, en respuesta a la edad, tipo de maderable y densidad de población del sombrío, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	43
<b>Tabla 1-14.</b> Comparación de medias de los parámetros alométricos del plátano durante su primer ciclo productivo en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	44
<b>Tabla 1-15.</b> Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de crecimiento del plátano ( <i>Musa simmonds</i> ) en el bs-T, conforme a las distintas edades de su ciclo productivo en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	47
<b>Tabla 1-16</b> Tasas de crecimiento del plátano, para las variables alométricas en las diferentes edades de su ciclo productivo, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	48
<b>Tabla 1-17</b> Análisis de varianza para la biomasa del plátano en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2012.....	52
<b>Tabla 1-18</b> Comparación de medias de los parámetros de biomasa del plátano hartón, en cada uno de sus órganos, durante su primer ciclo productivo en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	53
<b>Tabla 1-19.</b> Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de	

biomasa del plátano en el bs-T, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	55
<b>Tabla 1- 20.</b> Tasas de acumulación de biomasa de plátano, para las variables: Raíces, cormo,seudotallo, Hojas, puyones y Biomasa Total en las diferentes edades de su ciclo productivo, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	56
<b>Tabla 1-21</b> Distribución de la fitomasa del plátano, en proporciones, para los distintos órganos durante su primer ciclo productivo, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	60
<b>Tabla 1-22.</b> Análisis de varianza del comportamiento alométrico de melina, en respuesta a la edad, y densidad de población del sombrío, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013 .....	62
<b>Tabla 1-23.</b> Comparación de medias de los parámetros alométricos de la melina ( <i>Gmelina arborea Roxb.</i> ) durante la fase vegetativa del cacao ( <i>Theobroma cacao L.</i> ) plantada en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011-2013. ....	63
<b>Tabla 1-24.</b> Medias mínimo cuadráticas para la variable Diámetro de copa en la especie melina ( <i>Gmelina arborea Roxb.</i> ), en las dos densidades de siembra del maderable (SS Surco Sencillo, y SD Suco doble), en las condiciones del bs-T de la Estación Agraria Cotové- 2011- 2013.....	64
<b>Tabla 1-25.</b> Valores P para la comparación de medias mínimo cuadráticas de las combinaciones EDAD * SURCO, de la variable diámetro de copa, para melina ( <i>Gmelina arborea Roxb.</i> ), en el bs-T de la Estación Agraria Cotové- 2011- 2013.....	64
<b>Tabla 1-26.</b> Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de crecimiento de la melina ( <i>Gmelina arborea Roxb.</i> ), conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao ( <i>Theobroma cacao L.</i> ) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	65
<b>Tabla 1-27</b> Comparación de tasas de crecimiento de melina, para las variables alométricas en las diferentes edades, durante de la fase juvenil del SAF cacao, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	66

<b>Tabla 1-28</b> Análisis de varianza para la biomasa de melina en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2012.....	68
<b>Tabla 1-29</b> Comparación de medias para la acumulación de la biomasa de melina en cada órgano en las diferentes edades, durante la fase juvenil del SAF cacao, en kg, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	69
<b>Tabla 1-30.</b> Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de biomasa de melina en el bs-T, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del SAF cacao, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	71
<b>Tabla 1-31</b> Comparación de las tasas de acumulación de biomasa de melina para las variables Raíces, Fuste, Ramas Gruesas, Ramas Delgadas, Hojas, Biomasa Total en las diferentes edades, durante la fase juvenil del SAF cacao, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013. ....	72
<b>Tabla 1-32</b> Distribución de la fitomasa de melina, en proporciones, para los distintos órganos durante la fase juvenil del SAF cacao, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	76
<b>Tabla 2-1.</b> Densidades poblacionales de las especies en el SAF en la Estación Agraria Cotové. 2011-2013 .....	92
<b>Tabla 2-2.</b> Acumulación de la biomasa del SAF cacao, en cada una de las especies: melina, cacao y plátano, conforme a las diferentes edades, en Kg, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2010-2013.....	95
<b>Tabla 2-3.</b> Acumulación de Carbono, cantidad de CO <sub>2</sub> y CO <sub>2</sub> capturado por las especies que conforman el SAF: melina, plátano y cacao conforme a las diferentes edades, en Kg, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2010-2013..	97
<b>Tabla 2-4.</b> Análisis de varianza de la cosecha del plátano en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.....	98
<b>Tabla 2-5.</b> Prueba de medias de las variables de cosecha de plátano con Densidad de sombrío.....	99
<b>Tabla 2-6.</b> Efecto de la edad para la acumulación de madera de melina en m <sup>3</sup> , durante la vegetativa del cacao en el bs-T de la Estación Agraria Cotové.	

2011- 2013.....	100
<b>Tabla 2-7.</b> Parámetros del modelo de Gompertz para el volumen de melina, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del SAF cacao en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.....	101
<b>Tabla 2-8.</b> Tasas de acumulación de madera de melina en m3, conforme a las diferentes edades en el bs-T. Estación agraria Cotové .....	101

## **Lista de símbolos y abreviaturas**

<b>SAF:</b>	Sistemas Agroforestales
<b>ha:</b>	Hectárea
<b>mm:</b>	Milímetros
<b>m:</b>	Metros
<b>msnm:</b>	Metros sobre el nivel del mar
<b>cm<sup>2</sup>:</b>	Centímetros cuadrados
<b>m<sup>3</sup>:</b>	Metros cúbicos
<b>bs-T:</b>	Bosque Seco Tropical
<b>SINAP:</b>	Sistema Nacional de Áreas Protegidas
<b>Da:</b>	Densidad aparente
<b>MO:</b>	Materia orgánica
<b>GEI:</b>	Gases de efecto invernadero
<b>ppm:</b>	Partes por millón
<b>MDI:</b>	Meses después de injertado
<b>Un:</b>	Unidades
<b>SS:</b>	Surco sencillo
<b>SD:</b>	Surco doble
<b>Stumps:</b>	Material vegetal a raíz desnuda de caucho
<b>BA:</b>	Biomasa aérea

# **Crecimiento y productividad de Sistemas Agroforestales (SAF) con cacao en estados tempranos de desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T) del departamento de Antioquia**

## **Resumen**

Una forma de mitigar el impacto ambiental causado por las actividades agropecuarias mal llevadas, y el uso irracional de los recursos, son los Sistemas Agroforestales (SAF). Para cuantificar los beneficios ambientales que ellos proporcionan, se utilizan varias mediciones, entre ellas está la acumulación de la biomasa vegetal y las relacionadas con el desarrollo alométrico de las especies involucradas en dichos SAF. Con este estudio se propuso evaluar la productividad de los diferentes arreglos en el sistema agroforestal con cacao, en un área del bosque seco tropical; en este caso en la cuenca media del valle geográfico del río Cauca, en Santa Fe de Antioquia, en la Estación Agraria Cotové, de la Universidad Nacional de Colombia–Sede Medellín. Se estimó el crecimiento y desarrollo de 3 especies que conforman el SAF: cacao, plátano y melina. Para lograrlo se tomaron datos de crecimiento, como altura total de las plantas, diámetros de copa y de tallo, área foliar, y se calculó la biomasa, tanto individual, como a nivel del SAF total. Para lograrlo se hicieron lecturas trimestrales en cada una de las especies, para las variables alométricas mencionadas; además se utilizó el método destructivo para hallar la biomasa, para lo cual se cosecharon 6 individuos de cada especie, los cuales fueron llevados a estufa a temperaturas entre 60 y 80°C, para obtener el peso seco por órgano y por especie, y hallar luego la biomasa total en kilogramos por hectárea. Con esta masa seca se obtuvo la cantidad de Carbono capturado y finalmente el CO<sub>2</sub> equivalente para el SAF. En cuanto a variables de producción, se cuantificó la primera cosecha de racimos de la especie plátano hartón, la cual inició la etapa productiva a los 12 meses de edad. Se calculó además el volumen de madera de la especie melina, como forma de aprovechamiento de la plantación a largo plazo, cuando finalice el ciclo productivo del cacao. Dicha estimación se basó en la altura y el diámetro de las trozas obtenidas del tallo, involucrando el factor de forma. Se modelaron los crecimientos y la biomasa, así como el volumen de madera de melina, con base en el modelo de Gompertz y el alométrico. Hubo efecto significativo de la Edad sobre las diferentes variables de crecimiento, en todas las especies. Se calcularon las tasas de crecimiento, con base en los modelos ya mencionados, para todas las especies y para todas las variables evaluadas. El SAF cacao estudiado acumuló una biomasa total de 57718.450 kg/ha a los 24 meses y a los 36 meses de 99440.496 kg/ha, encontrándose que la especie melina contribuyó con el mayor aporte en masa

seca; el Carbono acumulado a los 36 meses fue de 44748 Mg C, equivalentes a 164226 Mg CO<sub>2</sub>, y 164.226 toneladas de CO<sub>2</sub>e. El peso promedio de un racimo de plátano, en el arreglo de surco doble del maderable fue de 13.427 kg y en el arreglo de surco sencillo fue de 15.313 kg, esto permitió contar con una producción de plátano de 18.528 toneladas/ha en surco sencillo y de 13.924 toneladas/ha en surco doble. Asimismo, se obtuvo una cantidad de madera de melina de 0.096 m<sup>3</sup> a los 24 meses, 0.287 m<sup>3</sup> a los 36 meses y finalmente 0.526 m<sup>3</sup> a los 48 meses de edad.

**Palabras clave:** Alometría, biomasa, Crecimiento y desarrollo, CO<sub>2</sub>, cambio climático, biodiversidad, Agricultura tropical.

# **Growth and productivity of Agroforestry systems (AFS) with cocoa in early stages of development in the tropical dry forest (T-df), of the department of Antioquia**

## **Abstract**

One way to mitigate the environmental impact of agricultural activities mishandled, and irrational use of resources, are agroforestry systems (AFS). To quantify the environmental benefits they provide several measures, among them is the accumulation of plant biomass, as well as the ones related with the allometric development of the species involved in these AFS. This study aimed to evaluate the productivity of the different arrangements in the cocoa agroforestry system, in an area of tropical dry forest; in this case in the middle basin of geographical Cauca River Valley, in Santa Fe de Antioquia, at the Agricultural Station Cotové, National University of Colombia, headquarters Medellin. The growth and development of 3 species that make up the AFS: cocoa, banana and melina was estimated. To achieve this goal, growth data as overall plant height, diameter of stem and cup, leaf area, and biomass was calculated, both at individual and total SAF level. To achieve quarterly readings in each of the species mentioned for the allometric variables were made; also the destructive method was used to find biomass, for which they were harvested from 6 individuals of each species, and carry oven 60 to 80 °C, to determine the dry weight per organ and species; then determine the total biomass in kilograms per hectare. With this dry mass the amount of carbon captured was obtained and finally the CO<sub>2</sub> equivalent for the AFS. As for production variables, the first harvest bunches of banana species hartón was quantified, which began production stage at 12 months of age. We also calculated the volume of wood from melina species, as a way of long-term plant harvesting, when cocoa production cycle has finished. This estimation was based on the height and diameter of some pieces of the stem, including the form factor. The growth and biomass, as well as the volume of melina wood were modeled, based on the Gompertz and Allometric models. For all species, there was a significant effect of age on the growth variables. Growth rates based on the aforementioned models, for all species and for all variables were calculated. The AFS studied accumulated a total biomass of 57718.450 kg/ha at 24 months and 99440.496 kg/ha at 36 months, with melina species contributing the more in dry mass. The Carbon cumulated to 36 months was

44748 Mg C, equivalent to 164226 Mg CO<sub>2</sub>, and 164.226 tons of CO<sub>2</sub>e. The average weight of a bunch of bananas, within the double timber furrow was 13.427 kg, and 15.313 kg within the simple timber furrow. This allows a banana production of 18.528 tons/ha in simple furrow and 13.924 tons/ha in double furrow. Also, the estimation of melina wood was 0.096 m<sup>3</sup> at 24 months, and 0.287 m<sup>3</sup> at 36 months, and finally 0.526 m<sup>3</sup> at 48 months of age.

**Keywords:** Allometry, biomass, growth and development, CO<sub>2</sub>, climate change, biodiversity, tropical Agriculture.

## Introducción

El Bosque seco Tropical (bs-T) se define como aquella formación vegetal que presenta una cobertura boscosa continua y que se distribuye entre los 0 y 1000 m de altitud; presenta temperaturas superiores a los 24°C (piso térmico cálido) y precipitaciones entre los 700 y 2000 mm anuales, con uno o dos periodos marcados de sequía al año (IAVH, 1998). El Bosque seco Tropical representa el 50% de las áreas boscosas en Centroamérica y el 22% en Sudamérica (Murphy & Lugo, 1986, citado por IAVH, 1998).

En Colombia el Bosque Seco Tropical, se distribuía originalmente en las regiones de la llanura Caribe y valles interandinos de los ríos Magdalena y Cauca entre los 0 y 1000 m de altitud y en jurisdicción de los departamentos del Valle del Cauca, Tolima, Huila, Cundinamarca, Antioquia, Sucre, Bolívar, Cesar, Magdalena, Atlántico y sur de la Guajira. Aunque no se dispone de información exacta de la extensión de la cobertura original del Bosque seco Tropical en Colombia, se estima que cubría la mayor parte de las todas las regiones y localidades anteriormente nombradas, las cuales abarcan una extensión de más de 8'146.000 hectáreas. Esta información fue generada a partir de los mapas de formaciones vegetales de Colombia (Espinal y Montenegro, 1977, citado por IAVH, 1998).

Originalmente este ecosistema cubría más de 9 millones de hectáreas, de las cuales quedan en la actualidad apenas un 8%, por lo cual es uno de los ecosistemas más amenazados en el país. Esto se debe a que el bosque seco existe en zonas con suelos relativamente fértiles, que han sido altamente intervenidos para la producción agrícola y ganadera, la minería, el desarrollo urbano y el turismo. Esta transformación es nefasta para la biodiversidad asociada al bosque seco y los servicios que presta este bosque (IAVH, 2014).

El BST tiene una biodiversidad única de plantas y animales que se han adaptado a condiciones de estrés hídrico, por lo cual, presenta altos niveles de endemismo. Es decir que contiene especies que no se dan en ningún otro tipo de ecosistema. En los estudios que se han hecho hasta el momento, se ha reportado que los bosques secos de Colombia tienen casi 2600 especies de plantas de las cuales 83 son endémicas, 230 especies de aves de las cuales 33 son endémicas, y 60 especies de mamíferos

de los cuales 3 son endémicos. El BST, presta además servicios fundamentales para las comunidades humanas, como la regulación hídrica, la retención de suelos, y la captura de carbono que regula el clima y la disponibilidad de agua y nutrientes. Finalmente, los bosques secos suministran especies de leguminosas forrajeras, ornamentales y frutales importantes para el sustento y el bienestar de los pobladores aledaños a ellos. Por su ubicación dentro de mosaicos de paisajes dominados por zonas agrícolas y ganaderas, estos bosques secos brindan la posibilidad de mantener especies de insectos que ayudan en el control de plagas y vectores de enfermedades (IAVH, 2014).

Según Díaz, (2006), A pesar de que los bosques secos constituyen la mayor proporción de los bosques tropicales del mundo y son más abundantes que las selvas húmedas o los bosques lluviosos y aunque alojan una buena parte de la biodiversidad característica del trópico, son menos conocidos y suelen ser desatendidos, incluso por los ambientalistas que claman por la protección de las selvas y los bosques naturales de esta parte del planeta.

De manera genérica, el BST es una formación vegetal compuesta por árboles, arbustos, plantas trepadoras, epífitas y hierbas, que se desarrolla en regiones tropicales de piso cálido, donde anualmente las lluvias se concentran en uno o dos períodos cortos —mayo a junio y octubre a noviembre—, mientras que durante el resto del año prevalecen condiciones de sequía. Desde una perspectiva científica, una visión amplia y un panorama detallado es uno de los ecosistemas más ricos y espléndidos de Colombia, por la belleza que brinda, por la capacidad de adaptación a los cambios climáticos de las especies que lo habitan y por la oferta de recursos para el hombre. Lamentablemente, también es uno de los ecosistemas más frágiles y en mayor peligro de desaparecer, por lo que los programas que se adelanten deben tender, no sólo a conservarlo, sino a recuperarlo, para que las generaciones futuras se puedan beneficiar del invaluable tesoro que es el Bosque Seco Tropical (Díaz, 2006).

A pesar de la poca importancia que se le ha conferido a los bosques secos tropicales, éstos son fuente de importantes especies de uso antrópico. Este es el caso de varias leguminosas forrajeras, ornamentales y frutales originarias de esta formación vegetal como: Matarratón (*Gliciridia sepium*), Carbonero (*Leucaena leucocephala*), Guayacanes (*Tabebuia spp.*), Cactus (*Opuntia spp.*, *Cereus spp.*), Samanes (*Samanea saman*), y Chiminangos (*Pithecellobium spp.*). Los relictos de bosque

seco se constituyen en verdaderos bancos genéticos *in situ*, que son desconocidos hasta ahora (IAVH, 1995).

Según IAVH, (2014), el análisis que hicieron del mapa de distribución del BST, en el país indica, que el 65% de las tierras que han sido deforestadas y eran bosque seco presentan desertificación. Esto quiere decir que esas tierras están tan degradadas, que ya la producción agrícola o ganadera, es insostenible. Lo más preocupante es que tan sólo el 5% de lo que queda, es decir el 0.4% de lo que había, está presente en el Sistema Nacional de Áreas Protegidas (SINAP). De ahí que el Ministerio del Medio Ambiente lo haya declarado como un ecosistema estratégico para la conservación, y el interés del Instituto Humboldt de trabajar en su estudio y conservación.

Sumado a todo lo anterior, las actividades antrópicas desarrolladas día a día, han ocasionado un deterioro general de los ecosistemas, y son innumerables las fuentes que citan los efectos irreversibles de las prácticas convencionales (p. ejemplo: monocultivos con dependencia de recursos externos, como pesticidas y otros agroquímicos), sobre la erosión de los suelos (con la pérdida inherente de tierras arables), la calidad de las aguas subterráneas, la desaparición de especies, la pérdida de la biodiversidad, la deforestación, entre otros (Toral *et al.*, 2014).

Por otra parte, el uso irracional de los suelos provoca cambios en sus propiedades, pues llega a afectar la capacidad productiva a través de su influencia sobre la vegetación y tipos de usos posibles en la agricultura (Hernández *et al.*, 2006, citado por Murray, 2014). Lo anterior lleva a problemas de degradación de la estructura, compactación del suelo, aumento en la densidad aparente (Da) y disminución de la porosidad. Además, la pérdida paulatina de materia orgánica (MO) del suelo, es uno de los problemas que enfrentan los productores al laborear el suelo (Murray, 2014).

La temperatura del planeta ha aumentado debido a la contaminación atmosférica global por la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), resultado de la quema de combustibles fósiles, los incendios forestales y ciertas prácticas agrícolas. La agricultura y la ganadería poseen una alta contribución, con el consecuente calentamiento global (Milera, 2013).

Estas afectaciones requieren de un conjunto de medidas que contribuyan a mejorar las técnicas agrícolas con el uso de especies vegetales adaptadas para la producción de alimentos que permitan contribuir a la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático. El futuro es hoy; para la búsqueda de soluciones, los tiempos de reacción de la naturaleza no son rápidos al compararlos con los períodos humanos; existen soluciones pero hay que adquirir conciencia para implementarlas (Milera, 2013).

Según Soca *et al.*, 2003, citado por Anguiano *et al.*, 2013, el creciente deterioro de los recursos naturales y del medio ambiente, el calentamiento progresivo del globo terrestre y la pérdida de la capa de ozono son, entre otras, las razones más importantes que en la actualidad están poniendo en peligro la existencia de la especie humana.

El cambio climático puede afectar la productividad de los árboles, principalmente por afectación de la morfología (tamaño y características de la superficie) y función (capacidad de intercambio gaseoso) de las hojas, principalmente por el incremento en la concentración del CO<sub>2</sub> y los incrementos de la temperatura (Apple, 2000).

La concentración de gases de efecto invernadero (GEI), como son: dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano y óxidos nitrosos, en la atmósfera, han aumentado considerablemente, lo cual fortalece el efecto invernadero del planeta. El CO<sub>2</sub>, principal gas de efecto invernadero, viene incrementándose año tras año, y se estima que aumentará entre dos y tres partes por millón (ppm) al año a nivel mundial (Anguiano, 2013).

Desde hace varias décadas se ha mostrado las consecuencias graves, por la intensificación de las actividades agropecuarias, las cuales ponen en peligro la estabilidad de las regiones tropicales. Es así como, IAVH, 1995, afirma que el daño causado a los ecosistemas tropicales por las actividades de agricultura y ganadería, además de la deforestación, ha traído resultados devastadores, como por ejemplo:

- Pérdida de capa vegetal.
- Disminución del Carbono y el Nitrógeno presentes en la biomasa del Bosque.

- 3 billones de toneladas de CO<sub>2</sub> se pierden a la atmósfera.
- Desertificación y aumento de zonas áridas en los subtrópicos.
- Contaminación del suelo y atmosférica por pesticidas y otros químicos
- Cantidad y calidad de agua freática (salinización)

Además, hace aproximadamente tres décadas los sistemas agrícolas y ganaderos se enfrentan a perturbaciones frecuentes e impredecibles, provocadas por los efectos adversos (directos o indirectos), de fenómenos relativamente recientes como consecuencia del cambio climático, las crisis económicas, financieras y energéticas (IPCC, 2014).

Como estrategia productiva, amigable con el ambiente, se han propuesto los Sistemas Agroforestales (SAF), los cuales mitigan el efecto antrópico e integran la producción agraria a los medios de vida de las comunidades rurales. Por otra parte, el incremento de la población, la ampliación de la frontera agrícola en los países del trópico, han venido dándose, poco a poco, en pequeñas áreas (Muschler y Bonnemann, 2004).

Anguiano, 2013, señala que los GEI podrían reducirse a través de dos procesos: disminuyendo las emisiones antropogénicas de CO<sub>2</sub> o mediante la creación y/o mejoramiento del secuestro de carbono en la biosfera. En este sentido, los SAF, son una importante estrategia para la mitigación del calentamiento global: mediante la conservación, el secuestro, el almacenamiento y la sustitución de Carbono. Así, la implementación de SAF —utilizando la inserción de árboles en potreros— el establecimiento de cercas vivas y el de pasturas mejoradas, así como incentivar la regeneración natural de la vegetación y la conservación de los bosques, son una posibilidad viable para los productores (Anguiano, 2013).

Según, Beer *et al.* 2003, El estudio formal y la promoción de los Sistemas Agroforestales (SAF), un sistema de uso de la tierra practicado desde tiempos inmemorables tanto en el 'viejo' como en el 'nuevo' mundo, comenzó a finales de los años 70. Inicialmente el enfoque fue sobre la descripción, posibles ventajas/desventajas biológicas y socioeconómicas y el inventario de SAF tradicionales, generalmente en el trópico. Esto fue seguido por evaluaciones de la productividad de los SAF ya

existentes, y más recientemente, de novedosos estudios sobre las interacciones entre las especies componentes, con miras a mejorar el manejo y la rentabilidad (Schroth y Sinclair, 2003).

A finales de los años 90, la creciente preocupación internacional sobre los temas ambientales conllevó a nuevos tratados (p. ej. Protocolo de Kyoto, con énfasis en servicios ambientales de usos de tierra alternativos). Rápidamente se reconoció que los SAF poseen muchas ventajas sobre los monocultivos para responder a la demanda de una agricultura multifuncional y que proveen servicios medioambientales importantes, valores estéticos (p. ej., parques en ciudades y sabanas con árboles), amortigua áreas protegidas y podrían utilizarse para turismo agroecológico. El pago de incentivos a los agricultores cuyos usos de tierra protegen los recursos naturales y así proveen un servicio a la comunidad local, nacional y mundial, es una nueva opción que podría mejorar la viabilidad financiera de las fincas. Es oportuno enfatizar y revisar la cantidad y valor de los servicios ambientales que prestan los SAF (Beer, *et al.*, 2003).

Según IDEAM, 2011, los SAF, favorecen el mantenimiento de los Servicios ecosistémicos, por medio de:

- El mantenimiento de la fertilidad del suelo, ya que reduce la erosión, con el aporte de material orgánico al suelo, fijación de nitrógeno y reciclaje de nutrientes.
- La conservación del agua, en calidad y cantidad, ya que se favorece la infiltración y se reduce la escorrentía superficial, que contamina los cursos de agua.
- La captura de carbono, enfatizando el potencial de los sistemas silvopastoriles.
- La conservación de la biodiversidad en paisajes fragmentados.

Desde el punto de vista biológico, las técnicas agroforestales permiten combinar especies con requisitos ambientales diferentes para mejorar el aprovechamiento de la energía radiante, utilizando tanto el espacio vertical como el horizontal. Debido a la estructura vertical proporcionada por los árboles y otras especies leñosas, pueden convivir plantas y cultivos con diferentes requerimientos de luz, protegiendo al suelo de los efectos del sol, el viento y las fuertes lluvias que caracterizan al trópico (IDEAM, 2011).

Además, con el deterioro del suelo, Prause *et al.*, 2000, citado por Murray *et al.*, 2014, señala que la estructura del suelo, se ve favorecida en la medida que los sistemas agroforestales tienen aportes anuales de hojarasca, exudados y biomasa radicular, suficiente para modificar algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, mediante un incremento del contenido de materia orgánica en la superficie y en el subsuelo.

Así, puede afirmarse que los valores de MO del suelo y de la Da hallada en un sistema agroforestal, mejoran la estructura del suelo en los primeros 20 cm; lo que concuerda también con lo reportado por Prause *et al.*, 2000 y Murray *et al.*, 2011 (Murray, 2014).

Se define como Sistemas Agroforestales (SAF), el uso de árboles, arbustos y palmas sembradas a propósito con cultivos agrícolas o animales en el mismo terreno, al mismo tiempo o de manera secuencial. Los cultivos de café y cacao cultivados con sombrío de anacos, guamos, jalapos, entre otros árboles, son el mejor ejemplo de un SAF, también lo son potreros con cercas vivas de matarratón y árboles de sombrío como el nauno. Los SAF, son sistemas que al integrar de manera armónica y eficiente el manejo de cultivos, animales y árboles, contribuye a la búsqueda de nuevas estrategias de producción (IPROC, 1998).

Las formas de producción agroforestal son aplicables tanto en ecosistemas frágiles como estables, a escala de campo agrícola, finca, región, a nivel de subsistencia o comerciales. El objetivo es diversificar la producción, controlar la agricultura migratoria, aumentar el nivel de materia orgánica en el suelo, fijar nitrógeno atmosférico, reciclar nutrientes, modificar el microclima y optimizar la producción del sistema, respetando el principio de sistema sostenido (López, 2012).

El mejoramiento del suelo en SAF está vinculado al crecimiento de los árboles fijadores de Nitrógeno o de árboles/arbustos de raíces profundas que aumentan la disponibilidad de los nutrientes a través de la fijación biológica, reciclaje de nutrientes (especialmente en zonas secas) y acumulación de materia orgánica en el suelo (Beer, 1999).

Los beneficios económicos de la producción de las especies involucradas en el SAF, es importante para el productor, por ejemplo la de madera, con efectos positivos porque funcionan como una

cuenta de ahorro en la que se percibe un gran ingreso en efectivo en el momento de la extracción de madera y actúa como un factor de riesgo de minimización. Con las especies de ciclo corto se promueve un flujo de caja a corto plazo; además que los insumos necesarios para un cultivo pueden beneficiar a los otros, no solo por los nutrientes, sino por las jornadas de trabajo (Young, 1997). Los SAF son entonces, una forma de cultivar la tierra, de tal manera que se puedan integrar varias especies en un mismo sitio, lo que permite, no solo aumentar la productividad, sino mantener los recursos naturales, prolongando la fertilidad del suelo, y la rentabilidad para el productor; son entonces, una alternativa para la Agricultura Tropical.

Los SAF cacao se han desarrollado, exitosamente, en las zonas de vida con buenas condiciones hídricas, como lo es el bosque húmedo tropical; sin embargo las productividades no son buenas debido a varios factores, entre los cuales están las tecnologías incipientes que utilizan los cultivadores, las enfermedades a causa de los hongos ( caso de Monilia y Escoba de bruja), que afectan los rendimientos en estos sistemas, además la mayoría de las plantaciones son viejas y sin un manejo técnico adecuado.

Esta investigación tuvo como objetivo general, evaluar la productividad de sistemas agroforestales con cacao, en estados tempranos de desarrollo. Los resultados encontrados, indican que los SAF pueden mostrarse como alternativa para mitigar el cambio climático ocasionado por las actividades antrópicas, además de contrarrestar el deterioro de los recursos naturales y pérdida de la biodiversidad en los bosques tropicales. Además, sirve de base para otros estudios, tales como captura de carbono en los SAF, productividad en la fase productiva, aportes al suelo de materia orgánica, entre otros.

➤ **Pregunta de investigación:**

¿Cómo será la productividad de Sistemas Agroforestales con plantas jóvenes de cacao, bajo condiciones de abastecimiento hídrico, en un bosque seco Tropical (bs-T), en consideración a que ésta es una especie originaria del bosque húmedo Tropical (bh-T)?

➤ **Hipótesis**

En consideración a que el cacao es una especie del bosque húmedo tropical (bh-T), el subsidio hídrico facilita el establecimiento, el adecuado desarrollo y la producción de Sistemas Agroforestales con cacao en el bosque seco tropical (bs-T).

## Objetivos

- **Objetivo general**

Evaluar el desarrollo y la productividad de Sistemas Agroforestales SAF con cacao, en estados tempranos de desarrollo, en el bs-T, ubicado en la Estación Agraria Cotové, Santafé de Antioquia.

- **Objetivos específicos**

- **Objetivo específico 1.** Evaluar el crecimiento y desarrollo de las especies que conforman el SAF con cacao.
- **Objetivo específico 2.** Estimar la distribución e interrelación de la fitomasa, entre los distintos compartimentos, para las especies cacao, melina y plátano, así como las posibles relaciones con la producción, para el SAF cacao.
- **Objetivo específico 3.** Estimar el aporte productivo de tres de las especies que conforman los sistemas agroforestales, durante la fase juvenil del cacao.

# **Capítulo 1. Crecimiento alométrico del Sistema Agroforestal con cacao en estados tempranos del desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T)**

## **1.1. Marco teórico**

### **1.1.1. Sistemas Agroforestales con cacao**

Los agroecosistemas se convierten en elementos claves para la conservación de la biodiversidad. Los sistemas asociados con el cultivo de cacao, por ejemplo, por su estructura boscosa, son una herramienta valiosa para este propósito, especialmente en zonas de amortiguamiento de áreas protegidas. El diseño y manejo de los árboles de sombra del cacao determina en gran medida el valor del cacaotal para conservar y manejar la biodiversidad. Los estudios demuestran que la diversidad de aves, mamíferos no voladores y artrópodos presentes en los cacaotales adyacentes a zonas boscosas, es similar a la de los bosques naturales y mucho mayor que la de los agro sistemas manejados intensivamente (Parrish *et al.*, 1999).

Los sistemas SAF tienen alto potencial para almacenar y fijar carbono en la biomasa aérea (Duguma *et al.*, 2001). Estudios en África señalan que los SAF con cacao pueden contener el 66 % del total de biomasa del carbono que contiene un bosque primario (Duguma *et al.*, 2001), debido a la acumulación del carbono en los árboles (Pandey, 2002; Montagnini y Nair, 2004) y a su rápido crecimiento y productividad. Isaac *et al.*, (2005), reportan valores de acumulación de Carbono de

80,6 t C ha<sup>-1</sup> para cacaotales de 25 años, mientras que Kotto-Same *et al.*, (2000), encontraron valores de 89 t C ha<sup>-1</sup>.

De acuerdo con el Ministerio del Medio Ambiente (Minambiente, 2000), el establecimiento de especies vegetales que permitan el incremento de la captura de Carbono, como los SAF, entre ellos el cacao, es la estrategia colombiana para implementar el desarrollo agrícola limpio y obtener beneficios sociales como mitigación de la pobreza. Se ha demostrado que los sistemas agroforestales con cacao son una alternativa clara no sólo por los servicios eco sistémicos que ofrecen, sino por ser una fuente de ingresos interesante para el productor campesino.

Adicional a los beneficios ambientales como generadores de biomasa, liberación de oxígeno, conservación de la diversidad biológica, así como de fuentes de agua y biota del suelo, ciclaje de nutrientes y disminución de la erosión; el sistema de producción de cacao en el país, demanda gran cantidad de mano de obra (Espinal *et al.*, 2005, Aranzazu *et al.*, 2009 y Rojas *et al.*, 2009), se estima en 35.000 las familias colombianas que viven directamente de esta actividad productiva (Rojas, 2012), con generación de 50.854 empleos para la labor de cosecha y 7.964 en la industria chocolatera (Espinal *et al.*, 2005).

Según la Fundación Hondureña de investigación agrícola, 2004, los sistemas agroforestales con cultivos permanentes como cacao y café, representan una buena opción para los agricultores de ladera en condiciones de marginalidad, al incrementar la rentabilidad de sus sistemas de producción por incluir más de un componente productivo, en especial los árboles. Entre los beneficios del sistema de producción de cacao con sombra se tienen:

- Lograr a través de la sombra, un menor agotamiento del cacao y menor demanda de insumos que cuando está a plena exposición solar.
- Prolongar la vida productiva del cacao.
- Reducir los costos de mantenimiento, específicamente en el control o regulación de malezas.
- Producir un mejoramiento y estabilización de la fertilidad del suelo por el aumento de materia orgánica y disponibilidad de nutrientes.

- Una mayor rentabilidad por el valor de las maderas y frutos.

El cultivo de cacao dentro de la concepción moderna, se concibe como un sistema agroforestal, el cual se combina especies agrícolas, con especies forestales, en una sucesión de cultivos donde el cacao, durante los primeros 6 meses, se combina con especies de ciclo corto, luego con cultivos de ciclo medio que le proporcionan sombreado y, finalmente, con árboles de mayor porte que le proveen el sombreado definitivo, como es el caso de los maderables y algunos frutales (Fedecacao, 2006).

El cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en Colombia cubre un área aproximada de 108.528 hectáreas (DNP, 2012), con una producción de 42.295 toneladas métricas de grano seco en el año 2010 (Pinzón *et al.*, 2012). Es tradicionalmente una explotación de economía campesina, y su producción tiene mayor destino (60%) como materia prima para chocolate de mesa, componente básico de la canasta familiar, de productos manufacturados en confitería y algunos excedentes exportables, lo que ha originado divisas para el país (Ariza, 2006, Aranzazu *et al.*, 2009 y Pinzón *et al.*, 2012).

Por otra parte, la producción de cacao permite el asocio con otras especies vegetales, incluido en sistemas agroforestales (SAF), principalmente con especies que aportan sombrío como: plátano, frutales y maderables, debido a que el cultivo requiere sombrío transitorio y permanente; éste último se requiere con alrededor del 50% de sombra en cultivos en fase productiva (Paredes, 2004). Los beneficios que prestan éstos sistemas acompañantes son los de generar sombra al cacao, protegerlo contra fuertes corrientes de aire y ofrecer al productor otras alternativas de ingresos económicos (Paredes, 2004; Espinal *et al.*, 2005; Rojas *et al.*, 2009 y Pinzón *et al.*, 2012).

Por otra parte, tanto la síntesis como la ganancia de carbono en los vegetales, dependen de una serie de propiedades de la planta, entre ellas la disposición de las hojas, el área foliar total, la dinámica foliar y la distribución en que se encuentra repartida la biomasa en la planta. A su vez, las tasas fotosintéticas dependen también de la relación que exista entre las propiedades de la hoja, la planta y el entorno en que se desarrollan (Fageria *et al.*, 2006 y Pinzón *et al.*, 2012).

De acuerdo con Batista (2009), el árbol de cacao, al igual que otras especies del género *Theobroma*, presenta un crecimiento dimórfico de sus ramas: a) unas son de crecimiento vertical (hacia arriba), denominadas ramas de crecimiento ortotrópico, y constituyen el tallo y/o los chupones, b) otras son de crecimiento oblicuo (hacia fuera), denominadas ramas plagiotrópicas.

Por otra parte, el cacao desarrolla un tallo principal de crecimiento vertical que puede alcanzar 1 a 2 m de altura a la edad de 12 a 18 meses; en este momento, emite un verticilo u horqueta, es decir un grupo entre 3 y 5 ramas laterales; las cuales, presentan, entre ellas, un espacio bien marcado entre cada uno de sus puntos de origen; los que en conjunto conforman un solo anillo cuando estos órganos llegan a la madurez. Con mucha frecuencia hay formación de chupones que emergen por debajo de la horqueta, donde se puede presentar por reiteración, alrededor de cuatro verticilos (Batista, 2009).

El crecimiento en los vegetales es el aumento irreversible de un órgano, producto de la interacción genética del vegetal y del ambiente, cuyo aspecto físico se manifiesta en la forma y tamaño de los individuos (Lambers *et al.*, 2008). Por otra parte, la biomasa es una forma de determinar la tasa de incorporación y fijación de CO<sub>2</sub> proveniente, básicamente, de la actividad fotosintética del vegetal, la cual está representada en el carbono asimilado que no es liberado por respiración; ello incrementa la materia seca, la que puede ser utilizada tanto para el crecimiento, como en su acumulación en los órganos de reserva (Peixoto *et al.*, 2010 y Larcher, 2011).

### **1.1.2. Condiciones agroecológicas para el cultivo de cacao**

En la actualidad, el cacao se cultiva en la franja geográfica tropical húmeda, ubicada desde los 18° N hasta los 20° S de la línea ecuatorial (Valle, 2007), y dentro de estos límites, según Espinal *et al.*, (2005), Rojas *et al.*, (2009), Pinzón *et al.*, (2012) e ICCO (2013), los requerimientos ambientales para un adecuado desarrollo del cultivo son: temperatura promedio entre 24 y 28°C, precipitación promedio 1.500 y 1.800 mm, bien distribuida a lo largo del año, zonas altitudinales entre 0 y 1200 msnm; aunque la óptima se encuentra entre 400 y 800 msnm., humedad relativa alrededor de 70 y 80%.

Igualmente, el crecimiento del cacao se ha adaptado muy bien a diversas condiciones ambientales, especialmente con factores de suelos como textura, entre franco a franco-arcillosa, es decir, suelos bien drenados durante las épocas de lluvia y con buena retención de humedad en el tiempo seco. Se desarrolla en suelos de pendiente, ondulados o planos, con pH entre 5.5 y 6.5, alto contenido de materia orgánica (> 5%) y nivel freático por debajo de 1.5 m (Espinal *et al.*, 2005, Rojas *et al.*, 2009 y Batista, 2009).

De acuerdo con Paredes (2004) y Pinzón *et al.*, (2012), debido a que el cacao es una planta umbrófila o especie del sotobosque, que requiere sombra tanto en la fase de establecimiento como en la productiva, pero, especialmente en los primeros años de vida, debido a que la radiación solar excede a la que pueden utilizar en la fotosíntesis, lo cual, incrementa la temperatura y transpiración, excesivamente, y aumenta la posibilidad de detener el crecimiento y entrar en senescencia (Somarriba, 2004). Por tanto, el cacao no se adapta a altas intensidades de luz, reflejado en el daño o foto inhibición del aparato fotosintético (Serrano y Bhiehl, 1999).

Las plantas que proveen la sombra que el cacao requiere para regular la cantidad e intensidad de radiación, en la fase inicial del cultivo, se denominan sombra provisional; la cual, comúnmente, se realiza con especies del género *Musa* (plátano y banano), mientras que la sombra permanente cumple la misma función, pero con menor severidad, luego de 3 a 5 años de establecida la plantación de cacao, utilizando para ello especies arbóreas como *Erythrina spp.* (Batista, 2009 y Pinzón *et al.*, 2012).

Por su parte, el maderable del sistema agroforestal *Gmelina arborea*, una de las especies de sombra permanente más utilizado en cacao (Pinzón *et al.*, 2012), es un árbol caducifolio que puede crecer hasta 30 m de altura, en regiones secas, y desarrollar más de 0.8 m de diámetro; mientras que, en el bosque húmedo tropical, el árbol crece rápidamente, ya que a los siete años de edad puede sobrepasar los 10 m de altura (Calvo-Alvarado *et al.*, 2007), lo que la convierte en una de las especies de mayor crecimiento en comparación con otras de interés forestal. Además de la protección de la radiación solar, la acción de los vientos y lluvias torrenciales; estabiliza la temperatura y humedad de los cacaotales (Paredes, 2004).

### 1.1.3. Crecimiento alométrico de las especies vegetales

Las relaciones alométricas de especies no comerciales empleadas en la restauración ecológica en los trópicos son aún escasas. Tampoco existen muchas ecuaciones calibradas para árboles juveniles (Hughes *et al.*, 1999; Cole y Ewel, 2006) a pesar de que árboles con diámetro a la altura del pecho (DAP) menor a 10 cm contribuyen hasta 15 % de la biomasa aérea (BA) en plantaciones jóvenes (Preece *et al.*, 2012).

La acumulación de biomasa en plantaciones es un indicador de la complejidad estructural, la productividad ecosistémica y el secuestro de carbono. Este último es extremadamente relevante en el contexto del cambio climático. Se estima que 6 % de la superficie global ( $1 \times 10^{12}$  ha) son tierras degradadas que reforestadas se convertirían en sumideros importantes de Carbono (Douterlungne *et al.* 2013).

## **1.2. Materiales y métodos**

### **1.2.1. Localización**

El proyecto se ejecutó en la Estación Agraria Cotové, de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia–Sede Medellín, la cual está situada en la vereda El Espinal, municipio Santa Fe de Antioquia (Antioquia). Ecológicamente, se encuentra en la zona de vida bosque seco Tropical (bs-T), a una altitud, aproximada, de 540 msnm, con temperatura anual promedio de 27 °C, precipitación media anual de 1031 mm y humedad relativa inferior al 70 %. (Pérez y Barreiro, 1986).

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la Vicerrectoría de Investigación y Extensión; la Dirección de Investigación de la Sede Medellín (DIME) y la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia–Sede Medellín. Está identificada con los códigos UN 20101007225, 20101009650 y 201010011040, respectivamente. El proyecto se adelantó desde septiembre de 2009, inicialmente en alianza estratégica con la Compañía Nacional de Chocolates.

### **1.2.2. Suelos**

Los resultados del análisis químico de suelos muestran una adecuada textura, (F y FAr); con pH llegando a la neutralidad (6.6, 7.0), sin problemas de saturación de Aluminio y con buen contenido de bases intercambiables (26 y 30); y adecuado porcentaje de materia orgánica para el clima tropical. (4.6 y 5.9).

### **1.2.3. Material vegetal**

Se trabajó en un sistema agroforestal (SAF), donde se utilizaron especies semiperennes y perennes y la especie agrícola, así:

- Semiperenne: Plátano (*Musa AAB* Simmonds), variedad Hartón, recomendada para estas altitudes, sembrado por propagación vegetativa, con colinos provenientes de la zona

bananera del Urabá Antioqueño. Establecido como sombrío transitorio, proyectado para permanecer durante los primeros 4 años.

- Perennes (maderables de ciclo largo):
  - Caucho (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.). Se incluyeron los clones IAN-873, IAN-710 y FX-3864, sembrados por medio de *stumps*, provenientes del vivero de Asculticaucho, de la zona del Bajo Cauca Antioqueño.
  - Melina (*Gmelina arborea* Roxb.). Propagado por semilla, a partir de los rodales semilleros que tiene la Universidad del Tolima en la Granja de Armero (Tolima). Establecido como sombrío permanente, hasta el final del ciclo del cacao.
  
- Cultivo agrícola principal: Cacao (*Theobroma cacao* L.). Propagado por injertación, a partir de cuatro clones de alto rendimiento: ICS - 60, TSH – 565, ICS – 95, CCN – 51, elegidos con base en su buen comportamiento, en cuanto a productividad, alta tolerancia a enfermedades, precocidad y buena intercompatibilidad en las zonas cacaoteras del País. Los clones se injertaron sobre el patrón IMC-67, proveniente de la granja de la Compañía Nacional de Chocolates en el Municipio de Támesis (Antioquia).

#### 1.2.4. Diseño experimental

Se evaluaron dos factores: “**maderable**”, conformado por los niveles caucho y melina; y “**densidad de población del sombrío**”, definidos por los niveles surco doble y sencillo; los cuales definen las densidades de población detalladas en la Tabla1; los maderables están plantados en barreras, separadas 21 m, con individuos distanciados a 3 así mismo, cada surco doble a 3 m. Ello dio lugar a las cuatro combinaciones de tratamientos, así: melina y caucho plantados en baja y alta densidad poblacional del sombrío; lo que significa 173 y 346 árboles.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos se asignaron a las unidades experimentales con base en un diseño de bloques al azar generalizado, con tres bloques y cuatro repeticiones de cada tratamiento agroforestal por bloque; ello condujo a 48 unidades experimentales, cada una de ellas constituida por una parcela con un área de 882 m<sup>2</sup> (21x42 m<sup>2</sup>). Por consiguiente, como los tratamientos implicaron diferentes poblaciones del sombrío; así mismo, el cacao y el plátano quedaron conformados por 1.210 individuos.ha<sup>-1</sup> (baja densidad del sombrío) y 1.037 individuos.ha<sup>-1</sup> (alta densidad del sombrío).

**Tabla 1-1. Densidades poblacionales de las especies en el SAF en la Estación Agraria Cotové. 2011-2013**

Especie	Densidad de población (árboles.ha <sup>-1</sup> )	
	Baja densidad sombrío	Alta densidad sombrío
<i>Theobroma cacao</i> L.	1.210	1.037
<i>Musa AAB</i> Simmonds	1.210	1.037
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	173	346
<i>Hevea brasiliensis</i> Muell Arg.	173	346

La información recolectada se analizó con el software estadístico SAS®, versión 9.2 (SAS Institute Inc., 2003), donde se utilizó el diseño ya mencionado, con medidas repetidas en el tiempo. La comparación de medias se realizó con la prueba Tukey, con un nivel de significancia de 0.05.

Para analizar la información del crecimiento y desarrollo de las especies que conforman los cuatro sistemas agroforestales con cacao, se ensayarán los modelos de regresión no lineal que más se utilizan en la modelación del crecimiento vegetal (KIVISTE *et ál.*, 2002).

Para el análisis de la biomasa de las especies que conforman el sistema agroforestal con cacao en surco doble de melina, se ensayarán los modelos de regresión no lineal que más se utilizan en la evolución de la biomasa vegetal (KIVISTE *et ál.*, 2002).

### 1.2.5. Variables de evaluación

#### 1.2.5.1. Crecimiento y desarrollo

Para determinar el crecimiento y desarrollo de las especies que conforman el Sistema Agroforestal, se realizaron evaluaciones trimestrales, contadas a partir del tercer mes de injertado del cacao; para ello, se tomó una unidad experimental, por cada uno de los cuatro tratamientos por bloque, para un total de 12 unidades experimentales, por tiempo de lectura. En cada evaluación se tomaron diferentes parcelas, en las cuales, se tomó información sobre 3 plantas por especie (sombrío melina, cacao y unidades productivas de plátano), diferentes cada trimestre, para evitar problemas de

autocorrelación. Estas plantas se eligieron al azar dentro de la parcela, teniendo en cuenta que estaban en plena competencia para evitar posibles efectos de borde.

Conforme a los atributos de cada una de las especies se midieron variables alométricas comunes a todas, así:

- **Altura total:** Desde la superficie del suelo hasta el ápice de la planta (meristemo apical), o en el caso del plátano, hasta el vértice formado por las dos últimas hojas abiertas o en proceso de desdoblamiento.
- **Diámetro del tallo:** A 10 cm por encima del injerto, para el caso de cacao; y a 1.30 m, para melina. El diámetro del pseudotallo en plátano, se determinó sobre la superficie del suelo.
- Para cacao y melina se determinaron, además de las anteriores, las variables diámetro **de copa**, la cual se identificó N-S y E-O en la zona del plato; y la **altura de la copa**, desde la base de la copa, hasta el ápice de los individuos.

Para el caso de plátano, se tuvo en cuenta además:

- **Cantidad total de hojas emitidas:** Para ello se cuantificó las hojas totales, incluyendo las hojas caducas y las presentes.
- **Cantidad de hojas presentes funcionales:** Son las hojas que se encuentran activas fotosintéticamente, y que se encuentran en la planta en el momento de la lectura, esta característica es muy importante en el plátano por ser una planta de crecimiento determinado
- **Puyones:** Cantidad total de hijuelos presentes en el momento de cada evaluación.
- **Área foliar total (m<sup>2</sup>):** Para conocer esta variable, se utilizó la *ecuación* descrita por Kumar *et al.* 2002, para la cual debió tenerse en cuenta el largo y el ancho mayor de la lámina de la tercera hoja contada del ápice hacia abajo; información con la cual se conoció el área foliar total. (Ecuación 1)

**Ecuación 1. Área foliar para plátano (Kumar *et al.*, 2002)**

$$AFT = 0.8 \times L \times a \times N \times 0.662$$

*Donde:*

*AFT*: área foliar total.

*N*: cantidad total de hojas funcionales presentes.

*L*: largo de la lámina de la tercera hoja contada del ápice hacia abajo.

*a*: ancho de la lámina de la tercera hoja contada del ápice hacia abajo.

**1.2.5.2. Acumulación de la fitomasa**

Los estudios de la evolución de la biomasa, en 3 de las especies que conforman el SAF (cacao, plátano y melina), se realizaron en otras 7 parcelas, plantadas en alta densidad de sombrío de melina, como se describe en la Tabla 1-1; las cuales fueron diseñadas para este fin: Se adelantaron evaluaciones en 6 individuos por especie (o unidades productivas para el caso de plátano), seleccionados de manera aleatoria; los cuales se cosecharon en su totalidad, para separar sus diferentes órganos, lo que implicó la extracción completa de los especímenes seleccionados.

➤ **Periodicidad de cosecha:** Esta se realizó según la especie:

- **Cacao:** Se hicieron recolecciones trimestrales, a partir del tercer mes de injertado, y se continuó con la misma periodicidad, hasta completar su etapa vegetativa e inicio de la productiva, cuando comenzó la cosecha de mazorcas.
- **Plátano:** Se efectuaron 3 cosechas, una al sexto mes del establecimiento de la especie, luego a los nueve y los 12 meses; ésta última evaluación coincide con el primer ciclo productivo del cultivo.

- **Melina:** Se realizaron 4 extracciones, una con individuos de un año de establecimiento, luego al segundo, tercero y cuarto año de edad.

➤ **Cálculo de la biomasa:** Esta se realizó en varias fases:

- ❖ **Compartimentos analizados.** Luego de cosechados los individuos, se separaron los diferentes órganos o compartimentos de la planta; los que se pesaron en fresco, en el campo, así:
  - **Melina,** raíces, ramas gruesas y delgadas, hojas, tallo y frutos
  - **Cacao,** raíces primarias y secundarias, tallo, ramas y hojas
  - **Plátano,** puyones, raíces, cormo, pseudotallo y hojas
- ❖ **Tamaño de la muestra.** Por el gran volumen de fitomasa del sistema agroforestal, se tomaron muestras de diferentes pesos, de acuerdo a la especie, luego se colocaron en bolsas de papel, para su transporte al Laboratorio de Fisiología Vegetal de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín; donde se colocaron en la estufa de secado marca DiEs modelo TH3-84 a 70°C, hasta lograr peso constante; con lo cual se determinó la biomasa de cada órgano, para las 3 especies, basado en la diferencia del peso fresco y seco de las muestras, para luego calcularla para cada órgano y el individuo.

### 1.3. Resultados

#### 1.3.1. Crecimiento alométrico del cacao durante su fase vegetativa en el bosque seco tropical (bs-T).

Para el análisis del crecimiento del cacao, se tuvo en cuenta, primero el análisis de las variables alométricas, tales como Altura total, Diámetros del tallo (Injerto) y de la copa; acumulación de la biomasa y análisis del desarrollo con base a las variables de crecimiento, además la acumulación de la biomasa, modelos de crecimiento, y análisis tradicional con las variables de crecimiento.

##### 1.3.1.1. Análisis de las variables alométricas

Para las variables alométricas evaluadas en cacao: altura total, diámetro del tallo (injerto) y diámetro de la copa, sólo se encontró efecto significativo de la edad del cultivo, no siendo significativos los efectos del maderable, de la densidad de población del sombrío, ni su interacción. Ello indica que el crecimiento y desarrollo del cultivo de cacao, como es de esperarse, estuvo en función del tiempo, es decir que para las variables evaluadas, hubo un incremento en el transcurso de su fase vegetativa (Tabla 1-2).

**Tabla 1-2.** Análisis de varianza del comportamiento alométrico del cacao, en respuesta a la edad, tipo de maderable y densidad de población del sombrío, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

<b>Efecto</b>	<b>Altura total</b>	<b>Diámetro del injerto</b>	<b>Diámetro de copa</b>
Edad del cacao	<.0001*	<.0001*	<.0001*
Maderable	0.2977	0.0627	0.7634
Densidad población del sombrío	0.1002	0.1137	0.5846
Maderable x Densidad población del sombrío	0.3387	0.6087	0.2359

\* Diferencias significativa (P<0.05).

➤ **Altura total y diámetros del tallo (injerto) y de la copa**

Como se puede apreciar en la Tabla 1-3, se presentó diferencia significativa en altura total entre todas las edades; con mayor desviación estándar a los 24 meses después de injertado (MDI), con un valor de 0.205. En consecuencia, la evolución de la altura de la planta fue incrementalmente significativa a medida que transcurrió la fase vegetativa. Por otra parte, al inicio de la producción de mazorcas de cacao (24 MDI), los árboles alcanzaron una altura aproximada, de 3.0 m (Figura 1-1).

**Tabla 1-3.** Comparación de medias de los parámetros alométricos durante la fase vegetativa del cacao (*Theobroma cacao* L.) plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013. Edad injerto: meses después de injertado (MDI); Altura total: metros (m); Diámetro del injerto: centímetros (cm); Diámetro copa: metros (m)

Edad patrón	Edad injerto MDI	Altura total m	Diámetro del injerto cm	Diámetro copa m
15	3	0.681 ± 0.135 a	0.300 ± 0.119 a	0.538 ± 0.149 a
19	7	0.962 ± 0.088 b	0.935 ± 0.292 b	1.035 ± 0.337 b
22	10	1.274 ± 0.104 c	1.830 ± 0.604 c	1.165 ± 0.365 b
24	12	1.634 ± 0.138 d	2.484 ± 0.487 d	1.423 ± 0.434 c
27	15	2.188 ± 0.159 e	3.092 ± 0.723 e	1.707 ± 0.347 d
30	18	2.571 ± 0.122 f	3.670 ± 0.565 f	2.035 ± 0.427 e
33	21	2.845 ± 0.126 g	4.333 ± 0.915 g	2.133 ± 0.498 e
36	24	3.015 ± 0.205 h	4.397 ± 0.800 g	2.048 ± 0.486 e

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey ( $P > 0.05$ ).

Sin considerar los tratamientos, maderable y densidad de población del sombrío, como se observa en la Tabla 1-3, al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), hubo un incremento en el diámetro del injerto en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao. El comportamiento del tallo (injerto) expresa que se va engrosando a medida que transcurre la fase vegetativa de la planta; de tal manera que, a los 10 MDI se triplicó el grosor del tallo, con respecto a la primera observación. A partir de los 12 MDI, el incremento que es estadísticamente significativo, se da a razón de un 35% aproximadamente en las siguientes edades, hasta los 21 MDI; fase en la cual se estabilizó el desarrollo de este órgano, sin presentar divergencia estadística entre esta edad y los 24 MDI (Tabla 1-3); ello muestra que, en este período se estabilizó el desarrollo del órgano, con un mínimo engrosamiento entre estas edades.

Así mismo, el diámetro de la copa tuvo un incremento, a medida que transcurrió la fase juvenil del cacao. Como se observa en la Tabla 1-3, al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), el diámetro de la copa, se incrementó significativamente, entre los 3 y 7 MDI; el cual se duplicó en esta fase, cuando el dosel expresó su máxima velocidad de crecimiento, tal como se analizará más adelante; ya que marca el inicio de la desaceleración del crecimiento de la copa.

A los 10 MDI no hubo divergencias estadísticas con la última edad; pero esto sí ocurrió con las siguientes edades hasta los 18 MDI, cuando se estabilizó en alrededor de 2.0 m el diámetro de la copa. Ello coincide con el inicio de la floración, cuando los árboles alcanzaron los 2.5 m de altura y 3.6 cm de grosor del injerto; posteriormente (21 y 24 MDI), el diámetro del injerto, también, se estabiliza en 4.3 cm y la altura de los árboles llega a ser del orden de los 3.0 m (Tabla 1-3), cuando iniciaron su fase productiva.

### 1.3.1.2. Modelo de crecimiento ajustado para el cacao

Puesto que no hubo efecto de los tratamientos para ninguna de las variables alométricas, para cada una de ellas se ajustó un único modelo. De esta manera, con los datos obtenidos en campo, se ajustó el crecimiento para altura total, diámetro del tallo, y diámetro de la copa, con base en el modelo de Gompertz, según Ecuación 2, y como se puede observar gráficamente en la Figura 1.1

#### Ecuación 2. Modelo de Gompertz para variables alométricas

$$y = e^{a-be^{-ct}}$$

*Dónde:*

- y:* Lectura en metros de la variable alométrica.
- a, b y c:* Parámetros del modelo.
- t:* Tiempo en meses.
- e:* Base del logaritmo neperiano (2.7182...).

Asimismo, se presentan en la Tabla 1-4, los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables alométricas: Altura total, Diámetro del tallo y Diámetro de la copa

**Tabla 1-4.** Parámetros del modelo de Gompertz para las diferentes variables alométricas del cacao, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao (*Theobroma cacao L.*) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables alométricas		
	Altura total	Diámetro injerto	Diámetro copa
a	1.538472	1.61386	0.90305
b	2.602411	4.72066	2.17947
c	0.078016	0.15464	0.11864

Las tasas de crecimiento instantáneas se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

$$\frac{dy}{dt} = bce^{a-be^{-ct}-ct}$$

De esta manera, se pudo calcular dichas tasas de crecimiento para cualquier tiempo. En consecuencia, con la ecuación de Gompertz, se obtuvieron las velocidades de crecimiento para cada variable evaluada: Altura total, Diámetro del injerto y Diámetro de la Copa (Tabla 1-5).

Respecto a la Altura total de los árboles, en la Tabla 1-5, se confirma lo comentado anteriormente, en las tasas de crecimiento para las diferentes edades, se apreciaron dos fases, claramente diferenciables: Los primeros 12 MDI, donde se presentó una evolución incremental, para que en los siguientes 12 meses, es decir hasta los 24 MDI, la tasa fuera desacelerada.

Por otra parte, la velocidad de crecimiento del diámetro del injerto es acelerada hasta los 10 MDI, cuando casi se triplicó el grosor del tallo (Tabla 1-3), con respecto a los 3 MDI; con la posterior desaceleración a partir de los 12MDI, donde el injerto alcanzó el grosor apropiado para sostener los otros órganos del dosel, como se comentó previamente.

**Tabla 1-5.** Comparación de Tasas de crecimiento para las variables alométricas en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao (*Theobroma cacao L.*), plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013. Edad injerto: meses; Tasa Altura total: metros.mes<sup>-1</sup>; Tasa Diámetro injerto: cm.mes<sup>-1</sup>; Tasa Diámetro de copa: m.mes<sup>-1</sup>

Edad injerto (meses)	Tasa de crecimiento Altura Total	Tasa de crecimiento Diámetro injerto	Tasa de crecimiento Diámetro de copa
3	0.095	0.118	0.097
7	0.121	0.251	0.108
10	0.131	0.286	0.100
12	0.134	0.274	0.091
15	0.131	0.227	0.075
18	0.123	0.169	0.058
21	0.111	0.119	0.044
24	0.097	0.080	0.033

Así mismo, la tasa de crecimiento de la copa, en diámetro, fue acelerada los 7 primeros meses del injerto, cuando creció más de 0.1 m.mes<sup>-1</sup>; luego, a partir de los 10 MDI es desacelerada, hasta llegar a ser del orden de 0.05 m.mes<sup>-1</sup> a los 18 MDI, al inicio de la floración, con árboles de, alrededor, 2.5 m de altura y 3.6 cm de diámetro del injerto (Tabla 1-3). Al iniciarse la cosecha (24 MDI), la copa se desarrolló a una tasa de 0.033 cm.mes<sup>-1</sup> (Tabla 1-5), inferior con respecto a la de 3 MDI (0.097 m.mes<sup>-1</sup>). Igualmente, a esta edad se apreció la menor velocidad en los otros dos parámetros: Altura total (0.097 m.mes<sup>-1</sup>) y Diámetro del injerto (0.080 m.mes<sup>-1</sup>).

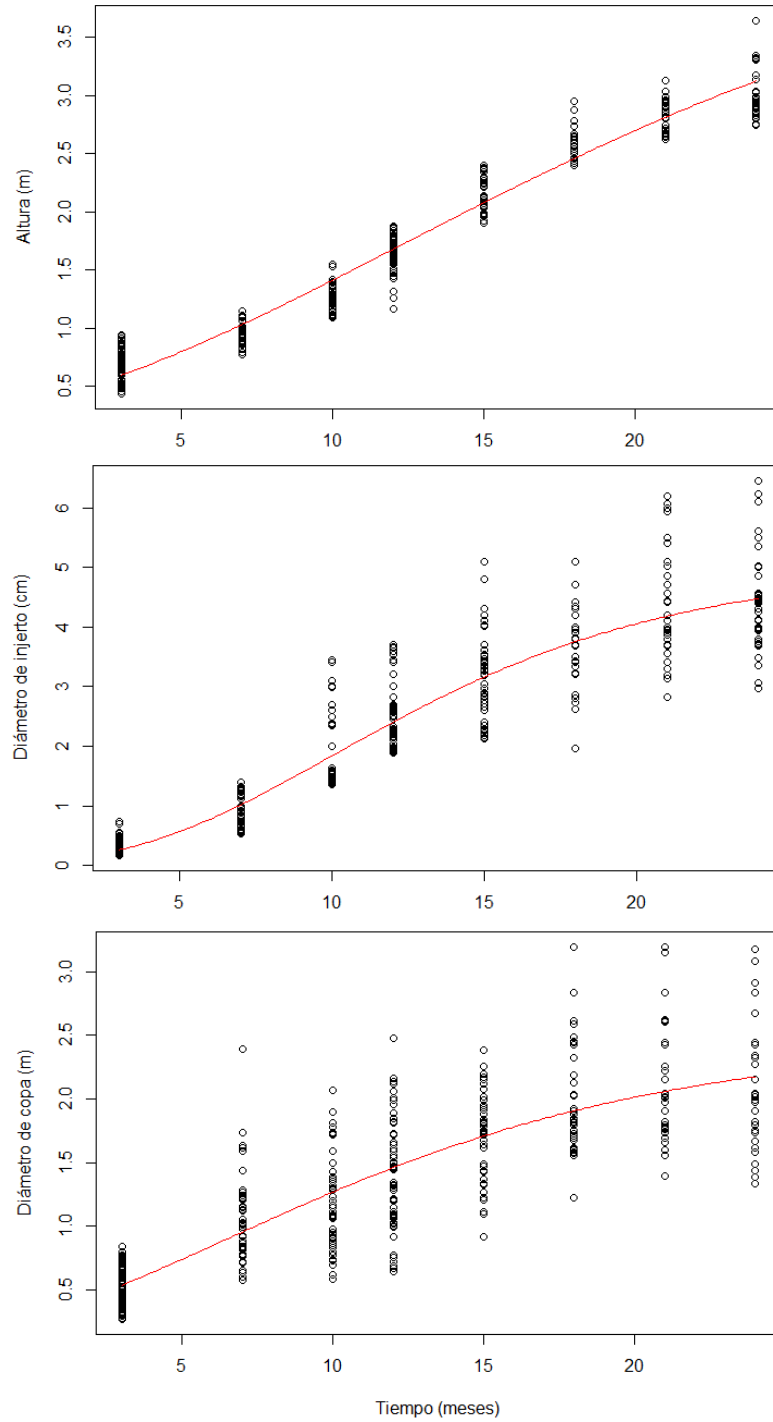
Acorde con el modelo de Gompertz, la representación gráfica de estos parámetros alométricos se encuentra en la Figura 1.1, donde se aprecia las tasas de cambio en la medida que ocurre el desarrollo del vegetal. Así se tiene que, hasta los 12 MDI, la evolución de la altura total es lineal, con una tasa de cambio de 0.134 m.mes<sup>-1</sup>; momento a partir del cual se presentó la desaceleración de esta tasa, hasta llegar a ser a los 24 MDI (0.097 m.mes<sup>-1</sup>) semejante a lo observado a los 3 MDI; por lo cual, la reducción en las tasas de cambio conduce a la pérdida de la linealidad, con tendencia a la concavidad, lo cual es más notorio a los 21 MDI.

De igual manera, el diámetro del injerto exhibió una tasa de cambio acelerada hasta los 10 MDI, como se aprecia en la Figura 1.1; a diferencia con la altura, la concavidad en la curva de crecimiento se manifestó a esta edad, con un nuevo cambio en la tasa, a los 18 MDI, cuando se

inició la floración; con tendencia a la estabilización de la curva entre los 21 y 24 MDI, momento en el cual se inició la cosecha de mazorcas de cacao.

El diámetro de la copa tuvo una tasa de cambio acelerada, solo, hasta los 7 MDI, cuando la curva presentó una tendencia lineal, en esta época ocurrió una intensa formación de follaje, con un aumento notorio en el área foliar, como se observa en la Tabla 1-12, la cual pasa de 0.299 m<sup>2</sup> a los 7 MDI, a los 0.508 m<sup>2</sup> a los 10 MDI. El diámetro de copa, a los 10 MDI, se manifestó la concavidad en la curva, con tasas de cambio, cada vez más reducidas hasta ser, a los 18 MDI (inicio de la floración), inferior en casi un 50% con respecto a lo logrado a los 3 MDI y un tercio inferior a los 24 MDI cuando se inició la recolección de mazorcas. (Figura 1.1).

En consecuencia, la estrategia de crecimiento del sistema aéreo (*shoot*) del cacao en el bs-T es secuencial, de tal manera que, en los primeros 12 MDI el vegetal estuvo dedicado al desarrollo en altura y engrosamiento del tallo; con la diferencia que, en este último fue acelerado hasta los 10 MDI. Así mismo, el desarrollo del dosel, en forma acelerada ocurrió en los primeros 7 meses, con la formación de follaje en la primera fase del crecimiento vegetativo. En este momento, con un balance apropiado entre las estructuras que conforman el sistema aéreo (SA), el vegetal se prepara para la diferenciación de órganos, lo que ocurrió a los 18 MDI. El período comprendido entre esta edad y los 24 MDI, el desarrollo del SA es desacelerado, porque la planta direcciona los foto asimilados hacia las estructuras reproductivas y productivas, cosechadas en la última edad mencionada.



**Figura 1.1.** Evolución del crecimiento alométrico del cacao (según el modelo de Gompertz) durante la fase vegetativa e inicio de la productiva en el bosque seco tropical (bs-T). Diámetro de copa (m); Diámetro del injerto (cm); Altura total (m), Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013

### 1.3.1.3. Acumulación de la fitomasa del cacao en su fase vegetativa e inicio de la productiva

Puesto que la biomasa se obtuvo a partir de un grupo de parcelas con un arreglo particular (cf. Tabla 1.1), solamente se evalúa su cambio a través del tiempo, no siendo posible evaluar efecto de tratamientos (maderable, densidad de población del sombrío).

Como se observa en la Tabla 1-6, hubo efecto significativo de la edad sobre las diferentes variables de acumulación de biomasa.

**Tabla 1-6.** Valores P del análisis de varianza para la biomasa del cacao en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Variables evaluadas	Efecto Edad del cacao (Valor P)
<b>Raíz principal</b>	<.0003*
<b>Raíces secundarias</b>	<.0002*
<b>Tallo</b>	<.0001*
<b>Ramas</b>	<.0003*
<b>Hojas</b>	<.0001*
<b>Área foliar</b>	<.0001*
<b>Biomasa total</b>	<.0001*

\* Efecto significativo (P<0.05).

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), para todas las edades del cacao en su etapa juvenil, se encontró un incremento en todas las variables evaluadas: raíz principal, raíces secundarias, tallo, ramas, hojas, y biomasa total (Tabla 1-7).

En todas las variables se presentó un incremento inicial lento, lo cual no tuvo diferencia estadísticamente significativa, durante los primeros 10 MDI, para la biomasa total, las ramas y las hojas; para la raíz principal no hubo diferencia significativa durante los primeros 12 MDI, a partir de este momento se da un gran cambio en el desarrollo, mostrando diferencia estadística entre los 12 y 15 MDI, edad en la cual mantuvo un crecimiento lento, como se detallará más adelante cuando

se analicen las tasas de crecimiento, sin diferencia significativa entre los 15, 18, 21 y 24 MDI. En las raíces secundarias, no hubo un incremento significativo entre el mes 3 y 7.

Hubo un cambio significativo entre 7 y 10 MDI, sin diferencia entre 10 y 12 MDI, y con divergencia estadística entre los 12 y 15 MDI, edad a partir de la cual no muestra diferencias significativas, hasta los 21 MDI; sin embargo hubo un cambio notorio entre los 21 y 24 MDI, tiempo en el cual la plantación inició su etapa productiva, indicando que la nutrición del árbol, por parte de las raíces secundarias, se encaminó al llenado de frutos (Tabla 1-7)

**Tabla 1-7** Comparación de medias para la acumulación de la biomasa de cacao en su fase vegetativa e inicio de la productiva en cada órgano (Tallo, Ramas, Hojas, Raíz principal, Raíces secundarias, Peso seco total), en kilogramos, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

<b>Edad patrón</b>	<b>meses Injerto</b>	<b>Tallo</b>	<b>Ramas</b>	<b>Hojas</b>
15	03	0.171 ± 0.093 a	0.031 ± 0.010 a	0.036 ± 0.017 a
19	07	0.183 ± 0.112 a	0.032 ± 0.010 a	0.057 ± 0.022 a b
22	10	0.236 ± 0.059 a b	0.059 ± 0.011 a b	0.102 ± 0.042 a b c
24	12	0.254 ± 0.114 a b c	0.071 ± 0.056 a b c	0.157 ± 0.075 b c
27	15	0.321 ± 0.071 b c d	0.094 ± 0.026 a b c	0.158 ± 0.058 b c
30	18	0.375 ± 0.178 c d e	0.098 ± 0.039 a b c	0.166 ± 0.050 c
33	21	0.407 ± 0.131 d e	0.129 ± 0.128 b c	0.407 ± 0.181 d
36	24	0.485 ± 0.108 e	0.142 ± 0.091 c	0.462 ± 0.117 d

<b>Edad patrón</b>	<b>meses Injerto</b>	<b>Raíz ppal</b>	<b>Raíces secundarias</b>	<b>Peso seco Total</b>
15	03	0.077 ± 0.031 a	0.022 ± 0.016 a	0.337 ± 0.137 a
19	07	0.132 ± 0.060 a b	0.025 ± 0.024 a	0.429 ± 0.187 a b
22	10	0.146 ± 0.115 a b	0.039 ± 0.021 b c	0.583 ± 0.117 a b
24	12	0.159 ± 0.061 a b	0.054 ± 0.029 b c	0.695 ± 0.214 c b
27	15	0.272 ± 0.162 c	0.120 ± 0.082 d c	0.974 ± 0.274 d
30	18	0.305 ± 0.163 c	0.151 ± 0.088 d e	1.087 ± 0.370 d
33	21	0.313 ± 0.071 c	0.164 ± 0.130 d e	1.418 ± 0.270 e
36	24	0.380 ± 0.169 c	0.215 ± 0.120 e	1.685 ± 0.298 e

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey (P =0.05).

Por otra parte, el tallo, que fue el órgano que mostró un incremento más notorio sobre los demás órganos, no tuvo diferencia significativa en la acumulación de la biomasa hasta los 12 MDI, con

diferencia significativa entre los 12 y los 15 MDI, donde hubo un aumento en la biomasa, cuando se dio la diferenciación celular para la formación de las estructuras reproductivas, las flores, las cuales iniciaron su aparición a partir del mes 15, sin diferencia estadística hasta los 24 MDI, en inicio de la producción de mazorcas de cacao. Las ramas por su parte, aumentaron paulatinamente, pero sin divergencia estadística, desde el inicio de las evaluaciones, hasta los 18 MDI, período en el cual se dio la primera floración, luego con diferencia significativa entre los 18 y 21 MDI, y sin diferencia entre los 21 y 24 MDI (Tabla 1-7).

Continuando con la comparación de medias de Tukey, la biomasa media de las hojas no mostró diferencias significativas los primeros 7 MDI, luego con diferencias entre los 7 y los 10 MDI, y los 10 y 12 MDI, sin diferencias significativas entre 12, 15 y 18 MDI; después se presenta un cambio notorio entre los 18 y 21 MDI, luego se estabiliza, sin diferencia significativa, entre los 21 y 24 MDI. Finalmente, la biomasa total presenta una acumulación lenta, sin diferencia significativa los primeros 10 MDI, luego con diferencia entre los 10 y 12 MDI, con un incremento notorio entre el mes 12 y 15, que arroja diferencia significativa entre estas edades, y luego se da una diferencia amplia en el momento de la floración, la cual se da a los 18 MDI (Tabla 1-7).

#### ➤ **Biomasa total, Raíz principal y Raíces secundarias**

Como se mencionó anteriormente, la acumulación de la biomasa total, al igual que las demás variables medidas, se incrementó con el tiempo, en el desarrollo de la etapa juvenil del cacao, mostrando una acumulación total, a los 24 MDI, de 1.685 kg /individuo (Tabla 1-8), edad en la cual se ha iniciado la fase productiva del cultivo. El aumento en materia seca, es lento en las primeras edades del cultivo, cuando se inicia la brotación del injerto, luego, se hace más notorio en la medida que transcurre la fase juvenil del cacao (18, 21 y 24 MDI).

Como se observa en la Tabla 1-8, la raíz principal se mantuvo como el segundo órgano que aportó en mayor cantidad a la biomasa del cacao, desde el inicio hasta el mes 21 de edad del injerto, no queriendo decir con esto que no hubo incremento hasta la finalización de la fase juvenil del cacao, (312.624 g a los 21 meses y 380.060 g a los 24 MDI), sino que a partir de este tiempo, las hojas obtuvieron mayor ganancia en materia seca, realizando un mayor aporte a la biomasa total, con 462.564 g a los 24 MDI.

**Tabla 1-8.** Acumulación de la biomasa de cacao en su fase vegetativa e inicio de la productiva por órgano (Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y total) en g/individuo en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Edad patrón	(meses) Injerto	Raíz principal	Raíces secundarias	Tallo	Ramas	Hojas	Total
		15	03	77.309*	22.000	171.085*	31.333
19	07	132.089*	25.333	182.955*	31.500	56.789	428.667
22	10	146.000*	39.333	235.915*	59.500	101.998	582.747
24	12	159.035*	54.352	253.667*	70.649	158.136	695.837
27	15	272.122*	120.057	321.452*	94.556	165.827	974.015
30	18	304.793*	151.386	375.216*	98.294	157.648	1087.337
33	21	312.624*	163.635	406.856*	128.667	406.735	1418.519
36	24	380.060	215.402	484.646*	142.462	462.564*	1685.135

\*Órganos con mayor acumulación de biomasa en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao

Por otra parte las raíces secundarias, muestran una acumulación lenta en las diferentes edades del cultivo, lo que indica que la raíz principal ganó más biomasa que las raíces secundarias; sin embargo nótese que en la medida que transcurre la etapa juvenil del cacao, como se aprecia en la Tabla 1-8, las raíces secundarias, van ganando mayor proporción en la biomasa, logrando un aumento significativo, pasando de 54.352 g en el mes 12, a 120.057 g en el mes 15, luego incrementó su peso seco a los 215,402 g a los 24 meses.

### ➤ Biomasa Tallo, ramas y hojas

El tallo fue el órgano que aportó desde el inicio de la etapa juvenil del cacao, la mayor cantidad de biomasa, con respecto a todos los órganos, como se observa en la Tabla 1-8 y la más alta acumulación de biomasa se dio a los 24 MDI, alcanzando un peso seco de 484.646 gramos/individuo. Sin embargo, a esta misma edad, las hojas aparecen con una acumulación muy similar, a la del tallo, con 462.564 gramos/individuo de materia seca, siendo éstas, junto con el tallo, las que aportaron la mayor cantidad de biomasa a esta edad, con respecto a los otros órganos. Las hojas fueron acumulando paulatinamente la biomasa en el transcurso de la fase juvenil del cacao, hasta los 18 MDI, fecha en la cual se iniciarían las primeras floraciones, dándose un incremento notorio en la biomasa, pasando de 157.648 a los 18 MDI a 406.735 gramos/individuo a la edad de

21 meses, llegando a alcanzar 484.646 gramos/individuo a los 24 meses de edad (Tabla 1-8), como se mencionó anteriormente. Esto demuestra que el árbol aumenta su eficiencia fotosintética, para la formación de estructuras reproductivas, como son las flores y posterior cuajamiento de frutos (mazorcas). Así como en las hojas, las ramas, presentaron una ganancia lenta, en la acumulación de la biomasa, aumentando de manera notoria desde los 18 MDI, pasando de 98.294 a 128.667 gramos/individuo a los 21 MDI, alcanzando una acumulación máxima de 142.462 gramos/individuo a los 24 MDI (Tabla 1-8), manteniendo una biomasa relativamente constante, indicando que el árbol se mantiene estable en el sostenimiento de su parte aérea con las ramas.

#### 1.3.1.4. Modelo ajustado para biomasa del cacao

Se ajustó la biomasa de las diferentes variables evaluadas, Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa total, con base en el modelo alométrico, según la Ecuación 3, así:

#### Ecuación 3. Modelo alométrico para variables de biomasa

$$y = at^b$$

Dónde:

- $y$ : Lectura en gramos de la variable evaluada.  
 $a$  y  $b$ : Parámetros del modelo.  
 $t$ : Tiempo en meses.

En la Tabla 1-9, se presentan los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables evaluadas en la biomasa del cacao.

**Tabla 1-9.** Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de biomasa del cacao, en el bs-T, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao (*Theobroma cacao L.*) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables de evaluadas					
	Raíz principal	Raíces secundarias	Tallo	Ramas	Hojas	Biomasa total
a	0.6985	0.007941	3.3963	0.313	0.002335	1.065
b	1.7621	2.855758	1.3775	1.683	3.406274	2.05

Las tasas instantáneas de acumulación de la biomasa, se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

Derivada:

$$\frac{dy}{dt} = abt^{b-1}$$

De esta manera, se puede calcular las tasas de acumulación de biomasa instantáneas para cualquier tiempo. Entonces, con la ecuación del modelo Alométrico, se obtuvieron las tasas de biomasa para cada variable evaluada: Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa total (Tabla 1-10).

Para todas las variables evaluadas, se presentó una aceleración en la acumulación de la fitomasa, durante las diferentes edades del cultivo, aunque, el tallo que fue el que más biomasa acumuló, tuvo un incremento casi constante, con pocas variaciones en la tasa de acumulación, así: 13.00 g.mes<sup>-1</sup> a los 3 MDI; 15.528 g.mes<sup>-1</sup> en el mes 12 y 18.097 g.mes<sup>-1</sup> a los 24 MDI. (Tabla 1-10). Gráficamente, se puede observar en la Figura 1.2 c, que el tallo, aunque muestra una ligera concavidad en la curva, predomina más una tendencia lineal, lo que confirma su incremento constante en la biomasa.

La velocidad de acumulación de biomasa fue más acelerada para las hojas, las cuales presentaron un incremento más notorio que los demás órganos, en el ciclo del cultivo, pasando de una velocidad de 5.377 g.mes<sup>-1</sup> en la edad de 3 MDI, con 16.662 g.mes<sup>-1</sup> a los 12 MDI y 44.204 g.mes<sup>-1</sup> a los 24 MDI (Tabla 1-10).

**Tabla 1-10** Comparación de las tasas de acumulación de biomasa para las variables Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa Total, en  $\text{g.mes}^{-1}$ , en las diferentes edades (meses), de la fase juvenil del cacao, (*Theobroma cacao L.*) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

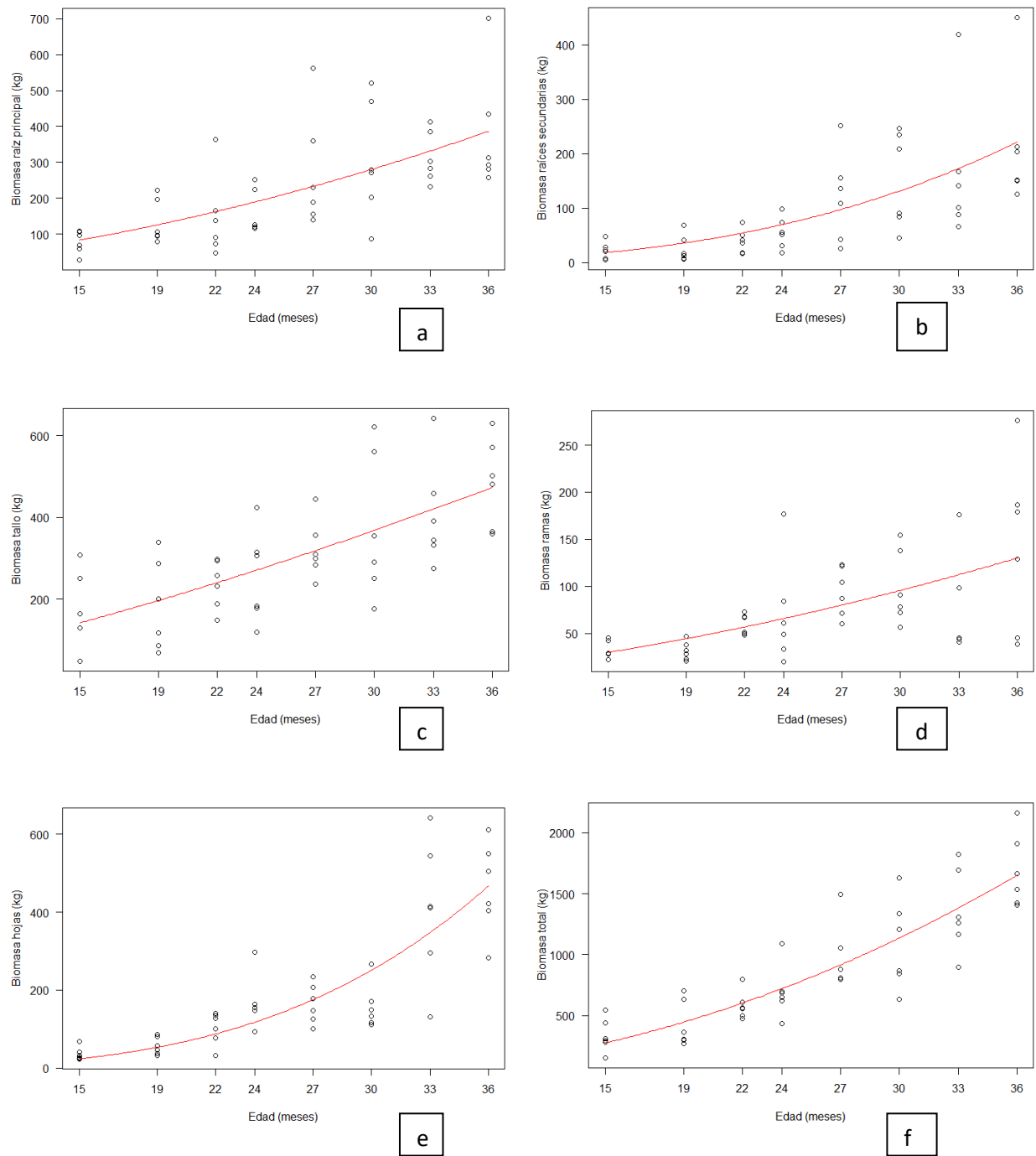
		<b>Tasas de acumulación de biomasa g/mes</b>					
<b>Edad patrón</b>	<b>Edad injerto</b>	<b>Raíz ppal.</b>	<b>Raíces sec.</b>	<b>Tallo</b>	<b>Ramas</b>	<b>Hojas</b>	<b>Total</b>
15	3	9.694	3.453	13.004	3.349	5.377	37.497
19	7	11.607	5.354	14.218	3.936	9.497	48.061
22	10	12.979	7.028	15.027	4.350	13.515	56.059
24	12	13.869	8.259	15.528	4.616	16.662	61.422
27	15	15.172	10.277	16.234	5.003	22.122	69.508
30	18	16.440	12.496	16.893	5.377	28.505	77.639
33	21	17.679	14.914	17.512	5.738	35.853	85.811
36	24	18.891	17.527	18.097	6.090	44.204	94.020

Gráficamente, en la Figura 1.2 e, se observa que se presenta una notoria concavidad en la curva, que muestra el aumento en la tasa, como se mencionó anteriormente. Las ramas por su parte, aunque presentaron una tasa incremental en el tiempo, no es tan marcada como en las hojas, lo que representa para el árbol, que la acumulación de fitomasa en este órgano, siendo menor que las hojas, es suficiente para sostener el sistema foliar total. Nótese la diferencia en la concavidad de ambas curvas, como se representa en la Figura 1.2 c y 1.2 e, en las ramas, la tendencia es más lineal que cóncava como sí ocurre en las hojas.

En cuanto a las raíces, se puede observar en la Tabla 1-10, que la tasa de acumulación en la Raíz principal, al inicio de la etapa juvenil del SAF, es dos veces mayor que las Raíces secundarias ( $9.694 \text{ g.mes}^{-1}$  Raíz principal y  $3.453 \text{ g.mes}^{-1}$  raíces secundarias) a los 3 MDI (15 meses edad del patrón), y posteriormente la tendencia en el aumento es muy similar, como se aprecia en la curva de crecimiento (Figura 1.2 a y 1.2 b), ambos órganos presentaron regular acumulación hasta el mes 27(15 MDI) en las velocidades de crecimiento, así: Para la raíz principal aumentó de  $11.607 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 19 meses,  $12.979 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 22;  $13.869 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 24 y  $15.172 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 27 meses.

Las raíces secundarias pasaron de  $5.354 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 19 meses,  $7.028 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 22;  $8.259 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 24 y  $10.277 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 27 meses de edad. La raíz principal continúa con esta tendencia similar hasta finalizar las evaluaciones; sin embargo las raíces secundarias presentaron una aceleración en la velocidad de acumulación, llegando a presentar a los 36 meses, una tasa similar a la de la raíz principal,  $18.891 \text{ g.mes}^{-1}$  para raíz principal y  $17.527 \text{ g.mes}^{-1}$  para las raíces secundarias (Tabla 1-10).

La tasa de acumulación de la fitomasa para todos los órganos, da como resultado, un aumento en la tasa de la biomasa total; la edad de 22 meses, es el punto donde la curva se hace cóncava (Figura 1.2 f ), conservando esta tendencia, la cual se ve influenciada por la tasa de velocidad que presentaron las hojas. La tasa de biomasa total pasa de  $37.497 \text{ g.mes}^{-1}$  en los 15 meses de edad ( 3 MDI) a  $94.020 \text{ g.mes}^{-1}$  a los 36 meses (Tabla 1-10).



**Figura 1.2.** Evolución de la acumulación de biomasa en los diferentes órganos del cacao (*Theobroma cacao* L.): Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa Total en kg, en las diferentes edades de su fase juvenil, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

### ➤ **Distribución porcentual de la fitomasa en los diferentes órganos del cacao**

Como se observa en la Tabla 1-11, las mayores proporciones de biomasa, se presentaron en el tallo y en las raíces, ya que son los órganos que mantuvieron la mayor contribución a la masa seca, en la mayoría de las edades, excepto a los 21 y 24 MDI; donde, además del tallo, las hojas son las principales aportantes a la fitomasa, alrededor del 28%. A los 7 MDI, se presentó la máxima proporción en la raíz principal, con casi 30%; ello indica que el vegetal ha acumulado la biomasa necesaria para el sostenimiento del individuo; posteriormente ésta fluctúa entre 23 y 28%, hasta estabilizarse en alrededor 22% después de los 21 MDI, como se observa en la Figura 1.3. Nótese como, a partir de los 18 MDI, donde se inicia la fase reproductiva del cacao, comienza una ligera disminución en la proporcionalidad de la raíz principal, momento en el cual se estabiliza el crecimiento de este órgano, por inicio de la floración.

**Tabla 1-11** Distribución de la fitomasa del cacao (*Theobroma cacao L.*) en proporciones (%), para los distintos órganos en las diferentes edades de su fase juvenil, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

<b>Edad</b>	<b>(meses)</b>	<b>Raíz principal</b>	<b>Raíces, secundarias</b>	<b>Tallo</b>	<b>Ramas</b>	<b>Hojas</b>
<b>Patrón</b>	<b>Injerto</b>					
15	03	22.902*	6.517	50.683*	9.282	10.615
19	07	30.814*	5.910	42.680*	7.348	13.248
22	10	25.054*	6.750	40.483*	10.210	17.503
24	12	22.855*	7.811	36.455*	10.153	22.726
27	15	27.938*	12.326	33.003*	9.708	17.025
30	18	28.031*	13.923	34.508*	9.040	14.498
33	21	22.039	11.535	28.682*	9.070	28.673*
36	24	22.554	12.782	28.760*	8.454	27.450*

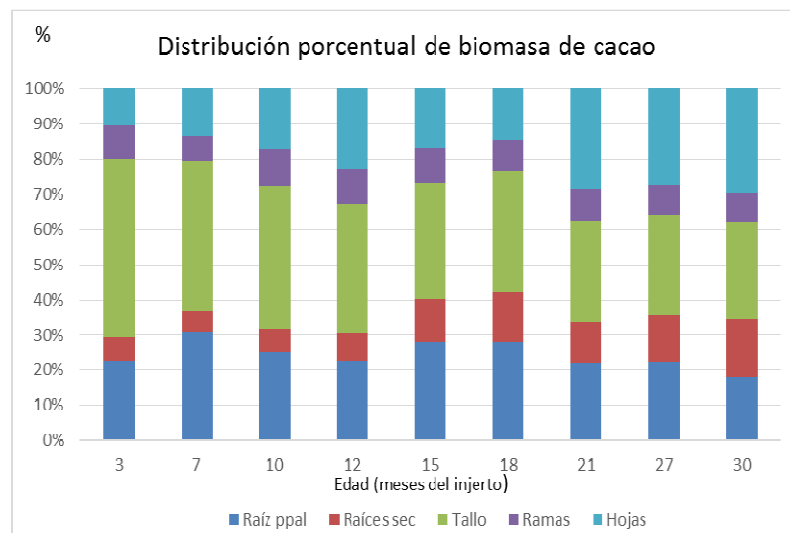
\* Órganos con mayor aporte en biomasa en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao, determinados en % de materia seca.

Es importante anotar que, las raíces secundarias mantuvieron el menor aporte proporcional (6–8%) a la fitomasa, primordialmente, los primeros 12 MDI; en el período de crecimiento siguiente (12–24 MDI) la contribución se estabiliza entre 11 y 14%, cuando las ramas aportaron entre 8 y 10%.

Respecto a los otros órganos del sistema aéreo (SA, *shoot*), ramas y hojas, se aprecia en la Tabla 1–11 que presentaron una tendencia incremental, de 7 – 10% en ramas y de 10 – 23% en hojas, los primeros 12 MDI; posteriormente, las ramas aportaron, de manera estable, alrededor del 9%. La contribución de las hojas, por sus atributos de antena de captación de la radiación y su permanente renovación se reduce del 23% a los 12 MDI a 17% (15 MDI) y casi 15%, al inicio de la floración (18 MDI); posteriormente, ocurre un incremento en la proporción del follaje a los 21 y 24 MDI, cuando se estabiliza en alrededor del 28%.

En la Figura 1.3. se aprecia cómo, en la primera fase del crecimiento, el tallo tiene una proporción del 50% de la fitomasa; pero, aunque mantiene esta mayor proporcionalidad, empieza a disminuir a partir desde los 7 MDI, hasta llegar a ser de casi 29% a los 24 MDI, Tabla 1-11.

A los 24 MDI, la proporción entre el sistema aéreo (SA *shoot*) y el sistema subterráneo (SS, *root*), llega a ser de 2:1, donde el total de la biomasa acumulada en el sistema aéreo (tallos, ramas y hojas) es de 1090 g, y la del sistema subterráneo (raíz principal y raíces secundarias) es de 595 g. (Tabla 1-8).

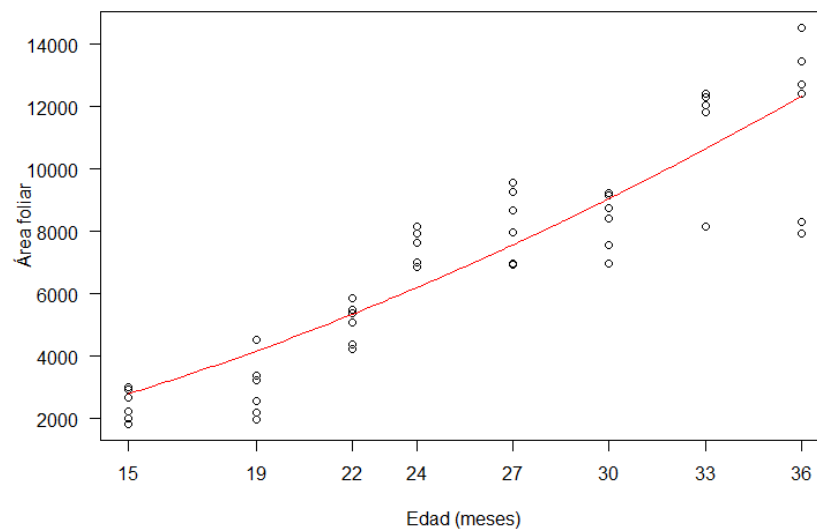


**Figura 1.3.** Distribución de la biomasa del cacao (*Theobroma cacao L.*), en su fase juvenil, en proporciones por órgano, en porcentaje (%) de materia seca, en el bs-T, Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013

Como se aprecia en la Figura 1.3, la proporción más baja de fitomasa, durante la fase juvenil del cacao, está dada por las ramas; las que alcanzaron la máxima proporción a los 10 MDI, casi 10% (Tabla 1-11); esta proporción se mantiene estable, con una leve disminución hasta los 24 MDI, aproximadamente 8%.

### ➤ Área foliar para el cacao

En la Figura 1.4., se observa la curva que describe el comportamiento del área foliar del cacao, medido en  $\text{cm}^2$ ; como la plantación se injertó a los 12 meses de edad, las lecturas corresponden a las mediciones hechas a partir de los 15 meses de edad (3 MDI). Nótese el incremento paulatino que adquieren las hojas, dando como resultado el aumento en el área foliar. Al inicio tiene un área de  $2000 \text{ cm}^2$  aproximadamente, y aumenta notoriamente en los 9 meses siguientes, llegando a los  $6000 \text{ cm}^2$  a los 24 meses (12MDI) y después el aumento es menos notorio, cuando alcanza un poco más de los  $12000 \text{ cm}^2$  a los 36 meses (24 MDI) esto demuestra que el Área foliar del cacao se incrementó en el tiempo, llegando a alcanzar los niveles adecuados para el inicio de la cosecha de mazorcas, indicando como se mencionó anteriormente, la importancia de las hojas en la fase productiva del cultivo.



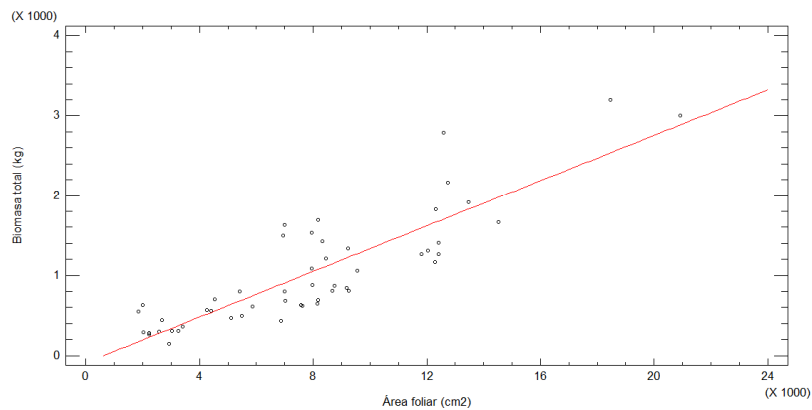
**Figura 1.4.** Área foliar para la especie cacao (*Theobroma cacao L.*), en  $\text{cm}^2$ , en su fase juvenil en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2011-2013

### ➤ Análisis de Regresión Simple para las variables de evaluación

Se evaluaron modelos de regresión simple para cada una de las variables de biomasa –en kilogramos de materia seca– (Raíz principal, Raíces secundarias, Tallo, Ramas, Hojas y Biomasa total), en función del área foliar (medida en centímetros cuadrados); únicamente se encontró relación significativa entre la Biomasa total (Peso seco total) y el Área foliar (R-cuadrada = 74.491 %). Los resultados se presentan en la Tabla 1-12 y Figura 1-5.

**Tabla 1-12.** Coeficientes de Regresión Lineal simple para variables Biomasa total, en función del área foliar, en cacao (*Theobroma cacao L.*), en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2011-2013.

Parámetro	Estimado	Estándar Error	Estadístico T	Valor-P
<b>Intercepto</b>	-87.6533	105.602	-0.830032	0.4105
<b>Pendiente</b>	0.142139	0.0118825	11.962	0.0000



**Figura 1.5.** Modelo ajustado para Biomasa total en función de Área foliar en cacao (*Theobroma cacao L.*), durante la fase juvenil en el bs-T de la Estación Agraria Cotové.

### 1.3.2. Crecimiento alométrico del plátano durante su primer ciclo productivo en el bosque seco tropical (bs-T).

Para evaluar el crecimiento del plátano, se tuvo en cuenta, primero el análisis de las variables alométricas, tales como Altura de la planta, diámetro del seudotallo, hojas totales, hojas presentes, número de puyones, y área foliar, también la acumulación de la biomasa en todos los órganos.

#### 1.3.2.1. Análisis de las variables alométricas del plátano

Al analizar la evolución del crecimiento del plátano, (Tabla 1-13), se encontró diferencia significativa entre la interacción edad del cultivo por las variables alométricas medidas: Altura de la planta, Diámetro del seudotallo, Hojas totales emitidas, Hojas funcionales presentes, Número de puyones y Área foliar; sin interacción con los tratamientos, maderable y densidad de población del sombrío, lo que indica que el crecimiento y desarrollo del cultivo de plátano, estuvo en función del tiempo, es decir que para las variables evaluadas, hubo un incremento en el transcurso de su ciclo productivo.

**Tabla 1-13.** Análisis de varianza del comportamiento alométrico del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en respuesta a la edad, tipo de maderable y densidad de población del sombrío, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Efecto	Altura planta	Diámetro del seudotallo	Hojas totales emitidas	Hojas presentes funcionales	Numero de puyones	Área foliar
Maderable	0.6489	0.9046	0.6862	0.4469	0.7335	0.2571
Densidad población del sombrío	0.6229	0.0073*	0.4688	0.2135	0.4101	0.4739
Edad del plátano	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
Maderable x Densidad población del sombrío	0.4230	0.5694	0.9865	0.7963	0.5431	0.5241

\* Diferencias significativa (P<0.05).

Para el Diámetro del seudotallo, además de la edad, el tratamiento densidad de población de sombrío, presentó interacción estadística; es decir que independiente del tipo de maderable, el

seudotallo tuvo un comportamiento diferente, según la densidad de siembra de los maderables, ya sea en surco sencillo o en surco doble, más adelante se realizará este análisis.

### ➤ Altura de la planta

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), como se observa en la Tabla 1-14, cuando finalizó el primer ciclo productivo del plátano (12 meses), la planta alcanzó una altura de 4.0 m. aproximadamente. Hubo una evolución en la altura de la planta, aunque la tasa de crecimiento fue decreciente; con diferencias estadísticas entre todas las edades, de tal manera, que el incremento fue constante en el transcurso de su ciclo productivo, así, a los 4 meses, la planta creció 1.710 m y llegó hasta los 4.016 m, a los 12 meses (Tabla 1-14), donde cesa el crecimiento, cuando inició la emisión de la bellota.

**Tabla 1-14.** Comparación de medias de los parámetros alométricos del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*). Altura de la planta: m; Diámetro del pseudotallo: m; Número de puyones, Hojas totales, Hojas presentes: unidades; Área foliar: m<sup>2</sup>, durante su primer ciclo productivo en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

<b>Edad</b>	<b>Altura planta</b>	<b>Diámetro del pseudotallo</b>	<b>Numero de puyones</b>
<b>meses</b>	<b>m</b>	<b>m</b>	<b>un</b>
04	1.710 ± 0.144 a	0.031 ± 0.016 a	3.305 ± 1.431 a
07	2.256 ± 0.441 b	0.032 ± 0.030 a	3.083 ± 1.228 a
09	3.764 ± 0.270 c	0.059 ± 0.027 b	8.333 ± 3.877 b
12	4.066 ± 0.175 d	0.071 ± 0.027 b	8.785 ± 2.778 b

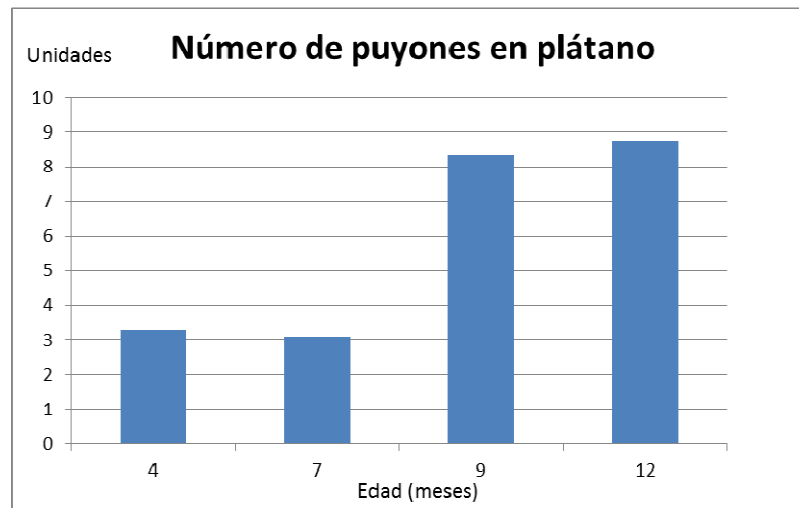
  

<b>Edad</b>	<b>Hojas totales emitidas</b>	<b>Hojas funcionales presentes</b>	<b>Área foliar</b>
<b>(meses)</b>	<b>un</b>	<b>un</b>	<b>m<sup>2</sup></b>
04	16.806 ± 2.048 a	8.028 ± 1.183 a	3.241 ± 0.260 a
07	18.583 ± 2.376 b	8.861 ± 1.099 b	6.246 ± 0.550 b
10	23.139 ± 2.206 c	11.528 ± 1.681 c	12.888 ± 1.325 c
12	27.286 ± 0.726 d	12.714 ± 0.994 d	13.119 ± 0.842 c

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey (P =0.05).

### ➤ Número de puyones

Con respecto al número de puyones, se puede apreciar en la Tabla 1-14, que, en la etapa de máximo incremento foliar (mayor emisión de hojas), es decir entre el séptimo y noveno mes de edad del cultivo (18.583 y 23.139 hojas respectivamente), también aumentó el número de puyones emitidos por planta, pasando de 3.08 a 8.33 puyones/ unidad productiva (Tabla 1-14), o sea más del 100%, por lo que la actividad de la planta favorece además la multiplicación vegetativa de la misma, estimulando el número de brotes en esta edad; posteriormente, permanece casi constante, cuando la planta está en producción (llenado de frutos.), pasando de 8.33 a los 9 meses a 8.79 puyones/unidad productiva a los 12 meses de edad (Figura 1.6). No se presentó diferencias significativas entre los 4 y 7 meses de edad, luego con diferencias estadísticas entre 7 y 9 meses de edad del cultivo, y sin divergencias significativas entre los 9 y 12 meses (Tabla 1-14).



**Figura 1.6.** Número de puyones producidos en el primer ciclo productivo del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

### ➤ Diámetro del seudotallo

De la misma manera, el diámetro del seudotallo, se incrementó en la medida en que transcurrió el período vegetativo. Mediante prueba de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), se encontró que no hubo diferencia

significativa entre los 4 y 7 meses de edad, con diferencia significativa entre los 7 y 9 meses, y sin diferencias entre los 9 y 12 meses de edad (Tabla 1-14). Además, hubo efecto significativo ( $P=0.0007$ ) de la densidad de población del sombrío sobre el diámetro del seudotallo (Tabla 1-13). Se obtuvo que para la edad de 7 meses, el diámetro del seudotallo fue de 0.229 m en surco doble y de 0.165 m en surco sencillo, lo que implicó entonces, un mayor desarrollo de la planta, en la alta densidad del sombrío, muy probablemente por la mayor frescura que le aporta a las plantas de plátano, la mayor cantidad de sombra alrededor. En la Figura 1.7 a, se confirma el cambio en la concavidad de la curva de crecimiento a partir del mes 7, tanto en surco doble como en surco sencillo.

#### ➤ **Hojas totales emitidas, hojas funcionales presentes y área foliar total**

En cuanto a la cantidad de hojas totales, su mayor incremento se dio entre los meses 7 y 10 de edad (18.583 y 23.139 hojas respectivamente). Asimismo, las hojas funcionales presentes (8.861 y 11.528 hojas) y el área foliar en las plantas, (6.25 y 12.89 m<sup>2</sup>), con diferencias significativas en estas edades, para las tres variables. El promedio de emisión, es de 1 hoja cada 15 días, para un total de 27.28 hojas cuando se encuentra en el primer ciclo productivo (Tabla 1-14), el cual se dio a los 12 meses, parámetro importante en el cultivo, por el cálculo de la edad de parición (emisión de bellotas). Asimismo, el área foliar aumentó paulatinamente, en los primeros meses de desarrollo de las plantas, y a partir del séptimo mes, se presentó un incremento notorio, del 100% hasta el noveno mes, y a partir de ahí, el incremento es más bajo, lo que indica que la planta se encuentra en función del llenado de frutos, para un promedio de 13.119 m<sup>2</sup>, en el mes doce. (Tabla 1-14). Hubo diferencias significativas entre el mes 4 y el mes 7, cuando la planta aumentó el doble de la primera edad; es decir que su incremento fue de 3.241 m<sup>2</sup> a 6.246 m<sup>2</sup> respectivamente; además presentó diferencias significativas entre los 7 y 10 meses de edad del cultivo, cuando la planta de 12.888 m<sup>2</sup> pasa a un total de 13.119 m<sup>2</sup> (Tabla 1-14).

#### **1.3.2.2. Modelo ajustado para el crecimiento del plátano**

Con los datos obtenidos en campo, se ajustó el crecimiento para altura planta, diámetro del seudotallo, hojas totales emitidas, hojas funcionales presentes, número de puyones y área foliar, con

base en el modelo alométrico, según Ecuación 4, y gráficamente en las Figuras 1.7 a y 1.7 b, donde se encuentran los diagramas de dispersión.

#### Ecuación 4. Modelo alométrico para variables de crecimiento en plátano

$$y = at^b$$

Dónde:

- $y$ : Lectura en metros de la variable evaluada.  
 $a$  y  $b$ : Parámetros del modelo.  
 $t$ : Tiempo en meses.

En la Tabla 1-15 se presentan los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables alométricas evaluadas en plátano.

**Tabla 1-15.** Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de crecimiento del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en el bs-T, conforme a las distintas edades de su ciclo productivo en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables de evaluadas						
	Altura de planta	Diámetro del seudotallo SS	Diámetro de seudotallo SD	Hojas totales	Hojas presentes	Número de puyones	Area foliar
a	0.45595	8.53516	12.51718	10.1597	4.03851	0.4794	0.5989
b	0.90736	0.4248	0.29122	0.3585	0.45692	1.2049	1.3047

Las tasas instantáneas de crecimiento, se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

Derivada:

$$\frac{dy}{dt} = abt^{b-1}$$

De esta manera, se pudo calcular las tasas de crecimiento para cualquier tiempo. En consecuencia, con la ecuación del modelo alométrico, se obtuvieron las velocidades de crecimiento para cada variable evaluada (Tabla 1-16).

Como puede apreciarse en la Tabla 1-16, la velocidad de crecimiento permanece relativamente constante para la altura de la planta, aunque, la tasa presente una desaceleración desde el mes 4 de edad del cultivo, hasta finalizar el ciclo productivo ( $0.364 \text{ m.mes}^{-1}$  en el mes 4 y  $0.329 \text{ m.mes}^{-1}$  a los 12 meses de edad), esto no afecta la tendencia lineal de la curva de crecimiento. Por lo tanto, la evolución de la altura es lineal, confirmando lo comentado anteriormente, con una tasa de crecimiento casi constante, como se representa gráficamente en la Figura 1.7 a. Por otra parte, la velocidad de crecimiento del diámetro del seudotallo, hojas totales y hojas presentes, es desacelerada durante todo el ciclo productivo, cuando las tasas se redujeron al 50% de su valor inicial para todos los casos (Tabla 1-16), lo cual indica que la emisión foliar disminuye a medida que la planta se acerca a la emisión de la bellota.

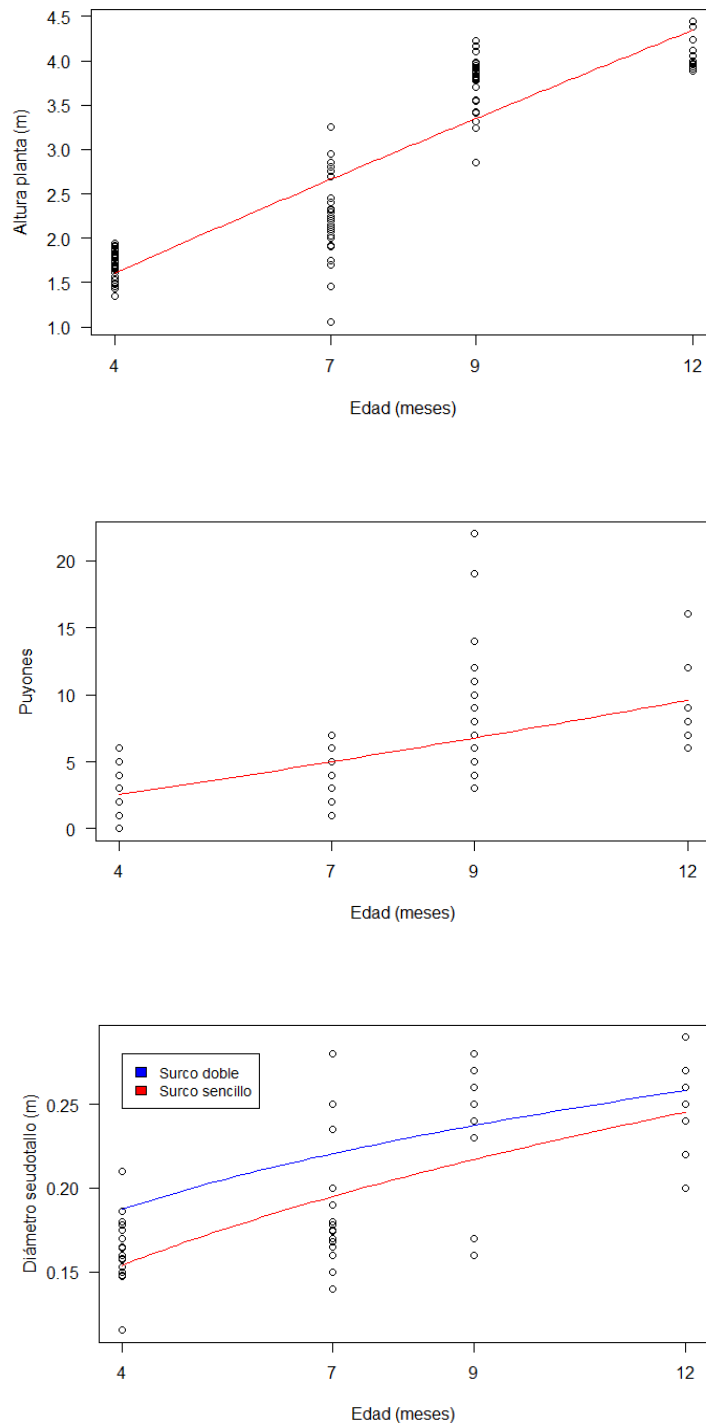
**Tabla 1-16** Tasas de crecimiento del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) para las variables alométricas en las diferentes edades de su ciclo productivo. Altura de planta:  $\text{m.mes}^{-1}$ ; Diámetro del seudotallo: SS Surco Sencillo, SD Surco Doble  $\text{cm.mes}^{-1}$ ; Hojas totales emitidas, Hojas funcionales presentes:  $\text{unidades.mes}^{-1}$ ; Área foliar:  $\text{cm}^2.\text{mes}^{-1}$ ; Número de puyones:  $\text{unidades.mes}^{-1}$ ; plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

<b>Tasas de crecimiento para variables alométricas</b>							
<b>Edad injerto (meses)</b>	<b>Altura planta</b>	<b>Diámetro del seudotallo SS</b>	<b>Diámetro del seudotallo SD</b>	<b>Hojas totales emitidas</b>	<b>Hojas funcionales presentes</b>	<b>Área foliar</b>	<b>Número de puyones</b>
4	0.364	1.633	1.365	1.497	0.869	1.192	0.767
5	0.356	1.437	1.165	1.297	0.770	1.276	0.803
6	0.350	1.294	1.024	1.154	0.697	1.349	0.834
7	0.345	1.184	0.918	1.045	0.641	1.414	0.861
8	0.341	1.096	0.835	0.959	0.597	1.472	0.884
9	0.338	1.025	0.768	0.890	0.560	1.526	0.906
10	0.334	0.964	0.713	0.832	0.528	1.576	0.926
11	0.331	0.913	0.666	0.782	0.502	1.622	0.944
12	0.329	0.868	0.626	0.740	0.479	1.666	0.961

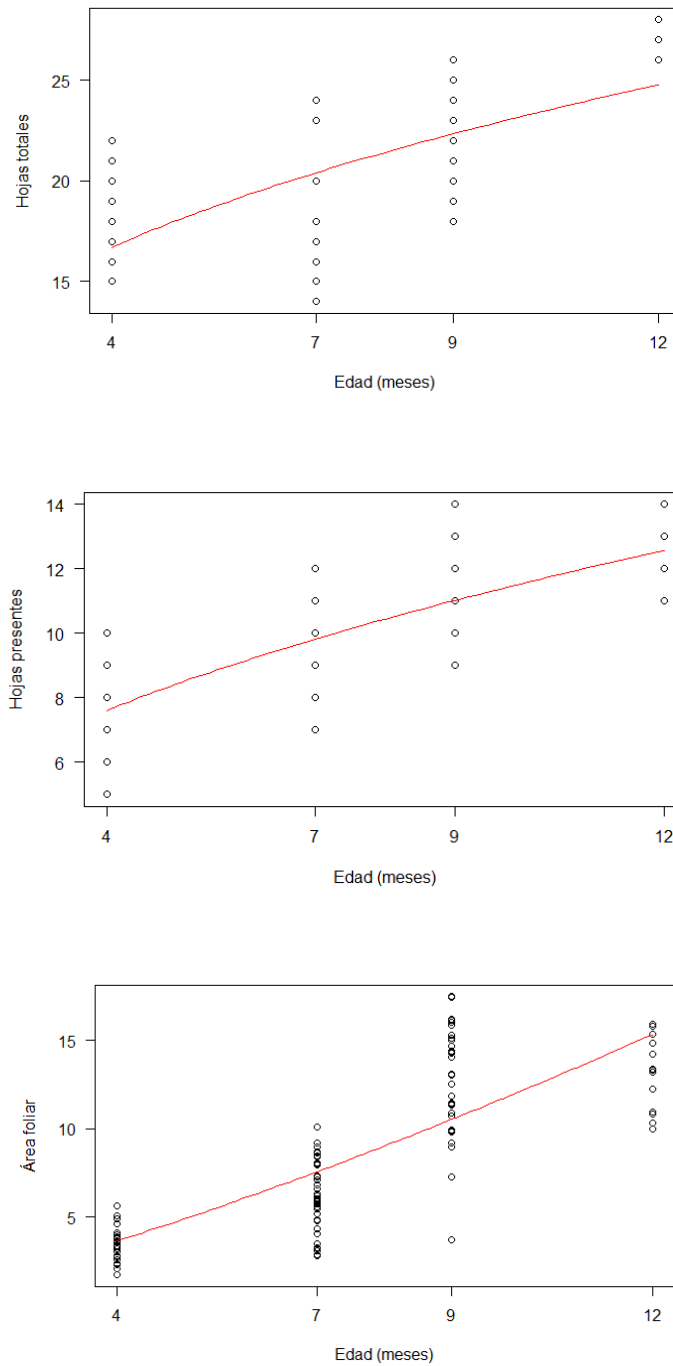
Acorde con el modelo alométrico, la representación gráfica de estos parámetros alométricos se encuentra en la Figura 1.7 a y 1.7 b, donde se aprecian las tasas de cambio en la medida que ocurre

el desarrollo del vegetal, por lo cual, la reducción de dichas tasas conduce a la pérdida de la linealidad, con tendencia a la concavidad hacia abajo, lo cual es más notorio en el diámetro del seudotallo, tanto en surco sencillo, como en surco doble (Figura 1.7 a), y con una concavidad más leve en las hojas totales emitidas y las hojas funcionales presentes (Figura 1.7 b)

Las variables: número de puyones y área foliar, exhibieron una tasa de cambio acelerada durante el desarrollo del vegetal, como se aprecia en la Tabla 1-16; el área foliar presentó un incremento del 40%, pasando de una tasa de  $1.192 \text{ m.mes}^{-1}$  a los 4 meses de edad, a  $1.666 \text{ m.mes}^{-1}$  a los 12 ; el número de puyones, presentó un aumento menos acelerado que el anterior (25%), pasando de una tasa de crecimiento de  $0.767 \text{ m.mes}^{-1}$  a los 4 meses, a  $0.961 \text{ m.mes}^{-1}$  a los 12 meses de edad (Tabla 1-16); la curva en ambos parámetros, presenta una concavidad hacia arriba, como se aprecia en la Figura 1.7 a y 1.7 b siendo más notorio en el área foliar, esto demuestra que la actividad fotosintética de la planta se ve fuertemente reflejada hasta el final de su ciclo productivo.



**Figura 1.7 (a)** Evolución del crecimiento del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) para las variables alométricas: Altura de la planta: m; número de puyones: unidades y Diámetro delseudotallo: m, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.



**Figura 1.7 (b)** Evolución del crecimiento del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) para las variables alométricas: Hojas totales emitidas, hojas funcionales presentes: unidades; Área foliar: m<sup>2</sup>, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

### 1.3.2.3. Acumulación de la fitomasa del plátano

Al igual que en cacao, la biomasa del plátano, se obtuvo a partir de un grupo de parcelas con un arreglo particular (cf. Tabla 1.1), solamente se evalúa su cambio a través del tiempo, no siendo posible evaluar efecto de tratamientos (maderable, densidad de población del sombrío).

Como se observa en la Tabla 1-17, hubo interacción significativa entre la acumulación de la biomasa y la edad; sin ninguna interacción entre los tratamientos, maderable y densidad de siembra de sombrío, lo que significa que la evolución de la fitomasa en todos los órganos del plátano, fue diferente, en la medida que transcurría su desarrollo, a excepción de las raíces que no tuvieron divergencia estadística entre las diferentes edades; esto indica que este órgano, logra acumular la biomasa necesaria desde los primeros meses de desarrollo de la planta hasta el final del ciclo productivo.

**Tabla 1-17** Análisis de varianza para la biomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Variables evaluadas	Efecto Edad del plátano (Valor de P)
<b>Raíces</b>	0.3594
<b>Cormo</b>	<.0001*
<b>Seudotallo</b>	<.0001*
<b>Hojas</b>	<.0001*
<b>Puyones</b>	<.0009*

\* Diferencias significativa (P<0.05).

#### ➤ Biomasa de Raíces y cormo

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), se encontró que a los 6 meses de edad, las raíces han acumulado la biomasa necesaria para mantener la planta hasta finalizar su etapa productiva, por lo tanto, no hubo diferencia estadística entre las diferentes edades del plátano y dicho órgano. El aporte de masa seca de las raíces fue el más bajo de todos los órganos, y fue constante en todo el ciclo, así: al inicio del cultivo (edad 3 meses), el aporte fue de 0.538 kg y de

0.773 kg a los 12 meses, por lo cual no hay diferencia significativa entre las diferentes edades del cultivo (Tabla 1- 18).

De la misma manera, en el cormo, no hubo divergencias estadísticas entre los 6 y 9 meses de edad del cultivo, pero en el momento de parición (emisión de la bacota), que se da aproximadamente entre los 10 y los 12 meses, se da un incremento notorio en la biomasa del cormo, demostrando el papel que cumple este órgano en la translocación de los nutrientes para la formación y desarrollo del racimo; nótese como pasa de 0.479 kg a los 9 meses a un aumento de más del 100% (1.149 kg) a los 12 meses de edad (Tabla 1-18)

**Tabla 1-18** Comparación de medias de los parámetros plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en kg de materia seca, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

<b>Edad meses</b>	<b>Raíces</b>	<b>Cormo</b>	<b>Puyones</b>
06	0.538 ± 0.026 a	0.236 ± 0.165 a	0.391 ± 0.007 a
09	0.601 ± 0.027 a	0.479 ± 0.212 a	0.462 ± 0.240 b
12	0.773 ± 0.032 a	1.149 ± 0.346 b	0.738 ± 0.369 b
<b>Edad meses</b>	<b>Seudotallo</b>	<b>Hojas</b>	<b>Biomasa total</b>
06	0.405 ± 0.195 a	0.356 ± 0.108 a	1.096 ± 0.474 a
09	1.807 ± 0.468 b	0.853 ± 0.228 b	3.654 ± 1.045 b
12	2.613 ± 0.434 c	1.165 ± 0.216 c	5.742 ± 0.688 c

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey (P =0.05).

#### ➤ **Biomasa de seudotallo, hojas y puyones**

Como se observa en la Tabla 1-18, el seudotallo alcanza un peso de 2.613 kg de materia seca por individuo, al finalizar el ciclo productivo (12 meses), con diferencias significativas entre las diferentes edades. Este órgano juega un papel muy importante en el sostenimiento de la parte aérea, ya que de su buen desarrollo y nutrición, depende que las hojas y la bacota (posteriormente racimo) estén en un buen estado.

Las hojas para el plátano, cumplen un papel importante en la producción de racimos, ya que la eficiencia fotosintética de las mismas, se traducen en un buen racimo en el momento de la producción, para este estudio arrojaron una acumulación total a los 12 meses de edad del cultivo de 1.165 kg de materia seca, con diferencia significativa entre las diferentes edades de la evaluación. Con una biomasa inicial de 0.356 kg a los 6 meses, muestra un incremento de más del 100 % en los otros 6 meses restantes del ciclo productivo del cultivo (Tabla 1-18).

Asimismo, los puyones aportan una biomasa inicial a los 6 meses de edad de 0.371 kg, con diferencia significativa entre ésta y los 9 meses, luego sin diferencia estadística entre los 9 y los 12 meses de edad del cultivo; sin embargo nótese un aumento notorio de casi el 100% en su peso seco, pasando de 0.462 kg a los 6 meses hasta 0.738 kg a los 12 meses, cuando ya está en producción. (Tabla 1-18).

### ➤ **Biomasa total del plátano**

La planta de plátano alcanzó un peso seco total de 5.742 kg a los 12 meses, periodo en la cual, se encuentra en producción de racimos, la fitomasa se va ganando poco a poco en la medida que transcurre su periodo vegetativo. Hubo diferencias significativas entre las edades del plátano, con un aumento importante en la fitomasa entre una y otra. A los 6 meses de edad, mitad del ciclo productivo, ya la planta ha ganado una biomasa de 1.096 kg, lo que quiere decir que en 6 meses restantes de su ciclo de vida, la planta aumenta 5 veces más su biomasa, lo que indica una máxima actividad metabólica de la planta para lograr su producción. El órgano que más contribuye a la fitomasa es el seudotallo (casi el 50 %), el cual logra un desarrollo notorio en todas las fases de crecimiento, menos en los 6 meses iniciales, en el que las raíces son las mayores aportantes a la biomasa, esto quiere decir que las raíces inician con una buena acumulación de la biomasa, para poder traslocar los nutrientes al el resto de la planta. Una vez estabilizado este órgano, el seudotallo se convierte en el órgano que más acumula fitomasa en el resto del ciclo del cultivo (Tabla 1-18).

### 1.3.2.4. Modelo ajustado para biomasa del plátano

Se ajustó la biomasa de las diferentes variables evaluadas, Raíces, Cormo, Seudotallo, Hojas, Puyones y Biomasa total, con base en el modelo alométrico, según la Ecuación 5, así:

#### Ecuación 5. Modelo alométrico para variables de biomasa en plátano

$$y = at^b$$

Dónde:

$y$ : Lectura en kg de la variable evaluada.

$a$  y  $b$ : Parámetros del modelo.

$t$ : Tiempo en meses.

En la Tabla 1-19, se presentan los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables evaluadas en la biomasa del plátano.

**Tabla 1-19.** Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de biomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables de evaluadas					
	Raíces	Cormo	Seudotallo	Hojas	Puyones	Biomasa total
a	0.02748	0.00148	0.01852	0.0275	0.001638	0.0389
b	0.38658	2.673476	2.00601	1.51799	2.472373	2.01845

Las tasas instantáneas de acumulación de la biomasa, se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

Derivada:

$$\frac{dy}{dt} = abt^{b-1}$$

De esta manera, se pudo calcular las tasas de acumulación de biomasa instantáneas para cualquier tiempo. Entonces, con la ecuación del modelo Alométrico, se obtuvieron las tasas de biomasa para cada variable evaluada: Raíces, Cormo, Seudotallo, Hojas, puyones y Biomasa total (Tabla 1-20).

Para todas las variables evaluadas, se presentó una aceleración en la acumulación de la fitomasa, durante las diferentes edades del cultivo, a excepción de las raíces que aunque, mostraron una desaceleración en la tasa de crecimiento, no fue significativa, mostrando que la acumulación de la biomasa, permaneció casi constante durante todo el ciclo del plátano,  $0.004 \text{ kg.mes}^{-1}$  en los 6 meses de edad;  $0.003 \text{ kg.mes}^{-1}$  en el mes 9 y  $0.002 \text{ kg.mes}^{-1}$  a los 12 meses de edad. (Tabla 1-20). Gráficamente, se puede observar en la Figura 1.8 a, que en las raíces, aunque muestra una ligera concavidad en la curva, se ve con una tendencia casi horizontal, lo que confirma su incremento constante en la biomasa.

**Tabla 1- 20.** Tasas de acumulación de biomasa de plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en cada uno de los órganos, para las variables: Raíces, cormo,seudotallo, Hojas, puyones y Biomasa Total en las diferentes edades de su ciclo productivo, en  $\text{kg.mes}^{-1}$ , en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

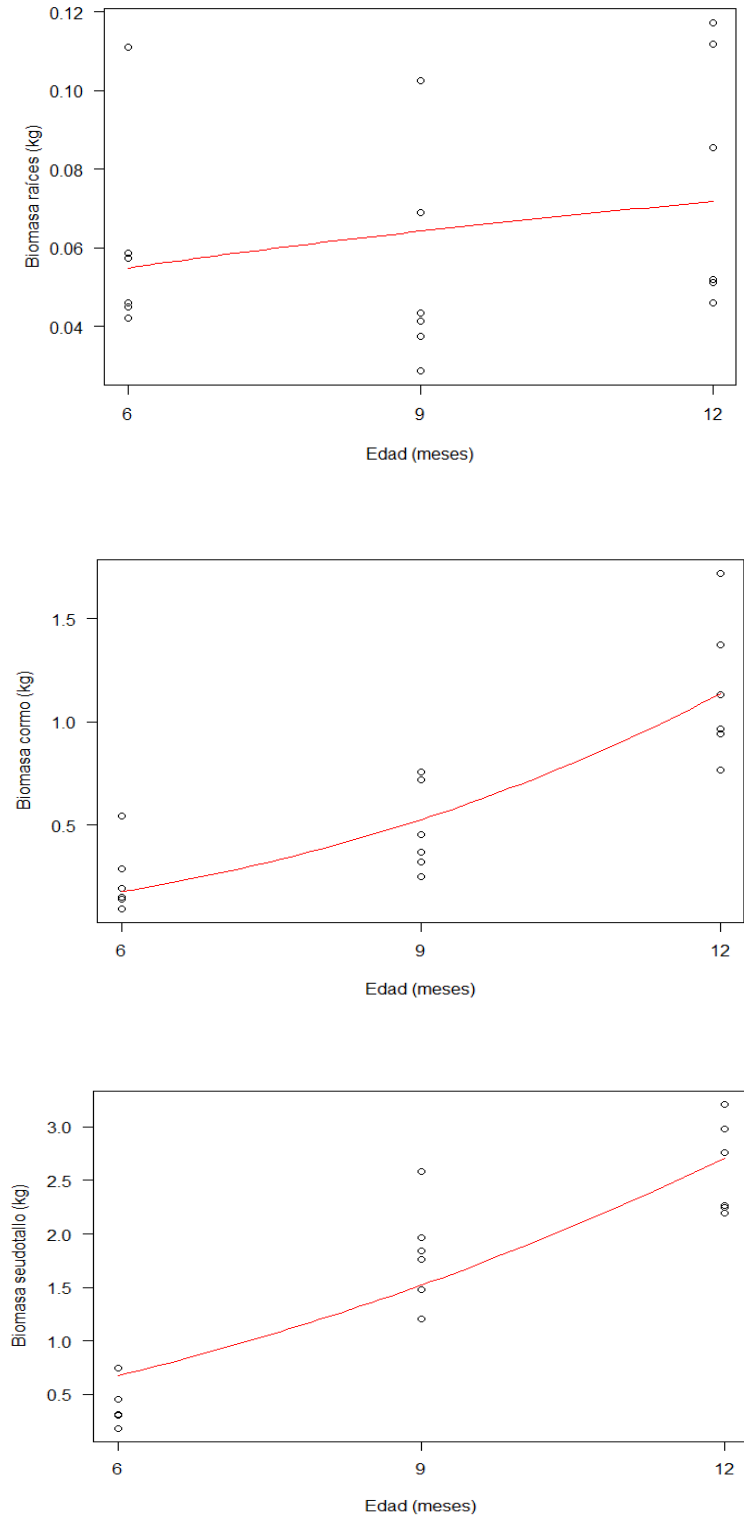
Tasas de acumulación de biomasa en plátano						
Edad planta	Raíces	Cormo	Seudotallo	Hojas	Puyones	Total
6	0.004	0.079	0.225	0.106	0.057	0.487
7	0.003	0.103	0.263	0.114	0.071	0.570
8	0.003	0.128	0.301	0.123	0.087	0.653
9	0.003	0.156	0.339	0.130	0.103	0.736
10	0.003	0.187	0.377	0.138	0.120	0.819
11	0.002	0.219	0.415	0.145	0.138	0.903
12	0.002	0.253	0.453	0.151	0.157	0.986

La velocidad de acumulación de biomasa fue más acelerada para elseudotallo, el cual presentó un incremento más notorio en el transcurso del ciclo del cultivo, pasando de una velocidad de  $0.225 \text{ kg.mes}^{-1}$  en la edad de 6 meses a  $0.453 \text{ kg.mes}^{-1}$  a los 12 meses de edad de la planta (Tabla 1-20). Gráficamente, en la Figura 1.8 a, se observa que a partir del mes 9, se presenta una concavidad en la curva, que muestra el aumento en la tasa, como se mencionó anteriormente.

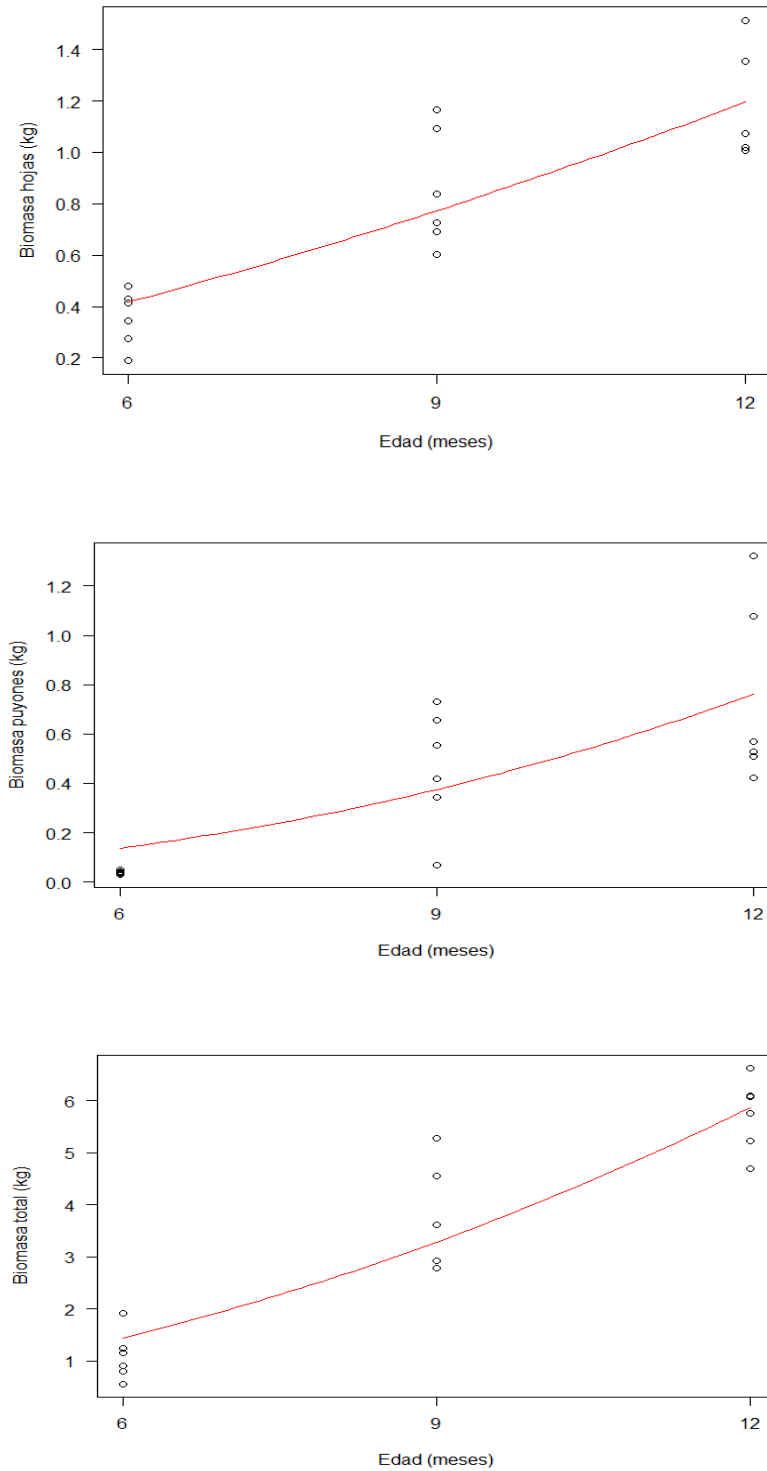
El cormo y los puyones muestran una tendencia muy similar en la curva de crecimiento (Figura 1.8 a y 1.8 b), ambos órganos presentaron un aumento en las velocidades de crecimiento, siendo mayor en el cormo, donde al finalizar el ciclo productivo pasa de  $0.079 \text{ kg.mes}^{-1}$  en el 4° mes de edad, a  $0.253 \text{ kg.mes}^{-1}$  en la edad de 12 meses. Los puyones tenían a los 6 meses de edad una tasa de acumulación de  $0.057 \text{ kg.mes}^{-1}$ , luego aumentó poco a poco la velocidad de acumulación, hasta alcanzar al finalizar el ciclo productivo del plátano (12 meses), una tasa de 3 veces más su valor inicial,  $0.157 \text{ kg.mes}^{-1}$  (Tabla 1-20).

Las hojas, como se mencionó anteriormente, cumplen un papel muy importante para la producción de racimos, y la tasa de emisión va acorde con la tasa de acumulación de su biomasa, que se refleja en la concavidad de la curva (Figura 1.8 b), mostrando un aumento en la velocidad de casi el 45% desde los 6 meses de edad, hasta finalizar el ciclo productivo a los 12 meses ( $0.106$  a  $0.151 \text{ kg.mes}^{-1}$ ), como se muestra en la Tabla 1-20.

La tasa de acumulación de la fitomasa para todos los órganos, da como resultado, un aumento en la tasa de la biomasa total; la edad de 9 meses, es el punto donde la velocidad de acumulación, se hace más notorio, donde la curva tiende a perder la linealidad y se hace cóncava (Figura 1.8 b), esta edad coincide con la fase reproductiva de la planta, donde se hace necesario, que el vegetal invierta todo para la parición, o emisión de bacota, y más adelante el llenado del racimo. La tasa de biomasa total pasa de  $0.487 \text{ kg.mes}^{-1}$  en el 4° mes de edad a un aumento del 100% durante todo el ciclo, llegando a alcanzar  $0.986 \text{ kg.mes}^{-1}$  a los 12 meses de edad (Tabla 1-20).



**Figura 1.8 a.** Acumulación de la biomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en los órganos: Raíces, cormo y seudotallo en las diferentes edades de su ciclo productivo, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013



**Figura 1.8 b.** Acumulación de la biomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*) en los órganos: Hojas, puyones, y Biomasa total en las diferentes edades de su ciclo productivo, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

### ➤ **Distribución porcentual de la fitomasa en los diferentes órganos del plátano**

Como se observa en la Tabla 1-21, las mayores proporciones de biomasa, se presentaron en el seudotallo y en las hojas, ya que son los órganos que mantuvieron la mayor contribución a la masa seca, en todas de las edades. A los 6 meses de edad, el seudotallo contribuye con un 38.31% y las hojas con un 33.65 %, es decir, un poco más del 70 % del total de la biomasa, siendo así, los principales aportantes a la fitomasa. A los 9 meses, se presentó la máxima proporción en el seudotallo, con un 51.29 % ; ello indica que el vegetal acumuló en este órgano, la biomasa necesaria para el sostenimiento de la parte aérea, que traería en esta edad, la emisión de la bacota, que se convertirá en racimo posteriormente; las hojas siguen teniendo un papel importante durante todo el ciclo del cultivo, contribuyendo en esta edad, con el 24.19 %. El cormo se desarrolló desde los primeros 6 meses del ciclo de la planta, y fluctuó luego a un 13.59 % , estabilizándose después, con una aporte aproximado del 20 %. Las raíces aportaron poco a la totalidad de la biomasa, con una proporción inicial del 5.68 % a los 6 meses, y al finalizar el ciclo con un 1.40 %. Asimismo, los puyones, tuvieron una contribución a los 6 meses del 3.70 % y se estabilizó luego a un 13.0 % aproximadamente cuando la planta inició la fase reproductiva, permaneció estable con dicha proporcionalidad, cuando el vegetal invierte todo al llenado de fruto (racimo).

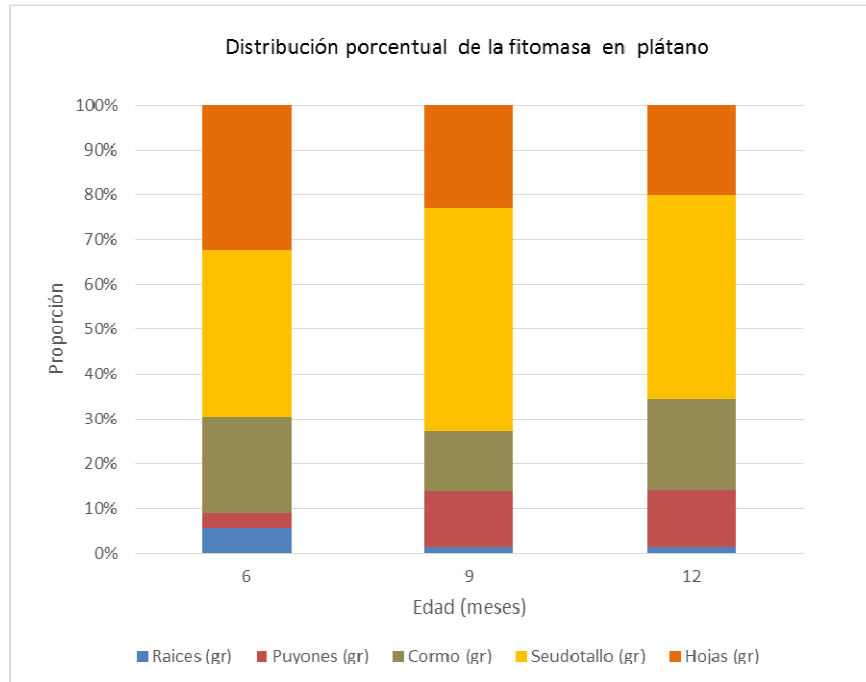
**Tabla 1-21** Distribución de la fitomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*), en proporciones (%), para los distintos órganos: Raíces, Cormo, Seudotallo, Hojas y Puyones, durante su primer ciclo productivo, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

<b>Edad</b>	<b>Raíces</b>	<b>Cormo</b>	<b>Seudotallo</b>	<b>Hojas</b>	<b>Puyones</b>
<b>meses</b>					
06	5.680	22.359	38.311 *	33.651 *	3.698
09	1.524	13.594	51.288 *	24.194 *	13.099
12	1.396	20.753	47.184 *	21.039 *	13.327

\* Mayor aporte en biomasa en las diferentes edades del ciclo productivo del plátano, determinados en % de materia seca.

En la Figura 1.9, se aprecia cómo, en todas las fases del crecimiento, el seudotallo tiene una proporción mayor a la de los demás órganos, a excepción de las hojas, que muestran un comportamiento similar a éste en la primera etapa (6 meses); el menor aporte lo hace las raíces, las

cuales muestran desde el inicio del ciclo, un aporte poco significativo a la fitomasa. A partir del mes 9, el vegetal alcanzó una estabilidad en la proporción de todos los órganos, manteniendo un comportamiento similar, en la última etapa de desarrollo del cultivo.



**Figura 1.9.** Distribución de la biomasa del plátano hartón (*Musa AAB Simmonds.*), en su primer ciclo productivo, en proporciones (%) de materia seca, por órgano, en el bs-T, Estación Agraria Cotové, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. 2011- 2013

### 1.3.3. Crecimiento alométrico de melina (*Gmelina arborea Roxb.*), durante la fase vegetativa del cacao en el bosque seco tropical (bs-T).

#### 1.3.3.1. Análisis de las variables alométricas

Para la evolución del crecimiento de la melina, se encontró efecto significativo de la edad del cultivo sobre las variables alométricas medidas: Altura total, Diámetro del tallo, Diámetro de la copa; no hubo efecto significativo de la densidad de población del sombrío. Luego, el crecimiento y desarrollo del árbol de melina, como es de esperarse, mostró un incremento en el transcurso de su fase vegetativa. Por otra parte, se encontró efecto significativo de la interacción Edad x densidad de población del sombrío para la altura total y el diámetro de copa (Tabla 1-23).

**Tabla 1-22. Análisis de varianza del comportamiento alométrico de melina, en respuesta a la edad, y densidad de población del sombrío, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.**

Efecto	Altura total	Diámetro del tallo	Diámetro de copa
Edad de melina	<.0001*	<.0001*	<.0001*
Densidad población del sombrío (melina)	0.8173	0.7005	0.1712
Edad x Densidad población del sombrío	0.0292	0.5975	<.0001*

\* Diferencias significativa ( $P < 0.05$ ).

#### ➤ Altura total y diámetros del tallo y de la copa

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ), como puede apreciarse en la Tabla 1-23, la altura de la melina alcanzó los 2.610 m a los 3 meses de edad, y cuando cumple 12 meses, se encontró en el orden de 8 m, lo que indica que esta es una especie de rápido crecimiento. Hubo diferencia significativa entre las diferentes edades, para este parámetro. Asimismo, el diámetro del fuste (tallo), mostró un aumento notorio en los 3 primeros meses de edad del cultivo, al pasar de 1.365 cm a los 6.93 cm a los 6 meses, es decir, casi 6 veces el valor inicial; para las siguientes edades aumentó paulatinamente, alrededor de 3 cm trimestrales, llegando a los 15 meses a un valor de 15.077 cm de diámetro. Hubo diferencias significativas entre todas las edades,

mostrando que la planta, como es de esperarse, crece simultáneamente, en grosor y en longitud. En cuanto al diámetro de copa, a pesar de que también aumentó en las diferentes edades, no lo hizo a una tasa de crecimiento tan acelerada como la de la Altura total, manteniendo un crecimiento constante, como se analizará más adelante en las tasas de crecimiento para todas las variables alométricas evaluadas. Hubo diferencias significativas entre todas las edades de evaluación, encontrándose como se mencionó anteriormente, y como se aprecia en la Tabla 1-22, que hubo interacción entre la edad y el efecto densidad de sombrero del maderable, por lo que se realizó la evaluación de los efectos simples, como se detalla a continuación.

**Tabla 1-23.** Comparación de medias de los parámetros alométricos de la melina (*Gmelina arborea* Roxb.) durante la fase vegetativa del cacao (*Theobroma cacao* L.) plantada en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013. Edad: meses; Altura total: metros (m); Diámetro del tallo: centímetros (cm); Diámetro copa: metros (m)

Edad del árbol (meses)	Altura total (m)	Diámetro del tallo (cm)	Diámetro de copa (m)
3	2.610 ± 0.551 a	1.365 ± 0.417 a	2.966 ± 0.414 a
6	5.045 ± 0.698 b	6.93 ± 1.285 b	4.14 ± 1.018 b
9	6.588 ± 0.274 c	9.356 ± 1.482 c	4.867 ± 1.013 c
12	8.036 ± 0.559 d	12.106 ± 1.998 d	5.32 ± 1.084 d
15	9.602 ± 0.575 e	15.077 ± 2.002 e	5.468 ± 0.670 e

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren significativamente mediante prueba Tukey ( $P > 0.05$ ).

Puesto que hubo efecto significativo de la interacción entre Edad de melina y densidad de población del sombrero sobre el diámetro de la copa, se realizó la prueba de efectos simples, para determinar en qué edades y en que densidad de sombrero, hubo interacción. Se obtuvieron los siguientes resultados, como se observa en la Tabla 1- 24, donde se lleva por separado, los promedios del diámetro de la copa, en Surco sencillo y en surco Doble. Se le asignó una numeración diferente, a cada edad y cada densidad de siembra (Tabla 1-25).

**Tabla 1-24** Medias mínimo cuadráticas para la variable Diámetro de copa en la especie melina (*Gmelina arborea Roxb.*), en las dos densidades de siembra del maderable (SS Surco Sencillo, y SD Suco doble), en las condiciones del bs-T de la Estación Agraria Cotové- 2011- 2013.

Edad (meses)	Surco (SS – SD)	Diámetro copa (m)	Identificador
3	SD	3.65025521	1
3	SS	2.22000222	2
6	SD	5.45195149	3
6	SS	3.96650529	4
9	SD	5.43968574	5
9	SS	4.53932860	6
12	SD	4.63051907	7
12	SS	5.71520621	8
15	SD	5.21282387	9
15	SS	5.63867298	10

**Tabla 1-25** Valores P para la comparación de medias mínimo cuadráticas de las combinaciones EDAD \* SURCO, de la variable diámetro de copa, para melina (*Gmelina arborea Roxb.*), en el bs-T de la Estación Agraria Cotové- 2011- 2013

i/j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1		0.0050	0.0007	0.5405	0.0025	0.1189	0.0314	<.0001	0.0002	<.0001
2	0.0050		<.0001	0.0002	<.0001	<.0001	0.0002	<.0001	<.0001	<.0001
3	0.0007	<.0001		0.0269	0.9851	0.1956	0.1366	0.6670	0.6445	0.7579
4	0.5405	0.0002	0.0269		0.0481	0.3058	0.3023	<.0001	0.0339	0.0001
5	0.0025	<.0001	0.9851	0.0481		0.2460	0.1685	0.6907	0.6884	0.7721
6	0.1189	<.0001	0.1956	0.3058	0.2460		0.8938	0.0206	0.2830	0.0279
7	0.0314	0.0002	0.1366	0.3023	0.1685	0.8938		0.0683	0.1819	0.0865
8	<.0001	<.0001	0.6670	<.0001	0.6907	0.0206	0.0683		0.3368	0.8189
9	0.0002	<.0001	0.6445	0.0339	0.6884	0.2830	0.1819	0.3368		0.4091
10	<.0001	<.0001	0.7579	0.0001	0.7721	0.0279	0.0865	0.8189	0.4091	

Existe efecto significativo del surco ( $P < 0.05$ ) sobre el diámetro de copa, desde los 3 hasta los 6 meses de edad; a partir de los 9 meses, no se observó efecto del surco ( $P > 0.05$ ) (Tabla 1-25).

### 1.3.3.2. Modelo de crecimiento ajustado para melina

Para la especie melina, se ajustó un único modelo para el crecimiento y desarrollo. De esta manera, con los datos obtenidos en campo, se ajustó el crecimiento para altura de la planta, diámetro del tallo y diámetro de copa, con base en el modelo alométrico, según Ecuación 6, y como se puede observar gráficamente en la Figura 1.10

#### Ecuación 6. Modelo alométrico para variables de crecimiento

$$y = at^b$$

Dónde:

- $y$ : Lectura en metros de la variable evaluada.  
 $a$  y  $b$ : Parámetros del modelo.  
 $t$ : Tiempo en meses.

En la Tabla 1-26, se presentan los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables alométricas evaluadas en melina.

**Tabla 1-26.** Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de crecimiento de la melina (*Gmelina arborea Roxb.*), conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del cacao (*Theobroma cacao* L.) en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables alométricas melina		
	Altura total	Diámetro tallo	Diámetro copa
a	1.18558	0.75974	2.05053
b	0.77288	1.10954	0.37251

Las tasas instantáneas de crecimiento, se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

Derivada:  $\frac{dy}{dt} = abt^{b-1}$

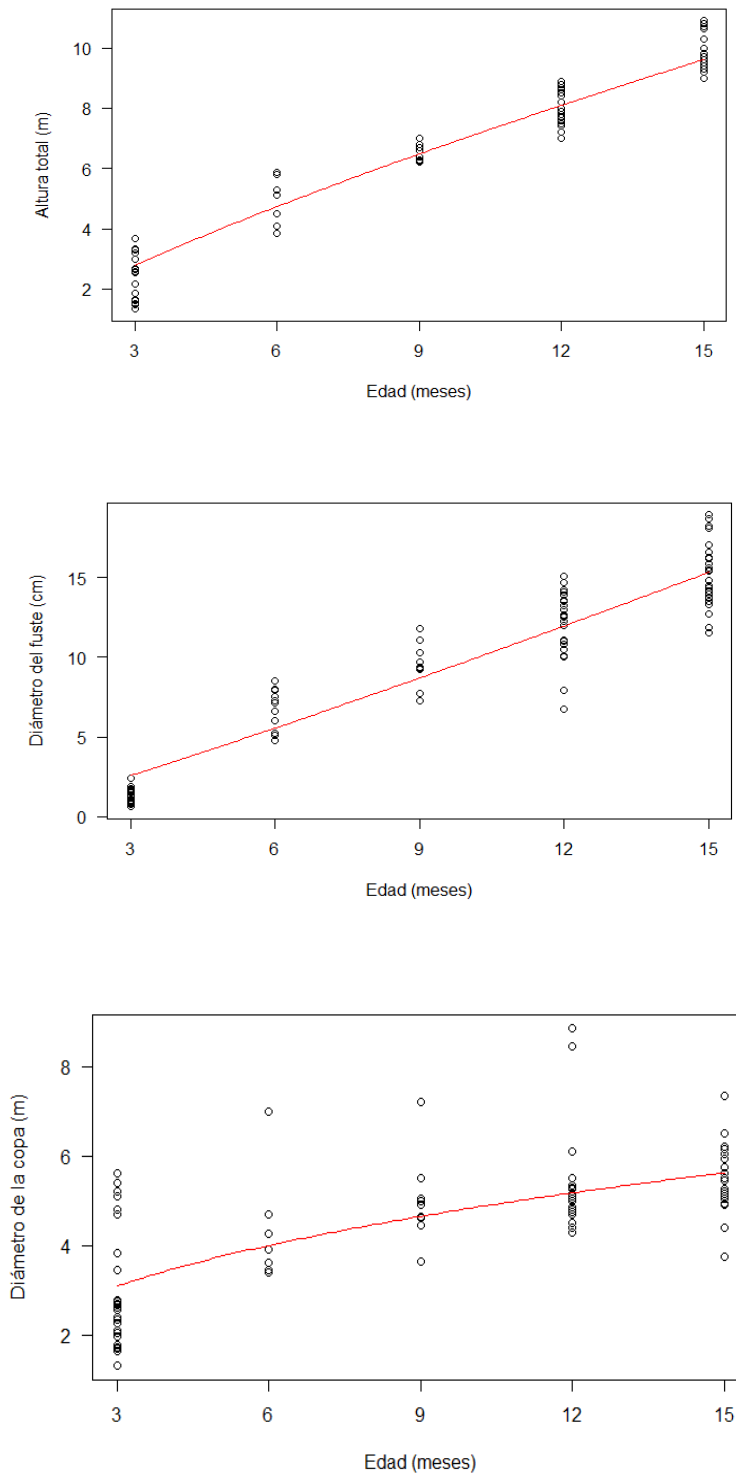
De esta manera, se pudo calcular dichas tasas de crecimiento para cualquier tiempo. En consecuencia, con la ecuación del modelo alométrico, se obtuvieron las velocidades de crecimiento para cada variable evaluada (Tabla 1-27).

Como puede apreciarse en la Tabla 1-27, la velocidad de crecimiento para la altura total de la planta, es acelerada en los primeros 3 meses de edad de la plantación, luego, la tasa de crecimiento presentó una desaceleración desde este mes hasta finalizar las evaluaciones alométricas (0.714 m.mes<sup>-1</sup> al mes 3; 0.495 m.mes<sup>-1</sup> a los 12 meses de edad), mostrando una concavidad en la curva de crecimiento (Figura 1.10).

**Tabla 1-27** Comparación de Tasas de crecimiento de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) para las variables alométricas Altura total m.mes<sup>-1</sup> ; Diámetro del fuste cm.mes<sup>-1</sup> ; Diámetro de copa m.mes<sup>-1</sup> en las diferentes edades, durante de la fase juvenil del SAF cacao, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

<b>Tasas de crecimiento para variables alométricas</b>			
<b>Edad (meses)</b>	<b>Altura Total</b>	<b>Diámetro fuste</b>	<b>Diámetro de copa</b>
3	0.714	0.951	0.383
6	0.610	1.026	0.248
09	0.556	1.072	0.192
12	0.521	1.107	0.161
15	0.495	1.134	0.140

Por otra parte, la velocidad de crecimiento del diámetro del tallo, presentó un ligero aumento en los meses de evaluación, dando como resultado, un crecimiento constante en este órgano, pasando de 0.951 cm.mes<sup>-1</sup> en el 3° mes de edad, a 1.134 m.mes<sup>-1</sup> en la edad de 15 meses (Tabla 1-27); de esta manera, exhibe una tendencia lineal en la curva de crecimiento, como se observa en la Figura 1.10. En cuanto al diámetro de la copa, se pudo establecer que su tasa de crecimiento fue mayor al inicio de la etapa vegetativa de la melina, mostrando un descenso en las diferentes edades, pasando de 0.383 m.mes<sup>-1</sup> en la edad de 3 meses, a 0.192 m.mes<sup>-1</sup> a los 9 y 0.140 m.mes<sup>-1</sup> a los 15 meses de edad, como se muestra en la Tabla 1-27. Nótese además como, a partir del mes 3 de edad, aunque la desaceleración en la tasa fue poca, la curva presenta una ligera concavidad (Figura 1.10).



**Figura 1.10** Evolución del crecimiento de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) para las variables alométricas Altura total; Diámetro del fuste; Diámetro de copa en las diferentes edades, durante de la fase juvenil del SAF cacao, plantado en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

### 1.3.3.3. Acumulación de la fitomasa de la melina

Al igual que en cacao, y el plátano, la biomasa de melina se obtuvo a partir de un grupo de parcelas con un arreglo particular (cf. Tabla 1.1), solamente se evalúa su cambio a través del tiempo, no siendo posible evaluar efecto de tratamientos (densidad de población del sombrío).

Como se observa en la Tabla 1-29, hubo interacción significativa entre la acumulación de la biomasa y la edad; lo que significa que la evolución de la fitomasa de todos los órganos de melina, fue diferente, en la medida que transcurría su desarrollo: raíces, fuste, ramas gruesas y delgadas, y hojas ( $P < 0.0001$ ), sin ninguna interacción con el tratamiento, densidad de siembra del sombrío; dando como resultado un incremento en la acumulación de fitomasa en todos los órganos, a medida que transcurría el primer ciclo productivo del cultivo.

**Tabla 1-28** Análisis de varianza para la biomasa de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en cada uno de los órganos, en respuesta a la edad, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2012.

Variables evaluadas (fitomasa)	Efecto Edad del plátano (Valor de P)
<b>Raíces</b>	<.0124*
<b>Fuste</b>	<.0001*
<b>Ramas gruesas</b>	<.0001*
<b>Ramas delgadas</b>	<.0001*
<b>Hojas</b>	<.0003*

\* Diferencias significativa ( $P < 0.05$ ).

#### ➤ Biomasa de Raíces y fuste

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha = 0.05$ ), se encontró que a los 12 meses de edad de la melina, las raíces han acumulado una biomasa de 13.630 kg, y aunque no hubo diferencia significativa con la edad de 24 meses, la masa seca se duplicó llegando a 26.927 kg a esta edad. Luego, no hubo diferencias estadísticas entre las siguientes edades, 36 meses (40.153 kg, y 48 meses 51.298 kg), como se aprecia en la Tabla 1-29.

El incremento de biomasa en el fuste fue significativo en las diferentes edades de la melina, es el órgano con mayor acumulación de biomasa durante las diferentes fases del crecimiento del árbol, hubo divergencia estadística entre los 12 y 24 meses de edad, donde fue notoria la cantidad de biomasa acumulada, ya que superó el 100 % de la biomasa inicial en un año (27.333 kg en 12 meses, y 69.955 kg a los 24 meses de edad) luego de los 24 a 36 meses, no hubo diferencias significativas, y con divergencia estadística entre los 36 y 48 meses, con un incremento en fitomasa de más del 100%, con un peso de 100.431 kg a los 36 meses, alcanzando una biomasa de 217.618 kg a los 48 meses de edad (Tabla 1-29).

**Tabla 1-29** Comparación de medias para la acumulación de la biomasa de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en cada órgano; Raíces, Fuste, Ramas gruesas, Ramas delgadas, Hojas y Biomasa total en las diferentes edades, en kg de materia seca, durante la fase juvenil del SAF cacao, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Edad (meses)		Kg de materia seca		
cacao	melina	Raíces	Fuste	Ramas gruesas
0	12	13.630 ± 5,111 a	27.333 ± 13.643 a	8.268 ± 4.018 a
12	24	26.927 ± 7.957 a b	69.955 ± 11.758 b	28.472 ± 7.361 b
24	36	40.153 ± 17.964 b	100.431 ± 34.823 b	32.785 ± 13.896 b
36	48	51.298 ± 17.791 b	217.618 ± 34.560 c	61.238 ± 20.533 c

Edad (meses)		Kg de materia seca		
cacao	melina	Ramas delgadas	Hojas	Total
0	12	7.717 ± 3.306 a	6.770 ± 4.756 a	63.718 ± 23.808 a
12	24	17.014 ± 2.631 a	16.111 ± 2.046 a	158.380 ± 5.431 b
24	36	19.083 ± 4.663 a	31.374 ± 4.975 b	223.826 ± 5.762 b
36	48	56.156 ± 19.569 b	31.074 ± 14.038 b	416.530 ± 26.840 c

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey (P =0.05).

### ➤ Biomasa de Hojas, Ramas gruesas y delgadas

Al realizar la prueba de comparación de medias de Tukey ( $\alpha=0.05$ ), Tabla 1- 29, se encontró diferencia significativa en las ramas gruesas entre los 12 y 24 meses de edad, al incrementarse en más del 100 % la masa seca, a los 12 meses de edad, la biomasa estaba en 8.268 kg, y a los 24 meses 28.472 kg; posteriormente, no hubo diferencias entre los 24 y 36 meses de edad, y finalmente con divergencia estadística entre los 36 y 48 meses, cuando las ramas gruesas alcanzaron una

fitomasa de 61.238 kg. En cuanto a las ramas delgadas, a pesar de que no hubo diferencias estadísticas entre las edades 12, 24 y 36 meses, hubo un incremento paulatino en la masa seca de dichas estructuras, que al final de las evaluaciones, es decir a los 48 meses de edad, supera el 100 % con una biomasa de 56.156 kg, lo que muestra un equilibrio con las ramas gruesas, al obtener un peso seco muy similar.

Por otra parte en las hojas, no se presentaron diferencias significativas entre las edades 12 y 24 meses de desarrollo de la melina, con una biomasa que se incrementó en un 100 %, pasando de 6.770 kg a 16.111 kg. Entre el mes 24 y 36 se presentaron divergencias estadísticas llegando a un peso seco de 31.374 kg, manteniéndose constante a los 48 meses, donde no hubo diferencias significativas (Tabla 1-29).

#### ➤ **Biomasa total de la melina**

El árbol de melina alcanzó un peso seco total de 416.530 kg a los 48 meses, la fitomasa se va ganando poco a poco en la medida que transcurre el periodo de desarrollo del vegetal. Hubo diferencias significativas entre los 12 y 24 meses de edad, con un aumento importante en la fitomasa entre una edad y otra (63.718 kg y 158.380 kg respectivamente). El órgano que más contribuye a la fitomasa es el fuste (casi el 50 %), el cual logra un desarrollo notorio en todas las fases de crecimiento, dando como resultado un comportamiento similar en la curva de crecimiento, indicando que es el tallo (fuste), el que incrementa el total de la fitomasa del árbol. Entre los 24 y 36 meses de edad, no hubo divergencia estadística, cuando pasó a una fitomasa de 223.826 kg en ésta última edad. Luego, con diferencia significativa entre los 36 y 48 meses. (Tabla 1-29).

#### **1.3.3.4. Modelo ajustado para biomasa de la melina**

Se ajustó la biomasa de las diferentes variables evaluadas con base en el modelo alométrico, según la Ecuación 7, así:

**Ecuación 7. Modelo alométrico para variables de biomasa**

$$y = at^b$$

Dónde:

$y$ : Lectura en kg de la variable evaluada.

$a$  y  $b$ : Parámetros del modelo.

$t$ : Tiempo en meses.

En la Tabla 1-30, se presentan los parámetros estimados del modelo para las diferentes variables evaluadas en la biomasa del cacao.

**Tabla 1-30.** Parámetros del modelo Alométrico para las diferentes variables de biomasa de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en el bs-T, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del SAF cacao, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Variables de evaluadas					
	Raíces	Fuste	Ramas gruesas	Ramas Delgadas	Hojas	Biomasa total
a	1.3048	0,2364	0.2735	0.02552	0.6294	1.4627
b	0.9504	1.7529	1.3895	1.96828	1.0287	1.4508

Las tasas instantáneas de acumulación de la biomasa, se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

Derivada:

$$\frac{dy}{dt} = abt^{b-1}$$

De esta manera, se pudo calcular las tasas de acumulación de biomasa instantáneas para cualquier tiempo. Entonces, con la ecuación del modelo Alométrico, resultan las tasas de biomasa para cada variable evaluada: Raíces, fuste (tallo), ramas gruesas, ramas delgadas, hojas y Biomasa total (Tabla 1-30)

Para todas las variables evaluadas, se presentó un incremento en la tasa de acumulación de la fitomasa, durante las diferentes edades de la plantación, a excepción de las raíces que aunque, mostraron una desaceleración en la tasa de crecimiento, no fue tan significativa, mostrando que la acumulación de la biomasa, permaneció casi constante durante las fases de desarrollo, 1.096 kg/mes a los 12 meses de edad; 1.059 kg/mes en el mes 24 y 1.023 a los 48 meses de edad. (Tabla 1-31).

Gráficamente, se puede observar en la Figura 1.11 a, que en las raíces, se mantiene una tendencia lineal en la curva, lo que confirma su incremento constante en la biomasa, de aproximadamente 1.0 kg/mes en todas las fases de desarrollo del vegetal.

**Tabla 1-31** Comparación de las Tasas de acumulación de biomasa de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) para las variables Raíces, Fuste, Ramas Gruesas, Ramas Delgadas, Hojas, Biomasa Total en las diferentes edades, en  $\text{kg.mes}^{-1}$ , durante la fase juvenil del SAF cacao, en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Edad cacao	Edad melina	Tasas de acumulación de biomasa melina					Total
		Raíces	Fuste	Ramas Gruesas	Ramas Delgadas	Hojas	
0	12	1.096	2,691	1.000	0.557	0.695	6.505
06	18	1.074	3.652	1.172	0.825	0.703	7.810
12	24	1.059	4.535	1.310	1.090	0.709	8.891
18	30	1.048	5.364	1.429	1.353	0.714	9.832
24	36	1.038	6.154	1.535	1.614	0.718	10.674
30	42	1.030	6.911	1.630	1.874	0.721	11.443
36	48	1.023	7.642	1.717	2.132	0.724	12.153

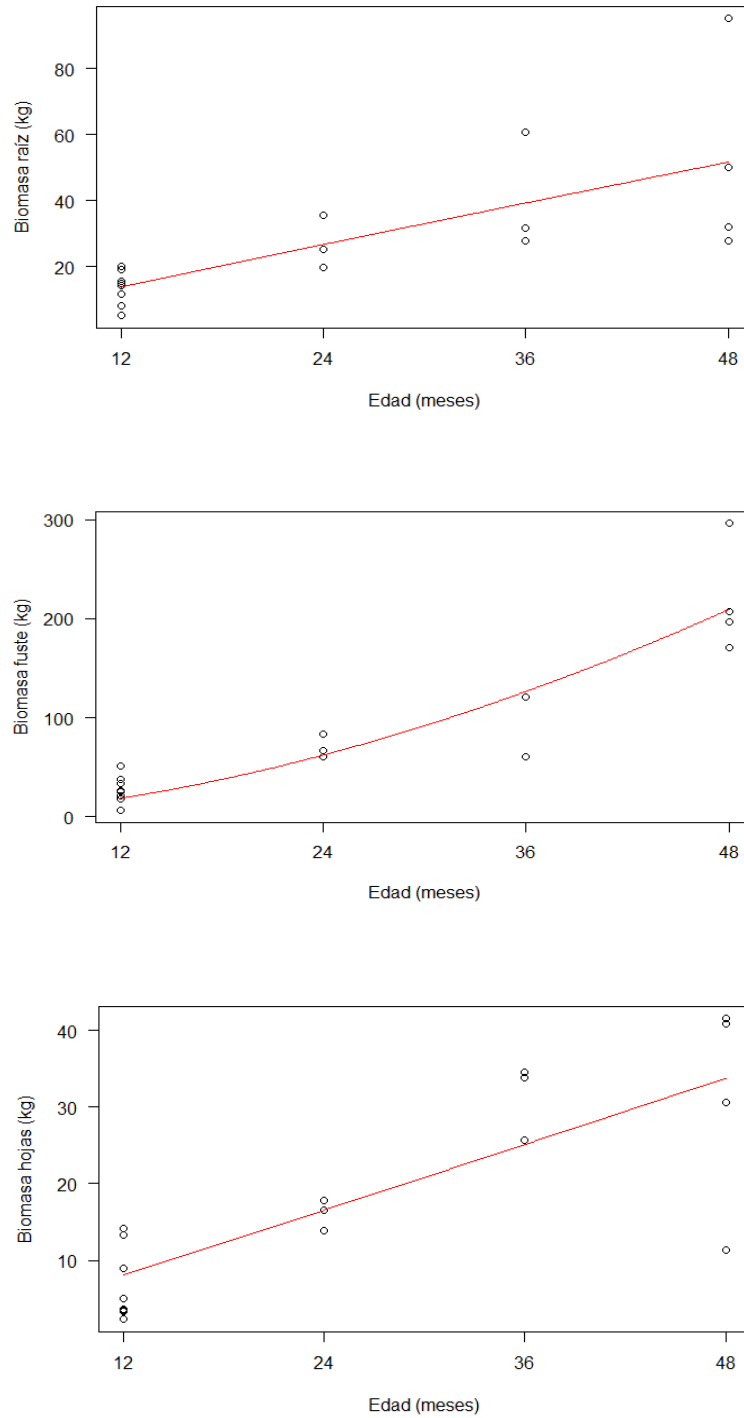
En las ramas gruesas se mantuvo también, una tasa de acumulación muy constante en todo el período de evaluaciones, mostrando un aumento que inició a los 12 meses con  $1.0 \text{ kg.mes}^{-1}$ ; a los 24 meses con  $1.310 \text{ kg.mes}^{-1}$ ; a los 36 meses con  $1.535 \text{ kg.mes}^{-1}$ , y finalmente a los 48 meses con una velocidad de  $1.710 \text{ kg.mes}^{-1}$  (Tabla 1-31). En la Figura 1.11 b, se observa una ligera concavidad en la curva, que inicia a los 24 meses, cuando se dio una leve aceleración en la velocidad de acumulación de biomasa. Las ramas delgadas, aunque presentaron un aumento menor en las tasas de acumulación, al inicio del desarrollo del vegetal, demostraron al final, una aceleración en la velocidad, la cual llegó a tener una tasa superior a la de las ramas gruesas, con  $0.557 \text{ kg.mes}^{-1}$  en los

12 meses y finalizó con  $2.132 \text{ kg.mes}^{-1}$  a los 48 meses, tasa superior a la de las ramas gruesas (Tabla 1-31). Nótese en la Figura 1.11 b, como se confirma lo mencionado, cuando la curva de crecimiento, presenta una ligera concavidad, desde el mes 24 en adelante, cuando se aceleró la velocidad de crecimiento.

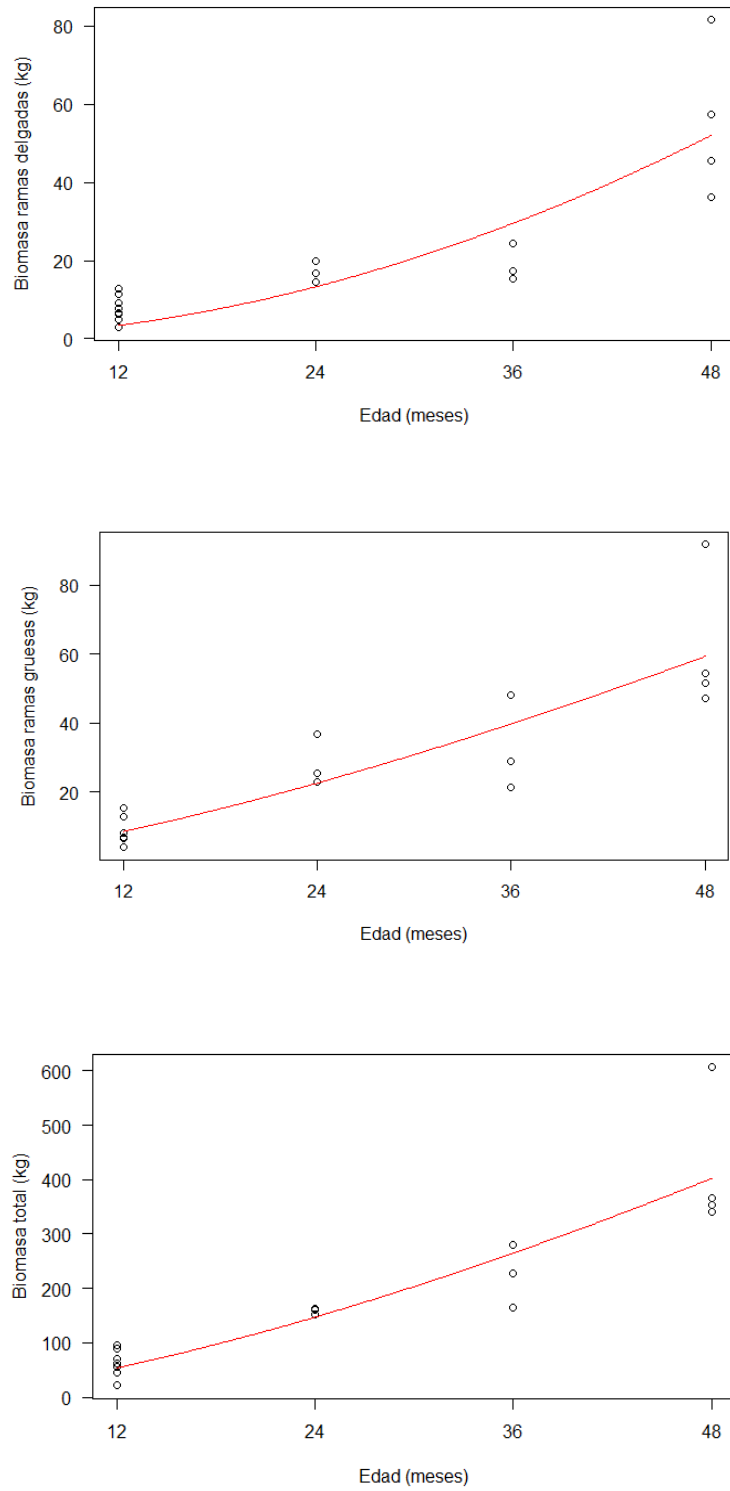
Las hojas por su parte, presentaron la menor tasa de crecimiento, la cual se mantuvo constante durante el tiempo que duraron las evaluaciones, con una velocidad de  $0.7 \text{ kg.mes}^{-1}$  en todas las edades (Tabla 1-31). Asimismo, se comportó la curva de crecimiento, como se observa en la Figura 1.11 a, donde se aprecie la linealidad de la curva, en todas las fases de desarrollo de la melina, que afirma lo comentado, de tener tasas constantes de acumulación de la biomasa.

Por otra parte, el fuste, se mantuvo como el órgano que tuvo una mayor tasa de crecimiento para la biomasa, su aumento fue acelerado en todas las edades, y marca tres momentos de la velocidad de crecimiento; el primero, que inició a los 12 meses de edad con una tasa de acumulación de  $2.691 \text{ kg.mes}^{-1}$ ; el segundo a los 24 meses, cuando la tasa aumentó en un 50 % de la inicial, con un crecimiento de  $4.535 \text{ kg.mes}^{-1}$ ; y el tercer momento, a los 48 meses, cuando hubo una aceleración del 100 % con respecto a la tasa inicial, ello muestra una tasa de  $7.642 \text{ kg.mes}^{-1}$  (Tabla 1-31). De la misma manera, la curva de crecimiento, muestra una concavidad hacia arriba, que demuestra lo comentado (Figura 1.11 a).

La tasa total de acumulación de biomasa, estuvo acelerada en el transcurso de las diferentes fases de desarrollo de la planta; a los 12 meses de edad, exhibió un tasa de  $6.505 \text{ kg.mes}^{-1}$ ; posteriormente, a los 24 meses, aumentó en un 50 % la velocidad de crecimiento, y pasa a  $8.891 \text{ kg.mes}^{-1}$ , para finalizar con un aumento del 100 % de su tasa inicial,  $12.153 \text{ kg.mes}^{-1}$  (Tabla 1-31). El mismo comportamiento tiene gráficamente, cuando la curva presenta una concavidad hacia arriba, como se observa en la Figura 1.11 b, muy similar a la presentada por el fuste.



**Figura 1.11 (a)** Acumulación de biomasa de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en los órganos raíz, fuste y hojas de acuerdo a las diferentes edades en el bs-T



**Figura 1.11 b** Acumulación de biomasa de melina (*Gmelina arborea* Roxb.) en los órganos ramas gruesas, ramas delgadas y Biomasa total de acuerdo a las diferentes edades en el bs-T

### ➤ **Distribución porcentual de la fitomasa en los diferentes órganos de la melina**

Como se observa en la Tabla 1-32, las mayores proporciones de biomasa, se presentaron en el fuste, ya que es el órgano que mantuvo la mayor contribución a la masa seca, en todas de las edades, a los 12 meses de edad, el tallo contribuye con un 42.90 % y las raíces con un 21.39 %, es decir, un poco más del 64% del total de la biomasa, siendo así, los principales aportantes a la fitomasa. A los 48 meses, se presentó la máxima proporción en el fuste (tallo), con un 52.28 % ; ello indica que el vegetal ha acumulado en este órgano, más de la mitad de la biomasa, necesaria para el sostenimiento de la parte aérea, que traería en esta edad, además, un buen crecimiento en altura y diámetro de éste órgano. A los 24 meses, además del tallo, que en proporción está en un 44.17 %, las ramas gruesas, contribuyen con un 17.98 %, constituyéndose en esta edad, como el segundo órgano en proporción, con un papel importante en el sostenimiento de la parte foliar, y de los frutos. El tallo se mantiene en una proporción estable, ya que a los 36 meses participó con un 44.87 % fluctuó hasta más del 50 % , como se mencionó anteriormente, a los 48 meses, donde las ramas gruesas aportan el 14.70 % estabilizándose en este valor. Por otra parte las ramas delgadas y las hojas, fueron los órganos que menos contribuyeron con el aporte en fitomasa; sin embargo, se mantuvieron estables durante el período de las evaluaciones, con proporciones que fluctuaron entre el 12 y 14 % para ambas estructuras.

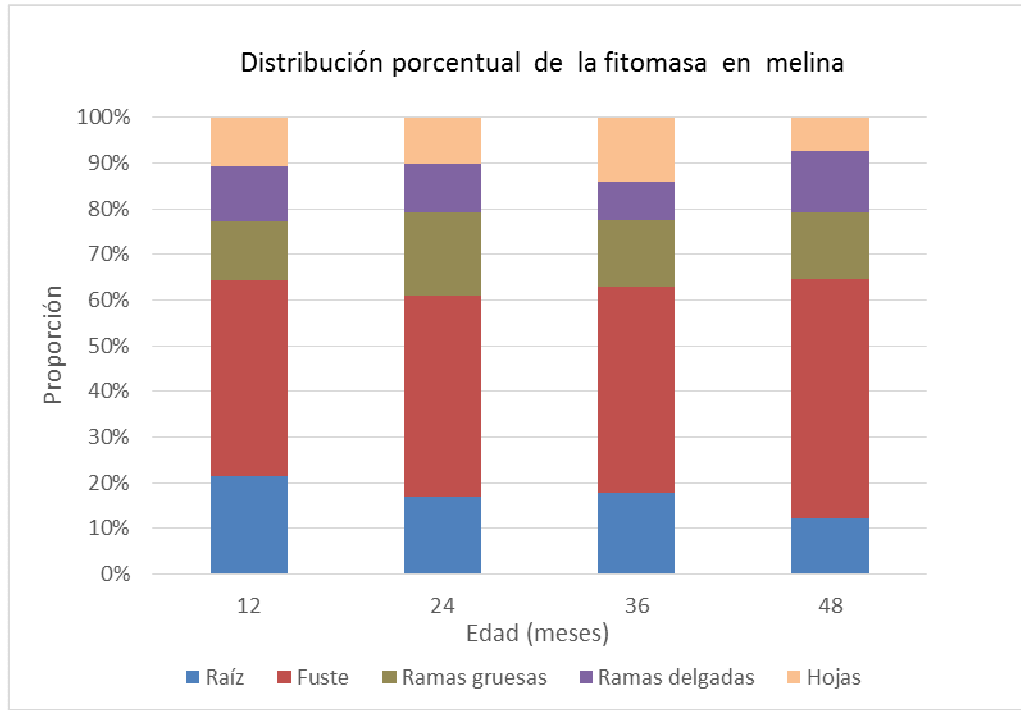
**Tabla 1-32** Distribución de la fitomasa de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en proporciones (%) para los distintos órganos durante la fase juvenil del SAF cacao, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Edad cacao	(meses) melina	Raíces	Fuste	Ramas	Ramas	Hojas
				gruesas	Delgadas	
0	12	21.391*	42.896 *	12.976	12.112	10.625
12	24	16.938	44.169 *	17.977*	10.743	10.173
24	36	17.939*	44.870 *	14.648	8.526	14.017
36	48	12.316	52.280 *	14.702*	13.242	7.460

\* Mayor aporte en biomasa en las diferentes edades de la fase juvenil del cacao, determinados en % de materia seca

En la Figura 1.12, se aprecia cómo, en todas las fases del crecimiento, el tallo tiene una proporción mayor a la de los demás órganos, las raíces, muestran un aporte significativo en la primera etapa (12 meses); el menor aporte lo hacen las ramas delgadas y las hojas, las cuales mostraron desde el inicio del ciclo, un aporte poco significativo a la fitomasa. Entre el mes 24 y 36, el vegetal alcanzó una

estabilidad en la proporción de todos los órganos, manteniendo un comportamiento similar, en la última etapa de desarrollo del cultivo.



**Figura 1.12** Gráfico de barras para la distribución de biomasa de melina (*Gmelina arborea Roxb.*) en los distintos órganos durante la fase juvenil del SAF cacao, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013

## 1.4. Discusión

Al inicio de la producción de mazorcas de cacao (24 MDI), los árboles de esta especie, alcanzaron una altura aproximada, de 3.0 m (Figura 1.1). Según el estudio realizado por Martínez *et al.* (2013), a los dos años de edad, la altura total de las especies muestreadas en los sistemas de frutales nativos variaron de 0.9 m a 1.97 m para la especie *Theobroma cacao*. Para *Theobroma grandiflorum* (copoazú), la altura varió de 0.62 m a 2.07 m. La diferencia en la altura, que es de aproximadamente 1.00 m, entre los individuos de esta investigación y la de estos autores, se debió sin duda, a la característica de los suelos, ya que en la Estación Agraria Cotové se presentaron unos suelos químicamente buenos, con pH de 6,5 a 6,9; el nivel de materia orgánica está en 6.8 y el nivel de fósforo (P), está entre 15 y 25 ppm. Los suelos, de donde proceden las especies estudiadas, por Martínez, *et al.*, (2013); del distrito de San Juan Bautista, departamento de Loreto, Perú. se ubican en terrazas medias onduladas arcillosas, químicamente son de reacción ultra ácida a extremadamente ácida (pH 2.26 a 4.35). Tienen alto porcentaje de materia orgánica y bajo fósforo en la capa superficial (Escobedo (2012), citado por Martínez, (2013).

A los 12 MDI, el tallo (injerto) del cacao, logró tener un aumento apropiado para sostener las demás estructuras del dosel, esta tendencia incremental y divergente en el diámetro del injerto, estadísticamente, continuó presentándose hasta los 21 MDI, fase en la cual se estabilizó el desarrollo de este órgano, con un mínimo engrosamiento a los 24 MDI. Con esta tendencia, se marca un aumento parecido al estudio realizado por Ortiz *et al.* (2008), quienes estimaron, que un árbol de cacao presentaría un diámetro a 30 cm de altura de 28 cm, a los 25 años de edad, con incrementos de  $1.1 \text{ cm.año}^{-1}$ . De esta manera, en esta investigación, los árboles alcanzarían, un diámetro de 29.69 cm a los 25 años de edad.

La estrategia de crecimiento del sistema aéreo (*shoot*) del cacao en el bs-T es secuencial, de tal manera que, en los primeros 12 MDI el vegetal estuvo dedicado al desarrollo en altura y engrosamiento del tallo; Así mismo, el desarrollo del dosel, en forma acelerada ocurrió en los primeros 7 meses, con la formación de follaje en la primera fase del crecimiento vegetativo. En este momento, hay un balance apropiado entre las estructuras que conforman el sistema aéreo (SA), el vegetal se prepara para la diferenciación de órganos, lo que ocurrió a los 18 MDI. El período

comprendido entre esta edad y los 24 MDI, el desarrollo del SA es desacelerado, porque la planta direcciona los foto asimilados hacia las estructuras reproductivas y productivas, cosechadas en la última edad mencionada.

La acumulación de la biomasa total, al igual que las demás variables medidas, se incrementó con el tiempo, en el desarrollo de la etapa juvenil del cacao, mostrando una acumulación total, a los 24 MDI, de 1.685 kg /individuo (Tabla 1-8), edad en la cual se ha iniciado la fase productiva del cultivo. El aumento en materia seca, es lento en las primeras edades del cultivo, cuando se inició la brotación del injerto, luego, se hace más notorio en la medida que transcurre la fase juvenil del cacao (18, 21 y 24 MDI). (1.087 kg a los 18; 1.418 kg a los 21; y 1.685 kg a los 24 MDI). La biomasa a los dos años de edad, estuvo para Martínez *et al.* (2013), entre 0.47 a 2.24 kg para la especie *Theobroma cacao* (cacao). Para *Theobroma grandiflorum* (copoazú) la biomasa varió de 0.47 kg a 4.77 kg, lo cual es muy semejante a esta investigación. Por otra parte la biomasa total de un árbol de cacao a los 24 meses, alcanzó un promedio de 0.842 kg.año<sup>-1</sup>, lo cual coincide con lo evaluado por Ortiz *et al.*, (2008) quienes estimaron, que un árbol de cacao puede acumular, en promedio, 22 kg de biomasa a la edad de 25 años, es decir 0.88 kg.año<sup>-1</sup>.

Como se pudo apreciar en la Tabla 1-8, las raíces secundarias, fueron ganando mayor proporción en la biomasa, logrando un aumento significativo, pasando de 54.352 g en el mes 12, a 120.057 g en el mes 15, luego incrementó su peso seco a los 215.402 g a los 24 meses. Esto indica que al inicio de la fase vegetativa del cultivo, el individuo acumuló en la raíz principal, mayor cantidad de biomasa, favoreciendo de esta manera el anclaje del árbol al suelo; luego en la etapa final de la esta fase, las raíces secundarias que están encargadas de la nutrición, acumularon mayor cantidad de biomasa, favoreciendo la translocación de nutrientes al llenado de frutos. Es importante anotar que, las raíces secundarias mantuvieron el menor aporte proporcional (6–8%) a la fitomasa, primordialmente, los primeros 12 MDI; en el período de crecimiento siguiente (12–24 MDI) la contribución se estabilizó entre 11 y 14%, cuando las ramas aportaron entre 8 y 10%. Este comportamiento de las raíces secundarias concuerda con Fageria (2006), quién afirma que la proporción de fitomasa de éstas, es mínima, ya que su importancia radica en la longitud de ellas, debido a que su principal función es la de absorción de agua y elementos minerales; mientras que la raíz principal soporta todas las

estructuras del vegetal. A pesar de no ser notorio el aumento en proporción de la biomasa, para el vegetal es suficiente, para mantener un buen estado nutricional en el vegetal.

En la Figura 1.3. se apreció cómo, en la primera fase del crecimiento, el tallo de cacao, tiene una proporción del 50% de aporte a la fitomasa; pero, aunque mantiene esta mayor proporcionalidad, empieza a disminuir a partir desde los 7 MDI, hasta llegar a ser de casi 29% a los 24 MDI (Tabla 1-11). Esto indica que al inicio de la fase productiva del cultivo, el árbol balancea su sistema aéreo (SA, *shoot*) con su sistema subterráneo (SS, *root*), cuya relación SA/SS llega a ser de 2:1 a los 24 MDI, con 1090 g del primero y 595 g del último (Tabla 1-8). Indicando que, cuando se inicia la fase productiva del cultivo, el árbol balancea su sistema subterráneo con su sistema aéreo, logrando que los dos órganos de sostén de la planta; es decir la Raíz principal y el tallo, alcancen una proporcionalidad similar en los 24 MDI (22.554% Raíz principal y 28.760% Tallo como se muestra en la Tabla 1-11).

La proporción más baja de fitomasa, durante la fase juvenil del cacao, está dada por las ramas; las que alcanzaron la máxima proporción a los 10 MDI, casi 10% (Tabla 1-11); esta proporción se mantiene estable, con una leve disminución hasta los 24 MDI, aproximadamente 8%, demostrando que el vegetal es capaz de sostener su sistema foliar, desde el inicio de la fase vegetativa hasta inicio de la productiva, donde el follaje muestra ser muy representativo en el aporte de proporción de la biomasa desde los 21 meses en adelante, como se observa en la Figura 1.3.

Cuando finalizó el primer ciclo productivo del plátano (12 meses), la planta alcanzó una altura de 4.0 m. aproximadamente. El crecimiento del plátano hartón es superior al plátano Hondureño enano, también conocido como Dominicano hartón enano, el cual, como presentó Aristizábal (2010), en su investigación, la máxima altura promedio alcanzada por las plantas fue de 2.2 m. El plátano hartón, según este resultado, demuestra ser muy apropiado como sombrío transitorio, es decir, como especie acompañante del cacao durante 4 años, que sería su permanencia en el SAF cacao, con una altura superior al cacao, el cual alcanzó a los 12 MDI una altura de 1.635 m (Tabla 1-3); esto indica que al finalizar el cuarto ciclo productivo del plátano (tomando como base un año entre cosecha y cosecha), se sacaría el plátano del SAF, cuando el cacao no requiera tanta sombra. Hubo una evolución en la altura de la planta, de tal manera, que el incremento fue constante en el transcurso

de su ciclo productivo, así, a los 4 meses, la planta de plátano creció 1.710 m y llegó hasta los 4.016 m a los 12 meses (Tabla 1-14), donde cesa el crecimiento, cuando inició la emisión de la bellota. Asimismo, las hojas funcionales presentes ( 8.861 a los 7 meses y 11.528 a los 10 meses) y el área foliar en las plantas, (6.25 y 12.89 m<sup>2</sup> en estas mismas edades), demuestran la importancia de las hojas en la producción; y tomando en cuenta la cantidad de hojas presentes en el momento de la parición (emisión de bellotas), se obtuvo una cantidad de 12 hojas aproximadamente, con un resultado similar a lo reportado por Aristizábal (2010), con 11 hojas funcionales cuando ocurrió la emergencia de la bellota, en plátano hondureño, y que según Martínez (1984), a partir de ese momento , la planta debe mantener un mínimo de ocho hojas para garantizar el llenado del racimo. Aristizábal y Landínez (1993), por su parte, establecieron que si bien el número de hojas funcionales presentes es importante, lo es mucho más, la posición de las mismas en la planta, ya que este hecho es el que determina la contribución que cada una de ellas al llenado del racimo.

El promedio de emisión de las hojas en plátano, es de 1 hoja cada 15 días, para un total de 27.28 hojas cuando se encuentra en el primer ciclo productivo (Tabla 1-14), el cual se dio a los 12 meses, parámetro importante en el cultivo, por el cálculo de la edad de parición (emisión de bellotas), lo que es similar a lo reportado por Aristizábal (2010), que afirma que la diferenciación floral, ocurre cuando en promedio han emergido 28 hojas.

Por otra parte, la velocidad de crecimiento del diámetro del seudotallo, hojas totales y hojas presentes, es desacelerada durante todo el ciclo productivo, cuando las tasas se redujeron al 50% de su valor inicial para todos los casos (Tabla 1-16). lo cual indica que la emisión foliar disminuye a medida que la planta se acerca a la emisión de la bellota, lo que concuerda con lo reportado por Aristizábal (2010), donde la emisión de hojas se detuvo una vez ocurrió la emergencia de la bellota, lo cual indica que el hábito de crecimiento de la planta es determinado (Vuylskete *et al.*, 1996) y coincide con lo reportado por Irizarry *et al.* (1980), quienes observaron que el cormo, el pseudotallo y las hojas detienen su crecimiento cuando emerge la bellota (Aristizábal, 2010). El desarrollo del sistema radical y el crecimiento de los brotes están estrechamente relacionados. Según Belalcázar (1991), citado por Aristizábal ( 2010), durante el ciclo vegetativo del plátano Dominico Hartón se pueden presentar entre 350-400 raíces. En esta investigación, la biomasa de las raíces y la de los puyones, presentaron un incremento similar en todas las edades; sin embargo, como se observa en

la Tabla 1-14, el máximo incremento de puyones se da entre los 7 y 9 meses de edad, coincidiendo con un aumento en la biomasa en las edades 6 y 9 meses (Tabla 1-18).

Los resultados obtenidos en la acumulación de biomasa para melina, presentan similitud, con lo reportado por Andrade (2013), el cual afirma que en términos porcentuales el fuste del árbol concentra la mayor cantidad de biomasa aérea, representado entre 55 al 77% del total, luego están las ramas, de 5 a 37%; para esta investigación se obtuvo una contribución del fuste del 43% de la biomasa total aproximadamente en los 12 primeros meses, y llegó al orden del 52 % a los 48 meses de edad. En cuanto a las ramas, se obtuvieron resultados, que se mantuvieron entre el 24 y 27 % aproximadamente, durante los 4 años de evaluaciones, afirmando lo estudiado por Andrade (2013).

## Conclusiones

- El crecimiento y desarrollo de las especies estudiadas en el SAF cacao, como es de esperarse, estuvo en función del tiempo, es decir que para las variables evaluadas, hubo un incremento en el transcurso de sus fases de crecimiento y desarrollo.
- Al inicio de la producción de mazorcas de cacao (24 MDI), los árboles alcanzaron una altura aproximada, de 3.0 m, con una altura adecuada para el manejo de la plantación con un diámetro de copa, de 2.0 m y 4.3 cm de diámetro de tallo.
- Hasta los 12 MDI, puede afirmarse que la velocidad de crecimiento para las especie cacao es acelerada, confirmando la especialización de órganos para el sostenimiento del vegetal, además de equilibrarlo en su nutrición para la fase productiva.
- El tallo del cacao y las raíces, se mantuvieron como los órganos que aportaron la mayor proporción a la biomasa total, donde el tallo, a los 24 MDI, aporta la 3° parte de dicha fitomasa con una masa seca de 0.485 kg, y las raíces tanto principal como las secundarias, aportaron un poco más de 0.595 kg, de un total por todo el individuo de 1.685 kg de masa seca a los 24 MDI.
- El sistema foliar del cacao, inicialmente no se mostró como representativo tanto en área foliar como en biomasa. Sin embargo, poco a poco fue ganando importancia, demostrando lo esencial que son las hojas para la conversión de foto asimilados para la etapa reproductiva y productiva en el SAF.
- Después de realizar el análisis de regresión simple para las variables de evaluación de la biomasa y el Área foliar, se encontró una correlación entre la Biomasa total y el Área foliar, con un nivel de confianza del 75 % aproximadamente, pudiendo calcular el valor de una de estas variables, teniendo valores de la otra, mediante la ecuación ajustada para tal fin.

- La planta de plátano alcanzó una altura de 4.0 m. aproximadamente. Hubo una evolución en la altura de la planta, que muestra que el incremento fue constante en el transcurso de su ciclo productivo, donde cesa su crecimiento cuando inició la emisión de la bellota. Con esta longitud, que es superior a la del cacao, se afirma que el plátano es una buena especie acompañante para el cacao, como sombrío transitorio, durante los primeros 4 años del SAF.
- Las hojas emitidas en plátano fue de 27 a los 12 meses, hojas funcionales al momento de la parición 12, lo cual demuestra un excelente comportamiento en el SAF cacao, alcanzando los niveles adecuados para la parición del cultivo (emisión de bellotas).
- Se obtuvo que para la edad de 7 meses, el diámetro delseudotallo, arrojó una media de 0.229 m en surco doble y en surco sencillo 0.165 m., lo que implicó entonces, un mayor desarrollo de este órgano, en las parcelas con el arreglo de Surco Doble de maderables.
- A los 12 meses de edad una planta de plátano, alcanza a acumular una biomasa total de 5.742 kg de materia seca, de los cuales elseudotallo, es el órgano que contribuye con mayor proporción a esta fitomasa con 2,613 kg, es decir que aporta casi el 50 % del total de la biomasa, el cormo y las hojas aportan aproximadamente con 1.150 kg de masa seca cada uno, haciéndose notoria la importancia de las hojas en emisión de la bellota.
- La altura de la melina alcanzó los 2.510 m a los 3 meses de edad, y cuando cumple 12 meses, se encontró en el orden de 8 m. aproximadamente, lo que indica ser una especie de crecimiento rápido. Asimismo, el diámetro del fuste (tallo), mostró un aumento notorio en todas las edades de la plantación; así los 3 primeros meses de edad pasa de 1.365 cm a los 6.93 cm a los 6 meses, es decir, casi 6 veces el valor inicial; para las siguientes edades.
- El incremento de biomasa en el fuste fue significativo en las diferentes edades de la melina, es el órgano con mayor acumulación de biomasa durante las diferentes fases del crecimiento del árbol, donde fue notoria la cantidad de biomasa acumulada, ya que superó el 100 % de la biomasa inicial en un año (27.333 kg en 12 meses, y 69.955 kg a los 24 meses de edad).

- El árbol de melina alcanzó un peso seco total de 416.530 kg a los 48 meses, la fitomasa se va ganando poco a poco en la medida que transcurre el periodo de desarrollo del vegetal.
- Con los modelos ajustados para crecimiento y biomasa (Gompertz y Alométrico), se pudo calcular las tasas de crecimiento y acumulación de biomasa para cualquier tiempo, según las ecuaciones derivadas para todas las especies del SAF cacao.
- Las especies evaluadas en el SAF cacao, demuestran tener un buen comportamiento en el sistema asociado, lo que permite establecer, sistemas de producción sostenibles, no sólo ambientalmente, sino económicamente rentables, constituyéndose para el productor rural, como alternativa de producción perdurable en el tiempo.

## **Capítulo 2. Productividad del sistema agroforestal con cacao en estados tempranos del desarrollo en el bosque seco tropical (bs-T)**

### **2.1. Marco teórico**

A diferencia de las especies anuales, los árboles almacenan los foto asimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados, por lo que se les debe considerar como reservas naturales de carbono. La capacidad para almacenar carbono en forma de biomasa aérea varía en función de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000, citado por Martínez, 2013). La determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de sistemas forestales, naturales, alterados o inducidos por el hombre. En las últimas décadas, se ha prestado considerable atención a la estimación de biomasa de árboles individuales y rodales forestales. Se han desarrollado ecuaciones en relación a la biomasa o sus componentes (raíces, hojas, ramas y fuste) con las características dasométricas de los árboles (Martínez, 2013). Las plantas utilizan CO<sub>2</sub> y liberan O<sub>2</sub> durante el proceso de la fotosíntesis. De esto se desprende que los sistemas agroforestales y forestales se conviertan en una alternativa como sumideros de CO<sub>2</sub> atmosférico (Figuroa *et al.*, 2013).

En la actualidad, los estudios sobre biomasa tienen como finalidad entender los ciclos de la energía y de los nutrientes. También se están usando para ver el efecto de la vegetación en el ciclo global del CO<sub>2</sub> (Brown, 1997). Algunos modelos de CO (Mákelá, 1997; Mohren, 1994), incluyen la estimación de la biomasa o una función de la biomasa como el volumen, sus componentes o

algunos parámetros relacionados, para establecer los flujos de este gas entre la vegetación (Schroeder *et al.*, 1997; TerMikaelian y Korzukhin, 1997; Brown *et al.*, 1989; Návar *et al.*, 2001) (Martínez, 2013).

Es necesario mejorar la estimación de la biomasa aérea con una mayor precisión, con el propósito de modelar los flujos de carbono por cambio del uso de la tierra. Los resultados obtenidos dependerán en gran parte de las cuantificaciones de biomasa de los sistemas de frutales en los bosques nativos. Existe muy poca información sobre la estimación de biomasa en especies de frutales nativos (Murray, 2014).

El cultivo del plátano en Colombia abarca un área de 400.000 ha, es la principal fuente de carbohidratos para las poblaciones urbana y rural, con un consumo promedio de 68 kg de plátano por persona al año, y genera ingresos que representan el 7% del Producto Interno Bruto del país. La producción total anual alcanza 2.5 millones de toneladas de racimos, el 95% de las cuales se destina para el consumo interno. Los principales centros de producción se encuentran en la zona cafetera de la región Andina; allí se cultivan 231.000 ha que aportan el 67% de la producción nacional, que abastece los principales mercados del país. Por estas razones, es considerado uno de los cultivos más importantes de Colombia. Adicionalmente, hace parte de la cultura agrícola del país porque tradicionalmente se cultiva asociado a plantaciones de café (Aristizábal, 2010).

La acumulación de biomasa en plantaciones es un indicador de la complejidad estructural, la productividad ecosistémica y el secuestro de carbono. Este último es extremadamente relevante en el contexto del cambio climático. Se estima que 6 % de la superficie global ( $1 \times 10^{12}$  ha) son tierras degradadas que reforestadas se convertirían en sumideros importantes de carbono (GPFLR, 2009) (Douterlungne *et al.*, 2013).

El término productividad, se refiere no sólo a la cosecha de frutos, sino también a los aportes que realizan las diferentes especies del sistema, en cuanto a la evolución en el crecimiento y desarrollo de las plantas, distribución de fitomasa, que tiene que ver con la eficiencia fotosintética, donde se puede agregar la captura de Carbono, con el enriquecimiento del paisaje y mantenimiento de nutrientes en el suelo. (Ortiz *et al.*, 2008).

Para el logro de la anterior premisa, se hace necesario generar conocimiento técnico y científico, sobre el crecimiento y desarrollo de los diferentes componentes del sistema, que permitan tener una idea clara sobre la distribución de los foto asimilados, plantas jóvenes, así como los aportes en cosecha de las especies semipermanentes del sistema (plátano), en su nuevo entorno ambiental de crecimiento, de tal manera, que se puedan generar estrategias de manejo y conducción del cultivo, para optimizar la disponibilidad de recursos, disminuyendo los niveles de competencia entre los componentes, que constituyen dicho SAF (Aristizábal, 2010).

La determinación de las tasas de acumulación de biomasa de los árboles tropicales es importante tanto para la fisiología, la ecología y la silvicultura, en el primer caso, permite cuantificar la funcionalidad de las especies y su capacidad de fotosintetizar, al igual que la eficiencia en la captura de carbono para la acumulación de materia seca. Ecológicamente es fundamental en los estudios de población y de la productividad de los ecosistemas. En la silvicultura, es la base del manejo forestal a partir de la estimación de los ciclos de corta y el *stock* de madera, además, permite despejar incógnitas como cuál es la tasa de renovación de la biomasa (*turnover*), de la masa boscosa o si ésta varía a lo largo del ciclo de vida de los árboles, lo que permite delinear estrategias de manejo sostenible y uso racional de este recurso (Vanclay, 1998; Phillips *et al.*, 2004; Montagnini & Jordan, 2005).

La biomasa se define como la suma total de la materia viva que se encuentra en un ecosistema en un momento determinado y se expresa en términos de peso seco, masa o volumen. Los estudios de biomasa son importantes para comprender el ecosistema forestal, ya que explican la distribución de la materia orgánica en el sistema y permiten evaluar los efectos de una intervención, respecto a su equilibrio en el ecosistema. Existen diferentes métodos para estimar la biomasa, los utilizados más frecuentemente son: Estudios realizados tanto en Norteamérica como en Europa y Asia, concuerdan en que la evaluación de la biomasa arbórea debe contemplar la separación de componentes en fuste, hojas y ramas, debería separarse también corteza y raíces (Anguiano *et al.*, 2013).

La contribución porcentual de los diferentes componentes (fuste, corteza, ramas, hojas y raíces) en la biomasa total de un árbol varía considerablemente dependiendo de la especie, edad, sitio y tratamiento del agro-ecosistema. Los ecosistemas forestales se pueden identificar diferentes

---

compartimientos en los cuales se almacena el Carbono. En términos generales se habla de la biomasa aérea, necromasa, biomasa subterránea, Carbono en el suelo, productos derivados de la madera en el caso de aprovechamiento forestal y otros productos no maderables (Anguiano, *et al.* 2013).

## **2.2. Materiales y métodos**

### **2.2.1. Localización**

El proyecto se ejecutó en la Estación Agraria Cotové, de la Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, la cual está situada en la vereda El Espinal, municipio Santafé de Antioquia (Antioquia). Ecológicamente, se encuentra en la zona de vida bosque seco Tropical (bs-T), a una altitud, aproximada, de 540 msnm., con temperatura anual promedio de 27°C, precipitación media anual de 1.031 mm y humedad relativa inferior al 70%. (Pérez y Barreiro, 1986).

Esta investigación fue financiada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, la Vicerrectoría de Investigación y Extensión; la Dirección de Investigación de la Sede Medellín – DIME y la Vicedecanatura de Investigación y Extensión de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín; la cual fue identificada con los códigos UN 20101007225, 20101009650 y 201010011040, respectivamente; el cual se adelantó desde septiembre de 2009; e, inicialmente, en alianza estratégica con la Compañía Nacional de Chocolates.

### **2.2.2. Suelos**

Los resultados del análisis químico de suelos muestran una adecuada textura, pH neutro, sin problemas de acidez por aluminio y con buen contenido de bases intercambiables y adecuado porcentaje de materia orgánica para el clima tropical, como se mencionó en el capítulo anterior.

### **2.2.3. Material vegetal**

Se trabajó en un sistema agroforestal (SAF), donde se utilizaron especies semiperennes y perennes y la especie agrícola, así:

- Semiperennes: Como sombrío transitorio, el plátano, el cual se quedaría durante los primeros 4 años, así:

- Plátano (*Musa AAB* Simmonds), variedad Hartón, recomendada para estas altitudes, sembrado por propagación vegetativa con colinos provenientes de la zona bananera del Urabá Antioqueño
- Perennes: maderables de ciclo largo.
- Caucho (*Hevea brasiliensis* Müell Arg.), donde se incluyeron los clones IAN-873, IAN-710 y FX-3864 sembrados por medio de *stumps*, provenientes del vivero de Asculticaucho, de la zona del Bajo Cauca Antioqueño
  - Melina (*Gmelina arborea* Roxb.) De los rodales semilleros de procedencia, que tiene la Universidad del Tolima en la Granja de Armero (Tolima), se logró la semilla requerida para la siembra de esta especie.
- Cultivo agrícola principal:
- Cacao: Se establecieron cuatro clones de alto rendimiento: ICS - 60, TSH – 565, ICS – 95, CCN – 51; elegidos con base en su buen comportamiento en las zonas cacaoteras del país, en cuanto a productividad, alta tolerancia a enfermedades, precocidad y buena intercompatibilidad; los cuales se injertaron sobre el patrón IMC-67, provenientes de la Granja de la Compañía Nacional de Chocolates en el Municipio de Támesis (Antioquia).

#### 2.2.4. Diseño experimental

Se evaluaron dos factores: “**maderable**”, conformado por los niveles caucho y melina; y “**densidad de población del sombrío**”, definidos por los niveles surco doble y sencillo; los cuales definen las densidades de población detalladas en la Tabla 2-1; los maderables están plantados en barreras, separadas 21 m, con individuos distanciados a 3 así mismo, cada surco doble a 3 m. Ello dio lugar a las cuatro combinaciones de tratamientos, así: melina y caucho plantados en baja y alta densidad poblacional del sombrío; lo que significa 173 y 346 árboles.ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos se asignaron a las unidades experimentales con base en un diseño de bloques al azar generalizado, con tres bloques y cuatro repeticiones de cada tratamiento agroforestal por bloque; ello condujo a 48 unidades experimentales, cada una de ellas constituida por una parcela con un área de 882 m<sup>2</sup>

(21x42 m<sup>2</sup>). Por consiguiente, como los tratamientos implicaron diferentes poblaciones del sombrío; así mismo, el cacao y el plátano quedaron conformados por 1.210 individuos.ha<sup>-1</sup> (baja densidad del sombrío) y 1.037 individuos.ha<sup>-1</sup> (alta densidad del sombrío).

**Tabla 2-1.** Densidades poblacionales de las especies en el SAF en la Estación Agraria Cotové. 2011-2013

Especie	Densidad de población (árboles.ha <sup>-1</sup> )	
	Baja densidad sombrío	Alta densidad sombrío
<i>Theobroma cacao</i> L.	1.210	1.037
<i>Musa AAB</i> Simmonds	1.210	1.037
<i>Gmelina arborea</i> Roxb.	173	346
<i>Hevea brasiliensis</i> Muell Arg.	173	346

La información recolectada se analizó con el software estadístico SAS®, versión 9.2 (SAS Institute Inc., 2003), donde se utilizó el diseño ya mencionado, con medidas repetidas en el tiempo. La comparación de medias se realizó con la prueba Tukey, con un nivel de significancia de 0.05. La comparación de producción de madera de melina, así como la producción de plátano en el SAF cacao, se realizó con base en Análisis de Varianza y se ajustó con el modelo de Gompertz.

## 2.2.5. Variables de productividad para el SAF cacao

### 2.2.5.1. Aporte de biomasa de las especies que conforman el SAF con cacao

Los estudios de la evolución de la biomasa, en 3 de las especies que conforman el SAF (cacao, plátano y melina), se realizaron en 7 parcelas, plantadas en alta densidad de sombrío de melina, como se aprecia en la Tabla 2-1; las cuales fueron diseñadas para este fin: Se adelantaron evaluaciones en 6 individuos por especie (o unidades productivas para el caso de plátano), por tiempo de evaluación, seleccionados de manera aleatoria; los cuales se cosecharon en su totalidad, para separar sus diferentes órganos, lo que implicó la extracción completa de los especímenes seleccionados. (Ver materiales y métodos capítulo 1).

Con los resultados obtenidos de la biomasa de cada una de las especies que se extrajeron, y los modelos ajustados de biomasa para cacao, melina y plátano, se cuantificó la cantidad total de biomasa en el SAF cacao, proyectada en el tiempo, teniendo en cuenta la totalidad por especie, por edad, por individuo y por hectárea, y de esta manera el aporte total del SAF cacao, en el arreglo de alta densidad poblacional de sombrío con melina, (Surco doble melina).

### 2.2.5.2. Cantidad de Carbono, de CO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> e, capturado por el SAF cacao

Para obtener la cantidad de Carbono, se toma la cantidad de biomasa de los diferentes componentes y se realiza la multiplicación por el factor de 0.5. Este factor es el resultado de un gran número de estudios que han demostrado que en promedio la materia vegetal contiene un 50% de carbono, siendo esta una norma establecida por el panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, 2003). Sin embargo, se multiplicó por 0.45 para no sobreestimar esta cantidad.

Se calculó la cantidad de CO<sub>2</sub>e emitido o almacenado a partir de la cantidad de Carbono, se debe multiplicar la cantidad de C, por 3.67, (Dávila, 2011), tomando como constante Kr, la cual es determinada a partir los pesos moleculares; es decir  $CO_2/C = 44/12$

Entonces, la determinación del CO<sub>2</sub> fijado, estuvo dada por la siguiente ecuación:

*Ecuación 8:*  $CO_2 = Kr * C$

Dónde:  $CO_2 =$  cantidad de CO<sub>2</sub> en kg

$Kr =$  Constante determinada por los pesos moleculares

$C =$  Cantidad de Carbono en kg

### 2.2.5.3 . Cuantificación de la cosecha de plátano Hartón

Para cuantificar el primer ciclo productivo de la especie plátano, se tomaron algunos datos de cosecha, aleatoriamente, a 1.000 individuos aproximadamente, que estuvieran en producción, y determinar con ellos, la producción en kg/ha. Se realizó una clasificación de los racimos, teniendo

en cuenta el peso del mismo, y se separó en plátano de primera, a aquellos cuyo peso estuviera en 10 kg o más; el plátano de segunda, aquellos que pesaran menos de 10 kg. Se tomó en cuenta:

- Peso total de racimo (kg)
- Peso del vástago (kg).
- Número de manos
- Peso real (Peso total del racimo menos el peso del vástago)
- Porcentaje de plátano de primera (1°)
- Porcentaje de plátano de segunda (2°)
- Porcentaje de vástago

Se debe tener en cuenta que la especie plátano es tomada en el sistema agroforestal con cacao, como una especie acompañante, denominada sombrío transitorio, la cual permanecería en el sistema durante cuatro años, periodo tras el cual se retiran todos los individuos. De esta manera, se puede decir, que el ciclo de vida de esta especie es más corto que el de las demás, por lo que se pudo tomar datos de productividad en su primer ciclo, con base en frutos cosechados, durante el tiempo que dura esta investigación.

#### **2.2.5.4. Volumen de madera de la especie melina (*Gmelina arborea* Roxb.)**

A esta especie se le estimó el volumen de madera, además, se estimó el rendimiento acumulado, lo cual se hizo cada vez que se cosecharon los individuos para biomasa, es decir en las cuatro evaluaciones de acumulación de la fitomasa. El volumen se cuantificó en m<sup>3</sup>. Para calcular el volumen se tuvo en cuenta la ecuación de un cilindro, para lo cual se requería de los siguientes datos: Altura total del árbol, Largo de las trozas, Diámetro normal, Diámetros de cada una de las trozas. Se obtuvo así, el volumen por trozas y por árbol, para luego estimar acumulación de madera por individuo, por edad y por hectárea.

## 2.3. Resultados

### 2.3.1. Aporte de biomasa de las especies que conforman el SAF cacao

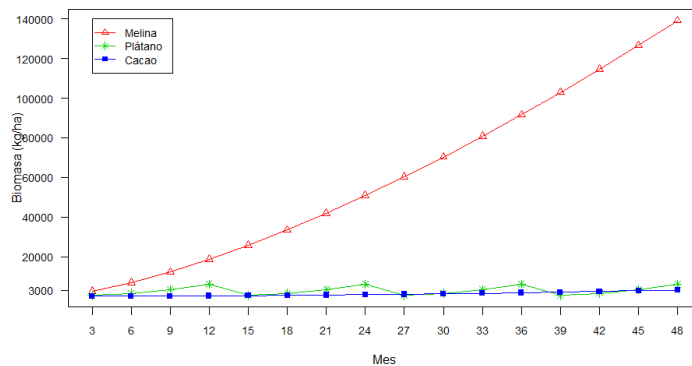
En la Tabla 2-2, se presentan los estimados en la acumulación de biomasa para cada una de las especies que conforman el SAF cacao evaluado, la cual se proyectó en un período de 48 meses, para lo cual se estimaron las cantidades en kg de peso seco, por individuo y por hectárea.

**Tabla 2-2.** Acumulación de la biomasa del SAF cacao, en cada una de las especies: melina, cacao y plátano, conforme a las diferentes edades, en Kg de materia seca, por individuo, por ha, total de los 3 individuos del SAF (melina, plátano, melina) y Total del SAF por hectárea, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2010-2013.

Acumulación de biomasa en Kg de materia seca/Ha								
Edad	melina		plátano		cacao		Melina, plátano, cacao	
meses	árbol	Ha (346)	planta	Ha (1037)	árbol	Ha (1037)	T total/3 individuos	Total SAF
3	7.200	2491.374	0.357	370.488	0.010	10.505	7.568	2872.367
6	19.683	6810.409	1.447	1501.024	0.042	43.503	21.173	8354.936
9	35.446	12264.402	3.281	3402.665	0.096	99.885	38.824	15766.952
12	53.806	18616.906	5.864	6081.374	0.174	180.145	59.844	24878.426
15	74.375	25733.838	0.357	370.488	0.274	284.633	75.007	26388.958
18	96.896	33525.920	1.447	1501.024	0.399	413.623	98.742	35440.568
21	121.180	41928.286	3.281	3402.665	0.547	567.340	125.008	45898.291
24	147.084	50891.099	5.864	6081.374	0.719	745.977	153.668	57718.450
27	174.493	60374.550	0.357	370.488	0.916	949.699	175.766	61694.738
30	203.312	70345.914	1.447	1501.024	1.137	1178.658	205.896	73025.597
33	233.461	80777.682	3.281	3402.665	1.382	1432.985	238.125	85613.331
36	264.874	91646.319	5.864	6081.374	1.652	1712.802	272.390	99440.496
39	297.490	102931.403	0.357	370.488	1.946	2018.220	299.793	105320.111
42	331.257	114614.993	1.447	1501.024	2.265	2349.342	334.970	118465.359
45	366.130	126681.173	3.28126	3402.665	2.610	2706.262	372.021	132790.1
48	402.068	139115.701	5.864	6081.374	2.979	3089.072	410.912	148286.147

El SAF cacao, con alta densidad de siembra de melina, según la Tabla 2-2, alcanzó una biomasa total de 148286.147 kg/ha; es decir 148 toneladas aproximadamente, a los 48 meses de edad de la plantación; que traería un beneficio ambiental, además del económico con los productos generados de este sistema de plantación. La especie que más contribuyó a este aporte fue la melina, la cual mantuvo en todas las edades mayor porcentaje de acumulación; esto debido a su gran adaptación a las condiciones climáticas del experimento, además del beneficio nutricional que presentaron los suelos de la Estación agraria Cotové.

Un individuo de melina acumula en un período de 48 meses una fitomasa de 402,068 kg, mientras que una planta de plátano acumula al año 5.864 kg de masa seca, y un árbol de cacao 2.979 kg de biomasa en 48 meses. Gráficamente, en la Figura 2.1, se aprecia la tendencia cóncava de la curva para la especie melina, quien contribuyó con el mayor aporte de la biomasa del SAF. Para cacao y plátano se presenta una tendencia lineal, que da como resultado un bajo aporte a la biomasa del sistema.



**Figura 2.1.** Acumulación de la biomasa total para las especies que conforman el SAF CACAO, melina, plátano y cacao en el bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013

### 2.3.2. Cantidad de Carbono, CO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> capturado por el SAF cacao

Como se observa en la Tabla 2-2, los beneficios ecosistémicos que presentan los SAF, son altos, desde la captura de CO<sub>2</sub> atmosférico, a partir de los primeros meses de edad de la plantación, con

una captura de CO<sub>2</sub> de 4.744 toneladas a los 3 meses de edad. A los 24 meses 95 toneladas aproximadamente; a los 48 meses 244 toneladas de CO<sub>2</sub> e. La especie melina, contribuye con la mayor captura de Carbono para el SAF, indicando su buen comportamiento en asocio con las especies agrícolas, como son el cacao y el plátano. Los beneficios para los SAF, son más ventajosos que los que se presentan en los monocultivos, en el SAF cacao, se obtuvo 11.195 Mg C. ha<sup>-1</sup> a los 12 meses, a los 24 meses 25.973 Mg C. ha<sup>-1</sup> a los 36 meses 44.748 Mg C. ha<sup>-1</sup> (Tabla 2-3).

**Tabla 2-3.** Acumulación de Carbono, cantidad de CO<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> capturado por las especies que conforman el SAF: melina, plátano y cacao conforme a las diferentes edades, en Kg para Biomasa total, Carbono total, Cantidad de CO<sub>2</sub>; y toneladas de CO<sub>2</sub>e capturado, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové 2010-2013

<b>Productividad de SAF cacao por ha</b>				
<b>Edad</b>	<b>Biomasa total SAF</b>	<b>Carbono total</b>	<b>Cantidad CO<sub>2</sub></b>	<b>Cantidad CO<sub>2</sub>e</b>
<b>meses</b>	<b>Kg</b>	<b>Kg</b>	<b>kg</b>	<b>toneladas</b>
3	2872.367	1292.565	4743.714	4.744
6	8354.936	3759.721	13798.177	13.798
9	15766.952	7095.128	26039.122	26.039
12	24878.426	11195.292	41086.720	41.087
15	26388.958	11875.031	43581.365	43.581
18	35440.568	15948.255	58530.097	58.530
21	45898.291	20654.231	75801.028	75.801
24	57718.450	25973.302	95322.020	95.322
27	61694.738	27762.632	101888.86	101.888
30	73025.597	32861.518	120601.773	120.601
33	85613.331	38525.999	141390.417	141.390
36	99440.496	44748.223	164225.979	164.226
39	105320.111	47394.050	173936.163	173.936
42	118465.359	53309.411	195645.54	195.645
45	132790.100	59755.545	219302.85	219.303
48	148286.147	66728.766	244894.571	244.894

### 2.3.3. Cuantificación de la cosecha de plátano Hartón como aporte al SAF cacao

Al realizar el análisis de varianza para la cosecha del plátano, se encontró diferencias entre las diferentes variables y la densidad de sombrío, como se observa en la Tabla 2-4 se encontró diferencias estadísticas por efecto de la densidad del maderable, para las distintas variables de cosecha de plátano; por lo tanto se realizó una prueba de medias para Alta densidad de sombrío y Baja densidad de sombrío.

**Tabla 2-4.** Análisis de varianza de la cosecha del plátano hartón en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2011-2013.

Efecto	Primera			Segunda		
	Peso racimo	Peso vástago	Manos	Peso racimo	Peso vástago	Manos
Maderable	0.9387	0.8544	0.9794	0.5163	0.2807	0.5567
Densidad población del sombrío	<.0001*	0.0035*	<.0001*	<.0001*	<.0001*	<.0001*
Maderable x Densidad población del sombrío	0.9387	0.6731	0.3592	0.5460	0.3094	0.9049
Efecto	Peso real	Peso primera y segunda	Porcentaje primera	Porcentaje segunda	Porcentaje vástago	
Maderable	0.9041	0.7530	0.8240	0.8187	0.8424	
Densidad población del sombrío	<.0001*	<.0001*	0.5244	0.4745	0.2500	
Maderable x Densidad población del sombrío	0.5312	0.5157	0.7989	0.7768	0.6645	

\* Diferencias significativa (P<0.05).

Al realizar la prueba de medias para las variables de cosecha del plátano, se logró establecer, que hubo un efecto de la densidad de siembra del maderable, sobre el comportamiento productivo del plátano. Como se observa en la Tabla 2-5, en alta densidad de siembra de maderables, el peso total del racimo estuvo en 13.427 kg, frente a 15.313 kg en baja densidad de maderables, lo que indica que tuvo un efecto benéfico sobre el llenado del racimo, indicando que la luminosidad, favorece en este caso, los rendimientos de la cosecha. Para el número de manos, también hubo un efecto

positivo en su cantidad, y como se aprecia en la Tabla 2-4, el número de manos fue de 5.772 en surco doble y 6.761 en surco sencillo.

**Tabla 2-5** Prueba de medias de las variables de cosecha de plátano: Peso racimo, peso vástago, peso real, N° manos, peso total (1° y 2°), porcentajes plátano 1°, 2° y vástago. con densidad de sombrío SD y SS, en las condiciones del bs-T, estación Agraria Cotové. 2011- 2013

Densidad de sombrío	Medias para Variables de cosecha			
	Peso racimo (kg)	Peso vástago (kg)	Peso real (kg)	N° manos (unidades)
Surco Doble	13.427	1.309	12.118	5.772
Surco Sencillo	15.313	1.476	13.837	6.761

Densidad de sombrío	Medias para Variables de cosecha			
	Peso total 1° y 2° (kg)	Porcentaje (%)		
		Plátano de 1°	Plátano de 2°	Vástago
Surco Doble	23.326	57.543	33.351	9.106
Surco Sencillo	26.854	57.005	33.993	9.001

Para el porcentaje de plátano de primera y de segunda, no hubo diferencias en ambas densidades de siembra, presentándose un promedio de 57 % en plátano de primera, y 33 % en plátano de segunda. (Tabla 2-5).

#### 2.3.4. Volumen de madera para la especie melina

Al realizar la Prueba de Tukey, con un valor de significancia de Alpha= 0.05, se encontró diferencia significativa para la interacción volumen y la edad de la melina, donde se obtuvo una  $P < .0001$ , por lo cual se realizó una prueba de medias para todas las edades, así:

No hubo diferencias significativas entre la acumulación de madera de melina entre las edades, 12, 15, y 24 meses; con divergencias estadísticas entre 24 y 36 meses de edad; sin diferencia significativa entre los 36 y 48 meses de edad, aunque el promedio a los 48 meses, dos veces mayor ( $0.525 \text{ m}^3$ ) que a los 36 meses ( $0.287 \text{ m}^3$ ) (Tabla 2-6).

**Tabla 2-6** Efecto de la edad para la Acumulación de madera de melina en m<sup>3</sup>, conforme a las diferentes edades, en el bs-T de la Estación Agraria Cotové. 2010-2013.

Edad melina (meses)	Volumen (m <sup>3</sup> )
12	0.079752566 ± 0.02710097 a
15	0.069571924 ± 0.02617777 a
24	0.095854339 ± 0.02947113 a
36	0.287372122 ± 0.11835704 b
48	0.525786336 ± 0.29237203 b

Promedios ± desviación estándar. Las medias de una columna seguidas con letras iguales no difieren estadísticamente mediante prueba Tukey (P =0.05).

### 2.3.5 Modelo ajustado para el volumen, de melina

Mediante el modelo de Gompertz, se ajustó el volumen, y se obtuvieron las tasas de acumulación de madera en el tiempo. De esta manera, con los datos obtenidos en campo, se ajustó el volumen de madera, con base en el modelo de Gompertz, según Ecuación 9, y como se puede observar gráficamente en la Figura 2.2

#### Ecuación 9. Modelo de Gompertz para volumen de melina

$$y = e^{a-be^{-ct}}$$

*Dónde:*

- y:* Lectura en m<sup>3</sup> del volumen de madera  
*a, b y c:* Parámetros del modelo.  
*t:* Tiempo en meses.  
*e:* Base del logaritmo neperiano (2.7182...).

Asimismo, se presentan en la Tabla 2-7, los parámetros estimados del modelo para el volumen de madera de melina

**Tabla 2-7** Parámetros del modelo de Gompertz para el volumen de melina, conforme a las distintas edades, durante la etapa juvenil del SAF cacao en las condiciones del bs-T. Estación Agraria Cotové. 2011- 2013.

Parámetro est.	Volumen (m <sup>3</sup> )
a	2,885309
b	2.316372
c	0.009965

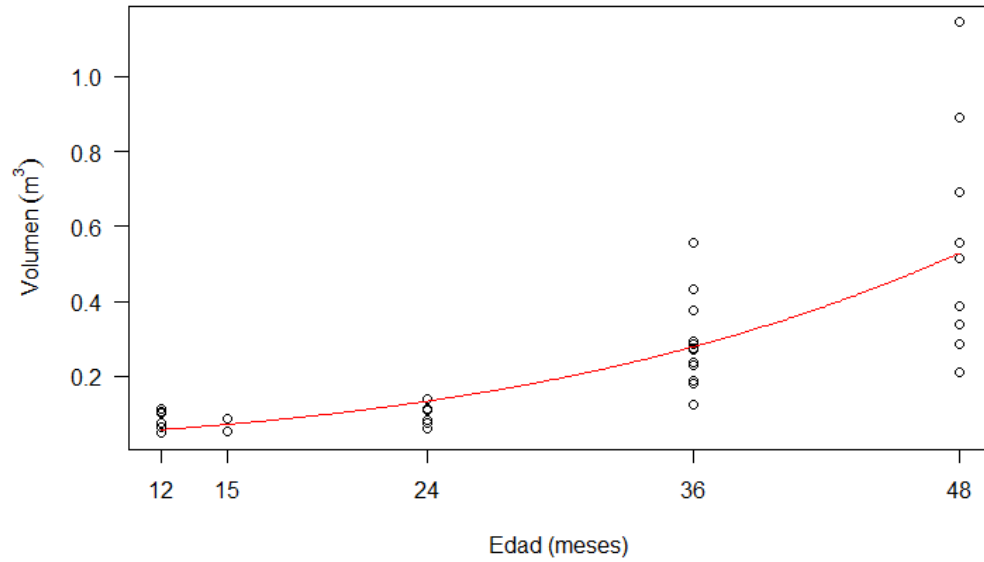
Las tasas de crecimiento instantáneas se obtuvieron con base en la primera derivada del modelo, con respecto al tiempo, así:

$$\frac{dy}{dt} = bce^{a-be^{-ct}-ct}$$

De esta manera, se pudo calcular dichas tasas de acumulación para cualquier tiempo. En consecuencia, con la ecuación de Gompertz, se obtuvieron las velocidades de crecimiento para el volumen de madera (Tabla 2-8). La tasa de acumulación tuvo un aumento en el transcurso de las diferentes edades, aunque tuvo valores muy similares, se aprecia como la acumulación de madera con el tiempo, se hace más notoria. Gráficamente, se puede observar en la Figura 2.2, como la curva de acumulación presenta una concavidad, que indica el aumento de tasa de acumulación, como se mencionó anteriormente.

**Tabla 2- 8** Tasas de acumulación de madera de melina en m<sup>3</sup>, conforme a las diferentes edades en el bs-T. Estación agraria Cotové 2011- 2013

Edad melina	Tasa acumulación de madera (m <sup>3</sup> )
12	0.046970015
18	0.049849292
24	0.052540071
30	0.05501615
36	0.057256128
42	0.059243516
48	0.060966686



**Figura 2.2.** Volumen de madera para la especie melina ( $m^3$ ), conforme a las diferentes edades de la plantación en las condiciones del bs-T, de la Estación Agraria Cotové 2010-2013

El árbol de melina, presenta un aumento de madera, paulatino en el tiempo, de tal manera que al inicio se hace en forma constante, alcanzando a los 12 meses de edad un volumen de  $0.0469 m^3$ , a los 24 meses  $0.052 m^3$  y a los 48 meses  $0.061 m^3$  (Tabla 2-8). Esto demuestra las grandes bondades que muestra a futuro la plantación del SAF, donde sin duda la venta de la madera, representaría el ahorro para el productor.

## 2.4. Discusión

Un individuo de melina acumula en un período de 48 meses una fitomasa de 402,068 kg, mientras que una planta de plátano acumula al año 5.864 kg de masa seca, y un árbol de cacao 2.979 kg de biomasa en 48 meses. Esto indica las bondades que presentan los asociados con árboles maderables, que tienen ventajas a lo largo de todo el ciclo productivo de la especie agrícola.

Los cacaotales estudiados por Figueroa *et al.* (2013) almacenaron 28.8 y 33.6 t C ha<sup>-1</sup> en biomasa arriba del suelo a los 18 y 35 años, respectivamente, que arrojaron una tasa de fijación promedio de 1.1 t C ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>; es decir 0.5 toneladas de biomasa; comparando con esta investigación, el promedio acumulado de una hectárea de cacao, dio como resultado 3.0 toneladas de fitomasa a los 48 meses, indicando un promedio por año de 0.75 toneladas de biomasa, lo que se asemeja a los resultados de Figueroa, 2013. Plantaciones en monocultivo de *Gmelina arborea* y *Albizia lebbek* con 5 y 3 años de edad almacenaron 13.9 y 9.8 Mg C. ha.año<sup>-1</sup> (Lugo *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 1991). (Douterlungne *et al.*, 2013), es decir 6.95 toneladas de biomasa de melina; para esta investigación se tuvo a los 48 meses de edad, 13.911 toneladas de biomasa, cifra superior, que indica que la melina podría tener mejor comportamiento en sistemas integrados que en monocultivo.

Los beneficios con los SAF, son más ventajosos que los que se presentan en los monocultivos; en el SAF cacao, se obtuvo 11.195 Mg C. ha<sup>-1</sup> a los 12 meses, a los 24 meses 25.973 Mg C. ha<sup>-1</sup> a los 36 meses 44.748 Mg C. ha<sup>-1</sup> (Tabla 2-2), cifra muy superior a lo reportado por Douterlungne *et al.* (2013), que muestran que durante los dos primeros años de crecimiento, plantaciones mono específicas de *Guazuma* y *Trichospermum* acumularon en su biomasa aérea 12.0 y 11.9 Mg C. ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.

En comparación con los estudios hechos por Montagnini y Porras (1998) registraron en Costa Rica entre 0.28 y 6.82 Mg C.ha.año<sup>-1</sup> en monocultivos de cuatro especies, con densidad de 1100 árboles.ha<sup>-1</sup>, después de tres años de edad. Plantaciones en monocultivo de *Gmelina arborea* y *Albizia Lebbek* con 5 y 3 años de edad almacenaron 13.9 y 9.8 Mg C ha/año (Lugo *et al.*, 1988; Wang *et al.*, 1991). (Douterlungne *et al.*, 2013)

## Conclusiones

- El SAF con cacao con alta densidad de siembra de melina, alcanzó una biomasa total de  $148286.147 \text{ kg ha}^{-1}$ ; es decir 148 toneladas aproximadamente de materia seca, a los 48 meses de edad.
- La especie con mayor contribución a la biomasa fue melina, la cual mantuvo en todas las edades mayor porcentaje de acumulación de materia seca.
- El promedio acumulado de una hectárea de cacao, dio como resultado 3.0 toneladas de fitomasa a los 48 meses.
- Para el SAF cacao, se obtuvo  $11.195 \text{ Mg C ha}^{-1}$  a los 12 meses, a los 24 meses  $25.973 \text{ Mg C ha}^{-1}$ ; a los 36 meses  $44.748 \text{ Mg C ha}^{-1}$
- En alta densidad de siembra de maderables, el peso total del racimo estuvo en 13.427 kg, frente a 15.313 kg en baja densidad de maderables, lo que indica que tuvo un efecto benéfico sobre el llenado del racimo, indicando que la luminosidad, favorece en este caso, los rendimientos de la cosecha.
- El volumen de madera de melina, tuvo un promedio a los 48 meses, dos veces mayor ( $0.525 \text{ m}^3$ ) que a los 36 meses ( $0.287 \text{ m}^3$ ).
- El aporte productivo de las especies involucradas en los SAF cacao, favorecen el entorno ambiental, con los servicios que presta, no sólo de productos cosechados, sino con el aporte de biomasa seca en el suelo, favoreciendo el aporte de materia orgánica, aumento de la biodiversidad, y aumento de las coberturas vegetales.
- Por su alta capacidad fotosintética, los SAF con cacao, son grandes sumideros de Carbono, la diversidad de especies en el mismo sitio, favorecen el paisaje y mejoran el hábitat para diversidad de especies tanto en fauna, como en flora.

## Bibliografía

Agus, Cahyono; Karyanto, Oka; Kita, Satoshi; Haibara, Kikuo; Toda, Hiroto. Sustainable site Productivity and Nutrient Management in a Short Rotation Plantation of *Gmelina arborea* in East Kalimantan, Indonesia. . Recent Advances with *Gmelina arborea* (eds. E.S:Dvorak, G. R. Hodge, W.C. Woodbridge and J.L, Romero). CD-ROM. CAMCORE, North Carolina State University, Raleigh, NC. USA. April 2003.

Andrade, Hernán J. ; Figueroa, Juliana; Silva, Doris P. Almacenamiento de Carbono en cacaotales (*Theobroma cacao L.*) en Armero-Guayabal (Tolima, Colombia). *Scientia Agroalimentaria* ISSN: 2339-4684 Vol. 1 (2013) 6-10.

Andrade, Hernán; J.E Ibrahim, Muhammad. ¿Cómo monitorear el secuestro de Carbono en los sistemas silvopastoriles? En: *Agroforestería de las Américas*. Turrialba, Vol. 10, N° 39-40, 2003; 109-116.

Anguiano, J. M.; Aguirre, J. y Palma, J. M. *Cunningham* y *Pennisetum purpureum*. Cuba CT-115. *Avances en Investigación Agropecuaria* 149 Aia. 2013. 17(1): 149-160 ISSN 0188789.

Apple, M. E.; Olszyk D. M., Ormrod D. P., Lewis J., Southworth D. and Tingey D. T. Morphology and Stomatal Function of Douglas fir Needles Exposed to Climate Change: Elevated CO<sub>2</sub> and Temperature. *International Journal of Plant Sciences* **161**(1), 2000. p.p 127-132.

Aránzazu, H. L. F. Evaluación de Híbridos y Clones de cacao en rendimiento y Calidad para la Zona marginal Baja Cafetera bajo Sistema Agroforestal. Convenio CORPOICA CASA LUKER. Manizales. Colombia.. 2003 82 p.

Aranzazu, F.; N. Martínez, G. Palencia, R. Coronado y D. Rincón. 2009. Cacao: Manejo del recurso genético para incrementar la producción y productividad del sistema de cacao en Colombia. Unión temporal cacao de Colombia uno. Fedecacao, Corpoica. 128 p.

Ariza, A. 2006. El cacao en cifras. Federación Nacional de Cacaoteros. Fedecacao. Bogotá. 34 p

Aristizábal L, Manuel. Evaluación del crecimiento y desarrollo foliar del plátano hondureño enano (*Musa AAB*) en una región cafetera colombiana. *Agron.* 16(2): 23 - 30, ISSN 0568-3076 2008; artículo aprobado: 4 de junio de 2010

Aristizábal L, Manuel; Jaramillo G, Carolina. Identificación y descripción de las etapas de crecimiento del plátano dominico hartón (*Musa AAB*) ISSN 0568-3076 *Agron.* 18 (1): 29 - 40, 2010; artículo aprobado: 5 de febrero de 2010.

Battaglia, M., Sands, P., White, D. and Mummery, D.. Cabala: a linked carbon, water and nitrogen model of forest growth for Silvicultural decision support. *Forest Ecology and Management.* **193**: 2004 251–282 pp.

Batista, L. 2009. Guía técnica. El cultivo de Cacao. Centro para el Desarrollo Agropecuario y Forestal, Inc. (CEDAF). Santo Domingo, República Dominicana. 250 p.

Beer, J. *Theobroma cacao*. Un cultivo agroforestal. En: *Revista, Agroforestería en las Américas*, Vol.6. No.22.. (CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999 p. 4.

Beer, J.; Harvey, c.; Ibrahim, m.; Harmand, J.; Somarriba, E. y Jiménez, F. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. En: *Revista, Agroforestería en las Américas*, Vol.10. No.37-28. (CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 2003. 8 páginas

Dávila Romero, Héctor Alfredo. Estimación de la cantidad de carbono almacenado en los sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* l.), en los departamentos de Suchitepquez y retalhuleu del sur-occidente de Guatemala. Universidad de san Carlos de Guatemala facultad de agronomía área integrada. Guatemala, noviembre del 2011.

Daymond, A. J.; Hadley, P.; Machado, R. C.R.; NG, E. An investigation of physiological parameter underlying yield variation in cocoa. In: 13 th International Cocoa Research Conference. Kota Kinabalu, Sabah, Malaysia. Proceedings in CD.2000 pp331-340

Dixon, Robert, K. Sistemas Agroforestales y gases invernadero. En: Agroforestería en las Américas. Turrialba, Vol. 2. no. 7, 1995; 22-26.

Douterlungne, David; Herrera-Gorocica, Angel M; Ferguson, Bruce G.; Siddique, Ilyas; Soto-Pinto, Lorena. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono de cuatro especies leñosas neotropicales con potencial para la restauración. Publicado como artículo en *Agrociencia* 47: 385-397. 2013. *Agrociencia*, 16 de mayo - 30 de junio, 2013

Duguma, B.; Gockowski, J. y Bakala, J. Desafíos biofísicos y oportunidades para el cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales de Africa Occidental y Central. En: Revista, *Agroforestería en las Américas*, Vol.6. No22. 1999. (CATIE) Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999. p. 7-10.

DNP. 2012. Superficie total y aprovechamiento de la tierra 2008. En: Anuario estadístico del sector agropecuario. Departamento Nacional de Planeación-DNP y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá, Colombia. Disponible en: [www.dnp.gov.co](http://www.dnp.gov.co), consulta: mayo de 2012.

Espinal, C., H. Martínez y L. Ortiz. 2005. La cadena del cacao en Colombia. Una mirada global de su estructura y dinámica 1991-2005. Documento de trabajo N° 58. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Observatorio Agrocadenas Colombia e Instituto Interamericano de Cooperación Agropecuaria-IICA. Colombia. 51p.

Espinal, L. S. Geografía ecológica del departamento de Antioquia. En: Revista de la Facultad Nacional de Agronomía, 38 (1) 1985. p. 24-39.

Espinal, L.S. & Montenegro, E. Formaciones vegetales de Colombia. Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, 1977 p201.

Etter, A. Diversidad ecosistémica en Colombia hoy. En: Nuestra diversidad biótica. CEREC y Fundación Alejandro Ángel Escobar. 1993. p. 43-61

Fageira, N. K., Baligar, V. C., Clark, R. B. Photosynthesis and crop yield. En: Physiology of crop production. New York. The Haworth Press. 2006. p. 95-115.

Fassbender, H.W., Alpizar, L., Heuvelop, I., FIJLSTER, H. AND ENRIUEZ, G., Modelling agroforestry systems of cacao (*Theobroma cacao*) with laurel (*Cordia alliodora*) and poro (*Erythrina poeppigiana*) in Costa Rica. III. Cycles of organic matter and nutrients. *Agrofor. System.*, 1988. 6: 49-62.

FEDECACAO, Guía técnica para el cultivo del cacao. Suministros y ediciones LCBLTDA, Bogotá. 2006 p.187

FUNDACIÓN HONDUREÑA DE INVESTIGACIÓN AGRÍCOLA (FHIA), Guía técnica cultivo de cacao bajo sombra de maderables o frutales. La Lima, Cortés, Honduras. Mayo de 2004

ICRAF. Paths to prosperity through agroforestry. ICRAF's corporate strategy, 2001-. Nairobi: International Centre for Research in Agroforestry. 2002

IPCC.; Climate change and biodiversity. A report of Working Group II of the International Panel on Climate Change. 2002

INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT, IAVH. Exploración ecológica a los Fragmentos de bosque seco en el Valle del Río Magdalena (Norte del Departamento del Tolima). Grupo de Exploraciones Ecológicas Rápidas, IAVH, Villa de Leyva. 1995. p. 56

INSTITUTO ALEXANDER VON HUMBOLDT, IAVH. Caracterización ecológica de Bosque seco Tropical de la región Caribe colombiana. Grupo de Exploraciones Ecológicas Rápidas, IAVH, Villa de Leyva. 1997. p. 76

King, D. A. . Linking tree form, allocation and growth with an allometrically explicit model. *Ecological Modelling*. **185**: 200577–91 pp.

Kiviste, A., J. G. Álvarez, A. Rojo & A. D. RUÍZ. Funciones de crecimiento de aplicación en el ámbito forestal. INIA. Madrid. 2002. 125 p.

- Kumar, N., Krishna Moorthy, V., Nalina, L. & Soriana Thasundharam, K. Nuevo factor para estimar el área foliar total en banano. *Infomusa*, 11 (2): 42. 2002. Kumar, D. and L. Tieszen. 1980. Photosynthesis in *Coffea arabica*. II. Effects of water stress. *Exp. Agr.* 6: 21-27.
- Leakey, R. Reconsiderando la definición de Agroforestería. En: Revista, Agroforestería en las Américas, Vol.5.. (CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1998. p. sin página.
- Mac Dougall, A. and Kellman M. 1992. The understory light regime and patterns of tree seedlings in tropical riparian forest patches *Journal of Biogeography* 19(6), 667-675.
- Martínez, H. And Bonnemann, A., La agroforestería en América Central. *El Chasqui*, 1990 22: 1-3.
- Martínez, Percy; Solignac, Jorge; Zárate, Ricardo; Achín, Lizardo F; Maco, José t; Jarama, Anita Rocío. Estimación de la biomasa con relaciones alométricas en dos especies de frutales: *Theobroma cacao* L. (cacao) y *Theobroma grandiflorum* (willd. ex spreng.) k. schum. (Copoazú) Instituto de investigaciones de la Amazonía peruana, *Folia amazónica*. Vol. 22 n° 1-2, 2013: 67 – 75 . Loreto, Perú 2013.
- Martínez, G.A. (1984). “Determinación del área foliar mínima en plátano en el trópico húmedo”. *Revista ICA*, 19(2):183-187.
- McNeill, J. *Something new under the sun: an environmental history of the twentieth century*. London: Penguin. 2000.
- Montagnini, F. and Jordan C.F.. *Tropical forest ecology: The basis for conservation and management*. Springer Verlag. Berlin. 2005 295 p.
- Muller, M. W; DE Almeida, C.M.V.C.; SENA-GOMES. A R 2003. *Sistemas Agroforestales con el cacao: Una alternativa para explotación sostenible de los biomas tropicales*. Seminario Internacional de Agroforestería con énfasis en cacao, Bucaramanga, Oct de 2003. Memorias en CD. 3pp.

Muschler, R.G, Bonnemann, A. Proyecto Agroforestal CATIE / G7Z, Apdo. 126, 7170 Curie, Costa Rica, 2004.

Murphy, P.G. & Lugo, A.E. Ecology of tropical dry forest. *Annals Review of Ecology and Systematic* 17 : 67-68 . 1986

Ortiz, Angela; Riascos, Lorena; Somarriba, Eduardo. Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*)  
Agroforestería en las Américas N° 46, Avances de Investigación 2008

Paredes. M. 2004. Manual del cultivo de cacao. Ministerio de Agricultura del Perú. Programa para el desarrollo de la Amazonia-Proamazonia. 83 p.

Peixoto, C. y M. Peixoto. 2009. Dinámica do crescimento vegetal: Principios básicos. En: Carvalho L. Tópicos em Ciências Agrárias. Universidad e Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. 1: 40-53.

Parrish, J.; Reitsma, R.; Greenberg, R.; Mclarney, W.; Mack, R Y Lynch, J. Los cacaos como herramienta para la conservación de la biodiversidad en corredores biológicos y zonas de amortiguamiento. En: Revista, Agroforestería en las Américas, Vol.6. No 22.(CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999. p. 16-19.

Perfecto, I., R. A. Rice, R. Greenberg, And M. E. Van Der Voort. Shade coffee: a disappearing refuge for biodiversity. *BioScience*46:598–608.1996

Pérez, Q. E.; Barreiro, M. Análisis del régimen de lluvia de la Estación Experimental “El Espinal”. Centro Cotové. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín.1986

Pinzón, J.; J. Rojas, F. Rojas, O. Ramírez, F. Moreno y G. Castro. 2012. Guía técnica para el cultivo del cacao. 5ta edición. Federación Nacional de Cacaoteros. Bogotá, 192 p.

Pizano, Camila; González, Roy; García Hernando. Bosques secos tropicales en Colombia 2014 Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt Colombia.

Ravindranth, N. H. and Oswald, M. Carbon inventory methods. Handbook for greenhouse gas inventory, carbon mitigation and roundwood production projects. Springer. Berlin. . 2008 315 p.

Rojas, F.; E. Sacristán y J. Peinado. 2009. Guía ambiental para el cultivo del cacao. Federación Nacional de Cacaoteros y Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Bogotá. 110 p.

Rojas, J. 2012. Actualidad del Cacao en Colombia, Federación Nacional de Cacaoteros-Fedecacao, Bucaramanga, Colombia. 33 p.

Somarriba, E ¿Cómo evaluar y mejorar el dosel de sombra en cacaotales? En: Revista, Agroforestería en las Américas No 41-42. 2004 (CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. . 2004. p.122.

Somarriba, E Y Beer, J. Sistemas agroforestales con cacao en Costa Rica y Panamá. En: Revista, Agroforestería en las Américas, Vol.6. No22. (CATIE) Centro agronómico tropical de investigación y enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 1999. p. 7-10.

Young, A. Agroforestry for soil management.UK: CAB International. Wallingford, 1997.