MODELOS ALOMÉTRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS DE GUADUA (*Guadua angustifolia* Kunth) EN EL CENTRO DE ESTUDIOS VEGETALES Y BIODIVERSIDAD ASOCIADA (CEVBA) VEREDA LA REJOYA, POPAYÁN, CAUCA.

JENNIFER LORENA LÓPEZ HOYOS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2023

MODELOS ALOMÉTRICOS PARA LA ESTIMACIÓN DE ATRIBUTOS DE GUADUA (*Guadua angustifolia* Kunth) EN EL CENTRO DE ESTUDIOS VEGETALES Y BIODIVERSIDAD ASOCIADA (CEVBA) VEREDA LA REJOYA, POPAYÁN, CAUCA.

JENNIFER LORENA LÓPEZ HOYOS

Trabajo de grado en la modalidad de Investigación para optar por el título de ingeniero forestal

Directores

M.Sc. Juan Carlos Villalba Malaver

M.Sc Román Ospina Montealegre

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA FORESTAL
POPAYÁN
2023

Nota de aceptación

Los Directores y los Jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por su autor y lo encuentran satisfactorio.

M. Sc. JUAN CARLOS VILLALBA MALAVER
Director

M. Sc. ROMÁN OSPINA MONTEALEGRE
Director

M.Sc. ASTRID YINNET ALVAREZ CASTRO
Presidenta del Jurado

M.Sc. ALEX ENRIQUE ORDOÑEZ HOYOS
Jurado

Popayán, 23 de enero de 2023

DEDICATORIA

A Dios, por darme el regalo inexplicable de la vida, quien además me premió con la fortuna de gozar de salud para poder enfrentar todas mis batallas, asimismo me brindó la sabiduría para cumplir con mis objetivos y como si fuera poco la fuerza necesaria para poder seguir soñando.

Para tí, quien creyó en esta epifanía y la convirtió en realidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme brindado una nueva luz en mi vida que me llena de esperanza ante el agobiante futuro.

A todas las personas que de manera indirecta o directa permitieron la ejecución de este trabajo.

“*Me enseñaron que el camino del progreso no es ni rápido ni fácil"*

Marie Curie

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo la evaluación de la estructura y la determinación de criterios silviculturales para el manejo sustentable de los guaduales *G. angustifolia* ubicados en el CEVBA, vereda de La Rejoya, Popayán, Cauca. Inicialmente se caracterizó la estructura de tres guaduales a partir de un censo de todos los culmos presentes, luego se seleccionaron 60 culmos en estado maduro para su aprovechamiento y medición directa de variables para la modelación alométrica. Se tomaron muestras para determinar el contenido de humedad y la densidad del material en laboratorio. Para construir los modelos, se determinó el volumen bajo el método de Smalian, empleando las variables diámetro a la altura del entrenudo, longitud del culmo, peso de la biomasa fresca y volumen. El censo determinó la presencia de 607 individuos, 70% en estado maduro, se encontró que el contenido de humedad fue de 43.06%, la densidad de 0,58g/cm^3. Las variables volumen y biomasa se relacionaron en función del diámetro a la altura del entrenudo. Las ecuaciones diámetro a la altura del entrenudo –longitud de culmo indicaron un R^2 de 0,45, la relación Biomasa- Área basal presento un R^2 de 0,10, mientras que el R^2 para la relación volumen– diámetro a la altura del entrenudo - longitud de culmo de 0,35. Mediante los resultados obtenidos será posible la determinación de parámetros difíciles de determinar mediante medición directa, por lo que podrán ser utilizados en futuros proyectos que busquen consolidar la cadena productiva de guadua en la región.

Palabras clave: biomasa, censos, culmo, análisis de regresión, silvicultura.

ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the structure and determine silvicultural criteria for the sustainable management of the *G. angustifolia* guaduals located in the CEVBA, La Rejoya, Popayán, Cauca. Initially, the structure of three guaduals was characterized from a census of all the culms present, then 60 mature culms were selected for harvesting and direct measurement of variables for subsequent modeling. Samples were taken to determine the moisture content and density of the material in the laboratory. To build the allometric models, the volume was determined under the Smalian method, using the variables diameter at internode height, culm length, fresh biomass weight and volume. The census determined the presence of 607 individuals, 70% in mature stage, the humidity content was 43.06%, the density was 0.58g/cm3. The volume and biomass variables were related as a function of diameter at internode height. The equations diameter at internode height - culm length indicated an R^2 of 0.45, the biomass-basal area relationship had an R^2 of 0.10, while the R^2 for the volume- diameter at internode height - culm length relationship was 0.35. By means of the results obtained, it will be possible to determine parameters that are difficult to determine by direct measurement, so they can be used in future projects that seek to consolidate the guadua production chain in the region.

Keywords: biomass, census, culm, regression analysis, silviculture.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 15

1. MARCO REFERENCIAL 17

1.1 MARCO TEÓRICO 17

1.1.1 Guadua 17

1.1.2 Usos múltiples de la guadua 23

1.1.3. Plan de manejo y ordenación en guadua 24

1.1.4 Inventario en bosque de guadua. 25

1.1.5. Biomasa 27

1.1.6 Modelos alométricos 27

1.1.6.1 Regresión Estadística 28

1.1.6.2 Regresión lineal 29

1.1.6.3 Regresión no lineal 29

1.1.6.4 Regresión lineal múltiple 29

1.1.6.5 Evaluación de los modelos. 29

1.1.7. Criterios para seleccionar modelos 30

1.2 MARCO HISTÓRICO 31

2 METODOLOGÍA 34

2.1 LOCALIZACIÓN 34

2.2 CENSO GUADUAL 35

2.3 APROVECHAMIENTO DE CULMOS 35

2.4 DETERMINACIÓN DE BIOMASA 39

2.5 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....41

2.6 MODELOS ALOMÉTRICOS.....41

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....43

3.1 DIAGNOSTICO INICIAL.....43

3.2 CENSO DEL GUADUAL.....44

3.2.1 Estructura del guadual 44

3.2.2 Diámetro a la altura del entrenudo 46

3.2.3 Densidad.....47

3.3 CRITERIOS PARA LA COSECHA DE GUADUALES.....48

3.3.1 Disponibilidad actual 48

3.3.2 Intensidad de Cosecha 49

3.4. VOLUMEN (m^3/ha) 50

3.4.1 Volumen aparente.....51

3.4.2 Volumen interno.....51

3.4.3 Volumen neto.....51

3.4.4 Tabla del rodal 52

3.5 DETERMINACIÓN DE BIOMASA 52

3.5.1 Contenido de humedad.....52

3.5.2 Densidad básica. 54

3.5.3 Biomasa de culmo.....55

3.6 MODELOS ALOMÉTRICOS.....57

3.6.1 Ecuaciones DEAP y longitud del culmo.....57

3.6.2 Ecuaciones para estimación de Biomasa.....62

3.6.3 Ecuaciones Longitud – DAP para volumen. 65

4 CONCLUSIONES 69

5 RECOMENDACIONES.....71

BIBLIOGRAFÍA.....72

ANEXOS.....80

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tallo subterráneo y aéreo con parte del rizoma de *G. angustifolia* 18
Figura 2. Zonas del culmo o tallo aéreo de *G. angustifolia*. 19
Figura 3. Partes del culmo de *G. angustifolia*. 19
Figura 4. Estados de madurez del tallo (De izquierda a derecha: renuevo, verde, maduro, sobremaduro) 20
Figura 5. Rama lateral iniciando su desarrollo a partir de una yema en un culmo de *G. angustifolia.*.....21
Figura 6. Hojas de guadua (Caulinar y follaje).....21
Figura 7. Inflorescencia de *G. angustifolia*.....22
Figura 8. Frutos y semillas de *G. angustifolia*.....22
Figura 9. Usos múltiples de la guadua 24
Figura 10. Mapa de localización y levantamiento topográfico de guaduales.....34
Figura 11. Corte de culmos en guadual, descope y troceado descopado y trozado 36
Figura 12. Cálculo de volúmenes para guadua. 38
Figura 13. Preparación de probetas para pruebas de laboratorio.....39
Figura 14. Guaduales ubicados en el CEVBA.....43
Figura 15. Estructura de guaduales del CEVBA.....44
Figura 16. Diámetro a la altura del entrenudo de los guaduales del CEVBA 46
Figura 17. Histograma de frecuencias de clases diamétricas en bosques de guadua 47
Figura 18. Dispersión de puntos en modelos de regresión de DEAP – Longitud Total para culmos de Guadua angustifolia en el CEVBA, La Rejoya, Popayán.....59
Figura 19. Dispersión de puntos para los modelos de regresión de B – G y B – DEAP en *Guadua angustifolia,* CEVBA. 63
Figura 20. Nube de puntos para los modelos de regresión de V.A - DEAP y LT en Guadua angustifolia, CEVBA.....66
Figura 21. Dispersión de puntos para los modelos de regresión de VN - DEAP y LT en Guadua angustifolia, CEVBA La Rejoya, Popayán. 67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la guadua 17
Tabla 2. Variables para la determinación de biomasa. 37
Tabla 3. Modelos para cálculo de la longitud de los culmos de *G. angustifolia* a partir de su diámetro. 41
Tabla 4. Modelos para cálculo de la biomasa de los culmos de *G. angustifolia* a partir del área basal y DEAP. 42
Tabla 5. Modelos para calculo los volúmenes aparente y real de culmos de *G. angustifolia* a partir del DEAP y longitud. 42
Tabla 6. Estructura de guaduales del CEVBA 45
Tabla 7. Densidad de guaduales del CEVBA.....47
Tabla 8. Área basal de guaduales CEVBA 48
Tabla 9. Disponibilidad de guaduales del CEVBA.....49
Tabla 10. Cálculo de índice de cosecha guadual 1.....49
Tabla 11. Cálculo de índice de cosecha guadual 2.....49
Tabla 12. Cálculo de índice de cosecha guadual 3.....49
Tabla 13. Programación de futuras cosechas del CEVBA 50
Tabla 14. Medidas resumen volumen aparente 51
Tabla 15. Medidas resumen volumen interno 51
Tabla 16. Medidas resumen volumen neto 52
Tabla 17. Tabla del rodal de guadua del CEVBA.....52
Tabla 18. Contenido de humedad (%) para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA, La Rejoya. 53
Tabla 19. Resultados de ANOVA para Contenido de humedad.....53
Tabla 20. Resultados de prueba de Tukey Contenido de humedad.....53
Tabla 21. Medidas tendencia central y dispersión densidad 54
Tabla 22. ANOVA – Prueba de Tukey para densidad.....54
Tabla 23. Medidas tendencia central y dispersión biomasa 55
Tabla 24. ANOVA Biomasa 56
Tabla 25. Prueba de Tukey biomasa de culmo.....56
Tabla 26. Longitud Total y DEAP en *Guadua angustifolia,* CEVBA La Rejoya, Popayán.....57
Tabla 27. Modelos alometricos DEAP- Longitud en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán.....58
Tabla 28. Modelos empleados para evaluación de variables longitud-diámetro en *Guadua angustifolia,* CEVBA La Rejoya, Popayán.....61
Tabla 29. Medidas Resumen Biomasa y G en culmos de *Guadua angustifolia,* CEVBA La Rejoya, Popayán.....62
Tabla 30. Modelos alométricos B-G y B – DAP en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán. 62
Tabla 31. Medidas resumen para volumen neto y aparente en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán.....65
Tabla 32. Modelos empleados relación Volumen aparente - DAP y longitud en *Guadua angustifolia,* CEVBA La Rejoya, Popayán.....65

Tabla 33. Modelos empleados relación Volumen neto - DEAP y longitud en *Guadua angustifolia,* CEVBA La Rejoya, Popayán.....67

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Formato para recolección de información del inventario. 80

Anexo B. Formato para inventario destructivo de guadual 81

GLOSARIO

ÁREA BASAL: parámetro que determina la productividad y crecimiento de un individuo en un guadual

ALOMETRÍA: relación estadística a escala de una población entre dos características de tamaño de los individuos de dicha población.

APEO: talado o corte de árbol

CULMO: tallo o parte aérea emergente del rizoma de la planta de guadua

DENSIDAD: unidad que expresa el número de individuos que hay en un guadual y que brinda información acerca de las condiciones existentes.

DISPONIBILIDAD ACTUAL: número de culmos que pueden ser aprovechados en un momento determinado y se encuentran en estado maduro y sobremaduro

ENTRENUDO: sección intermedia ubicada entre dos nudos del culmo

ENTRESACA: practica silvicultural que consiste en el corte de algunos culmos seleccionados

FUTURA COSECHA: cantidad de culmos que se encuentran en estado verde o renuevo

GUADUA: especie de pasto gigante que pertenece a las monocotiledóneas

NUDO: lugar donde nacen las yemas apicales del talo

PAQUIMORFO: tipo de rizoma que tiene disposición de entrenudos cortos y gruesos

REGRESIÓN: técnica de análisis que calcula la relación estimada entre una variable dependiente y una o varias variables explicativas

RIZOMA: eje subterráneo que constituye el sistema radicular de la guadua

TOCÓN: parte residual de los culmos que queda después del apeo

TROZA: segmento del culmo

YEMA: parte activa de la planta que se ubica en la intersección de una hoja y tallo

INTRODUCCIÓN

La guadua es un producto forestal que ha sido utilizado de múltiples maneras tradicionalmente en Colombia, durante muchos años, culturalmente a esta especie se le atribuyó la protección de cauces naturales, por esta razón, se conservó empíricamente hasta la actualidad. *G. angustifolia*, tiene fácil adaptación a diferentes condiciones ambientales y tiene un crecimiento en altura de aproximadamente 10 cm diarios, fenómeno que no ocurre en ninguna otra especie vegetal y que la convierte en imprescindible ante los eventos actuales de cambio climático (Zaragoza*et al*., 2015).

A pesar del potencial de esta especie, solo se le ha dado importancia económica y social en Colombia recientemente, gracias a la gestión de las corporaciones autónomas regionales, en donde destaca el eje cafetero, lugar que ha desarrollado diferentes investigaciones y se logró implementar la cadena productiva desde hace 15 años aproximadamente, en contraste con la meseta de Popayán en donde no se ha desarrollado y tecnificado la cadena productiva, sin embargo, muchas familias se benefician económica y ambientalmente de este recurso forestal (Montealegre & Molina, 2016).

El manejo silvicultural de los bosques de guadua *Guadua angustifolia* en la meseta de Popayán requiere de herramientas técnicas para su manejo; las investigaciones en esta zona geográfica son escasas y tampoco se cuenta con información del estado y las características de los guaduales de la región. En este sentido, no existe un manejo silvicultural sustentable de los guaduales, debido a que no se cuenta con modelos predictivos de variables dendrométricas del culmo, con el fin de establecer las bases para la generación de información y para la toma de decisiones acertadas que conduzcan a la sustentabilidad y productividad adecuada de esta especie a largo plazo (Camargo *et al.,* 2010).

La Universidad del Cauca cuenta con área de bosque de guadua dentro de las instalaciones del CEVBA en donde se podrían realizar investigaciones, sin embargo, aún no se incorpora un espacio para desarrollar parte de la misión institucional de promover conocimiento técnico, con el fin de que los productores puedan utilizar herramientas metodológicas como inventarios y modelos matemáticos de referencia, con el propósito de generar ingresos económicos a partir del manejo óptimo de los bosques de guadua, lo cual podría ser una alternativa para las familias campesinas de la meseta de Popayán ante la actual crisis socio-económica que atraviesa el país debido a la pandemia del COVID-19 (Mejía & Moreno, 2013).

En este contexto, la Universidad del Cauca y la Facultad de Ciencias Agrarias cuentan con un amplio potencial para realizar estudios que generen bases técnicas que se ajusten a las condiciones agroclimáticas de la región; por lo anterior, este trabajo se desarrolló con el objetivo de evaluar la estructura y determinar parámetros silviculturales para el manejo sustentable de los guaduales *Guadua angustifolia* Kunth ubicados en el CEVBA, vereda la Rejoya, Popayán, Cauca, para ello se adelantó una carcaterización estructural de los tres guaduales, se determinó la biomasa de culmos y los modelos de regresión mediante las variables longitud, volumen y biomasa aérea para los bosques de *Guadua angustifolia*, con el fin de sentar las bases del manejo silvicultural de la guadua en esta región. Lo anterior permitirá obtener acceso a una fuente primaria de bajo costo, interacción

y sinergia entre los elementos productivos de las comunidades, con el fin de generar mayores flujos de caja a mediano y largo plazo, para obtener mayores fuentes de salida en la región mediante el uso silvícola, agronómico y aprovechamiento de esta especie (Gómez & Salamanca, 2015).

1. MARCO REFERENCIAL

1.1 MARCO TEÓRICO

1.1.1 Guadua *(Guadua angustifolia* Kunth*)*. La especie Guadua angustifolia Kunth (Guadua) pertenece al orden Poales, familia Poaceae y género Guadua (Tabla 1). Es uno de la bambúes económica y ecológicamente más importantes del mundo, tiene su hábitat natural en Colombia, Ecuador y Venezuela y ha sido introducido en otros países de Centroamérica, Europa y Asia (Araujo, 2015).

En 1820, el botánico alemán Carl Kunth Sigismund, constituyó este género usando el vocablo *guadua,* con el cual los indígenas de Colombia y Ecuador se referían a esta especie. Este género reúne aproximadamente 30 especies, dentro de las cuales *G. angustifolia* sobresale dentro del género por las condiciones mecánicas que posee y por ser de hábito perenne (Méndez, 2014). Posteriormente, Carl Sisismund Kuth (1821), describió y clasificó taxonómicamente la guadua de la manera como se muestra en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación taxonómica de la guadua

Item	Descripción
Division	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Poales
Familia	Poaceae
Subfamilia	Bambusoideae
Género	Guadua
Especie	*Guadua angustifolia*

La guadua se adapta a diversas condiciones del relieve colombiano desde los 700 - 2200 m.s.n.m, temperaturas entre 17°C – 26°C, precipitación desde 1800 – 2500 mm/año, humedad relativa del 75- 85%, con rangos óptimos de 1200 a 1500 msnm, temperaturas de 20 – 24 y precipitación de 2000 y humedad de 70% respectivamente, además crece en suelos derivados de cenizas volcánicas, ricos en materia orgánica, fértiles y húmedos (Jaramillo *et al*., 2004).

En Colombia*, Guadua angustifolia* Kunth se encuentra distribuida a lo largo de la cordillera central y zona céntrica del país, se calcula que existen cerca de 56000 hectáreas de bosque de guadua, la mayoría en forma de bosques naturales y cercanos a las riberas de los ríos. Sin embargo, de las 17 zonas plantadas que alcanzan 36.181 hectáreas, 31.286 hectáreas, se encuentran ubicadas en el eje cafetero, Tolima y Valle del Cauca (Castaño, 2004).

Actualmente no existe una base de datos acerca de la producción de guadua en departamentos que no hagan parte del Eje cafetero, según Espinoza (2003), Antioquia, Huila, Putumayo, Caquetá, Cundinamarca, Cauca y Nariño son los departamentos en donde se presentan grandes extensiones de cubiertas boscosas de guadua; sin embargo, no disponen de registros de información. En cuanto

al departamento del Cauca, se estima un área actual de 800 hectáreas (Montealegre & Molina, 2016).

1.1.1.1 Formas y estructuras de la guadua (*G. angustifolia* Kunth*).* Morfológicamente, en la G. *angustifolia* se distinguen las siguientes partes: raíz, rizoma o tallo subterráneo, tallo aéreo o culmo, ramas laterales, copa, yemas, hojas, flores y frutos Ramírez, (2017).

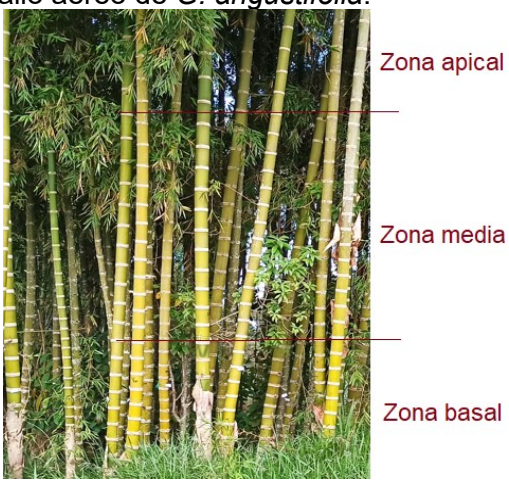
a. Raíz. Las raíces de la guadua se componen de raicillas dispuestas en los rizomas y cumplen con la función vital de absorber agua y nutrientes (Benítez, 2015).

b. Rizoma o tallo subterráneo. En *G.* angustifolia los rizomas son de tipo paquimorfo (Figura 1) con un patrón de ramificación simpodial debido a su forma gruesa y rellena, asimismo, tienen cuellos que alcanzan a medir hasta 1,5 metros de longitud, esta característica facilita las actividades de manejo como la selección de material y corte (Villegas, 2005).

c. Tallo aéreo o culmo. El tallo comúnmente visible y conocido como guadua se denomina culmo, dependiendo de las condiciones agroclimáticas, tarda de 4 a 6 meses en desarrollar la altura máxima, la cual puede ser de hasta 28 metros con diámetros de 18 cm. Según Ramírez, (2017), el culmo se divide en tres zonas: basal, medio y apical (Figura 2).

Figura 1. Tallo subterráneo y aéreo con parte del rizoma de *G. angustifolia*

Figura 2. Zonas del culmo o tallo aéreo de *G. angustifolia*.



El culmo tiene forma de cilindro y es hueco por dentro, además se encuentra seccionado en diferentes segmentos huecos que se denominan entrenudos (Figura 3), separados por nudos sólidos los cuales le confieren características mecánicas de alta rigidez, resistencia y flexibilidad (Benítez, 2015).

Figura 3. Partes del culmo de *G. angustifolia*.

El Centro de Investigación, Capacitación, Asesoría y Promoción (CICAP) (2008), Ramírez, (2017) y Schröder (2012) mencionan que la guadua a través del crecimiento cambia gradualmente de color en el exterior (Figura 4), lo que permite reconocer y clasificar los siguientes estados:

- **Renuevo/ Brote.** Inicia desde que emergen los tallos en los primeros meses de vida hasta que alcanza la máxima altura, presentan hojas caulinares que sirven de protección que generalmente son de color café. Este estado dura alrededor de 6 meses.

- **Joven/ Biche/ Verde**. Inicia tras el inicio de la caída de las hojas caulinares, aparecen las ramas y se forma el follaje que hace fotosíntesis; en este estado el culmo presenta un color verde intenso

y se hace evidente la presencia de los nudos. La duración de este estado puede ser de 6 a 15 meses.

- **Madura/Jecha.** En este estado los culmos cambian de color verde intenso a un verde opaco, también cambia a gris si hay presencia de musgos y líquenes en lugares con alta humedad relativa, es allí, cuando el tallo obtiene las condiciones fisicomecánicas más adecuadas para la cosecha. Este estado puede durar de 17 a 20 meses.

- **Sobremaduro.** Los culmos sobremaduros contienen una presencia muy alta de hongos, generando que el color tienda a ser amarillo, estos culmos también pueden ser aprovechados; sin embargo, las condiciones fisicomecánicas tienden a disminuir. La duración de este estado es de 60 a 88 meses

Algunos autores como Salas & Delgado (2006) manifiestan la existencia de un último estado conocido como seco, el cual va desde los 90 meses en adelante, durante esta etapa los culmos se tornan amarillos y generalmente están muertos, por lo cual comercialmente tienen costo muy bajo en el mercado al disminuir hasta el 80% de la resistencia debido a la baja o nula actividad fisiológica.

Figura 4. Estados de madurez del tallo (De izquierda a derecha: renuevo, verde, maduro, sobremaduro)

d. Yemas. Las yemas están presentes a lo largo del rizoma y el culmo, así como en las ramas; en el culmo se disponen de forma alterna, al ser cortada la yema del rizoma da origen a otro rizoma inmediatamente (Figura 5), las yemas también son las responsables del desarrollo de las inflorescencias y de la reproducción (Tosne, 2009).

e. Hojas: Son las encargadas de la realización del proceso fotosintético y tienen alto contenido de fibra, además cuando están secas son empleadas en labores agrícolas como tutorar cultivos de frijol, arveja, habichuela y tomate a pequeña escala, también para la fabricación de escobas, papel y paneles (Salas & Delgado, 2011).

Figura 5. Rama lateral iniciando su desarrollo a partir de una yema en un culmo de *G. angustifolia.*

La ramificación varía mucho durante los diferentes estados de madurez, sin embargo, la forma más típica de ramificación se observa en la parte media de los culmos adultos, en donde comienza el desprendimiento de las hojas caulinares y da paso a la formación de ramas básales y apicales, por activación de las yemas nodales (Londoño,2002)**.** A continuación, se describe los tipos de hojas presentes en *G. angustifolia.*

- **Hoja caulinar:** coriácea, de forma triangular, presenta vainas y láminas continuas, cubierta de tricomas o pelos urticantes de color café (Figura 6), poseen la lámina de menor tamaño que la vaina, en posición erecta, persistente y pubescente por ambas superficies, protegen el tallo durante el crecimiento inicial (Camacho & De la Cruz, 2016).

- **Hojas de follaje:** lámina foliar muy variable en tamaño y forma, puede ser oblonga hasta linear-lanceolada, con presencia de tricomas transparentes dispersos sobre el haz; son simples, lanceoladas y están dispuestas de manera alterna en las ramas (Figura 6), la longitud varía de 8 – 12 cm y el ancho entre 1,5 – 3,5 cm (Camacho & De la Cruz, 2016).

Figura 6. Hojas de guadua (Caulinar y follaje)

f. Inflorescencia. La guadua presenta floración esporádica, característica que le permite la sostenibilidad en el tiempo, las inflorescencias se disponen en forma de pseudoespiguilla (Figura 7),

de forma delgada y alargada, pueden medir hasta 9 cm de longitud, son escasas y nada vistosas, presentan ovario con tres estigmas de color púrpura y seis estambres (Villegas, 2005).

Figura 7. Inflorescencia de *G. angustifolia*

Fuente: inaturalist, Monsalve Ortiz, (2021).

g. Frutos y semillas. El fruto es una cariópside con pericarpio adherente en forma de espigas de color blanco/ amarillento (Figura 8). Las semillas se asemejan a los granos de arroz, tienen forma ovoide, son de color beige de un largo de 0,50 a 0,70 cm. La polinización y dispersión de la semilla es debido a la acción del viento; sin embargo, la reproducción por este medio es muy difícil debido al alto porcentaje de semillas infértiles (Clayton *et al*., 2012).

Figura 8. Frutos y semillas de *G. angustifolia*

Fuente: inaturalist, Monsalve Ortiz, (2021).

1.1.2 Usos múltiples de la guadua. Los bosques de *G. angustifolia* han sido una fuente importante de material para construcción para las comunidades a lo largo de la historia, especialmente para aquellas que viven en zonas rurales, el aprovechamiento de los guaduales constituye la base del sustento económico de muchas comunidades campesinas, afrodescendientes e indígenas del país, en el departamento del Cauca son muchos los escenarios en donde se accede a la Guadua como materia prima debido a las condiciones geográficas y sociales que presenta (Ramírez, 2017).

A la guadua se le atribuyen más de 1000 usos, desde la época precolombina, en donde destaca principalmente la construcción de caseríos (Figura 9), casonas comunitarias y actualmente viviendas, asimismo, se ha empleado para la elaboración de utensilios para el hogar, confección de diversos artículos para la agricultura y caza, en la elaboración de muebles, esterillas, puentes, herramientas, infraestructuras agrícolas, la fabricación de alcohol y de papel, pisos, aglomerados, también es empleada en otros sectores como la arquitectura, la agroindustria, paisajismo, el artesanal e industrial (Vásquez, 2020)

La guadua hace parte del arraigo musical de las comunidades latinoamericanas, debido a que se empleaba antiguamente para la creación de instrumentos musicales que se utilizan en fiestas tradicionales y en ceremonias religiosas, cabe mencionar que esta tradición continúa hasta la actualidad (Añazco 2013).

G. angustifolia, es un recurso natural renovable de gran beneficio ecológico debido a que ofrece servicios ecosistémicos, como la regulación de las fuentes hídricas, la fijación de carbono, control de erosión, también aporta materia orgánica y funciona como hábitat de una inmensa diversidad biológica, entre otros (Vásquez, 2020).

Es importante recalcar que esta especie tiene rápido crecimiento con respecto a otras especies forestales y se adapta a diferentes conficiones climáticas, asimismo, se ha reportado que la fijación de dióxido de carbono en los primeros seis años de crecimiento es de 54 toneladas/ha, convirtiéndola en un sumidero de carbono importante que podría brindar beneficios ecológicos ante el cambio climático, además de dar beneficios económicos para empresarios y agricultores (Méndez, 2014).

Se ha determinado que una hectárea de guadua puede almacenar hasta 30.000 litros de agua, lo cual ayudaría al abastecimiento de un promedio de 150 personas por día, razón por la cual la guadua es un recurso natural sostenible valioso. Además de lo anterior, los guaduales son fuente de albergue de fauna debido a sus características y la flora asociada, diversos estudios realizados en el Centro Nacional para el Estudio del Bambú-Guadua de la Corporación Autónoma Regional del Quindío, constataron la presencia de diversas clases de insectos, mamíferos, aves, reptiles y anfibios (Montealegre & Molina, 2016).

Figura 9. Usos múltiples de la guadua

1.1.3. Plan de manejo y ordenación en guadua. El plan de manejo en guadua se define como el conjunto de técnicas silviculturales que aplicadas a los bosques de guadua o plantaciones de guadua de forma periódica y secuencial incrementan significativamente la productividad de este recurso por área, asimismo, tiene como objetivo lograr una producción ecológicamente sostenida en el tiempo, satisfaciendo las necesidades sociales, ecológicas, económicas y ambientales de la región (Añazco, 2013).

Los planes de manejo en guadua se enfocan en plantear las actividades a realizar dentro del guadual, dependiendo del objetivo fijado, el cual puede ser de conservación o de aprovechamiento. Los planes de manejo y de aprovechamiento se enfocan principalmente en elaborar el plan de corte, el cual consiste en establecer la época adecuada de los periodos de corte, intensidad y periocidad (12, 18 o 24 meses), es importante recalcar que el porcentaje de intervención para la cosecha definido por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es máximo del 50% de los culmos en estado sobremaduro CARDER, (2003) citado por (Cardona, 2012).

El manejo silvicultural, permite que se realice un diagnóstico del estado actual del guadual (extensión, densidad, estado de madurez y estado fitosanitario), además, de promover la aparición permanente de nuevos rebrotes favoreciendo la regeneración natural, asimismo, permite una distribución adecuada de los espacios, contribuyendo a que haya mayor entrada de luz y por tanto regeneración natural y estimar la producción actual y futura del guadual con base en el registro de variables (longitud y diámetro) y el empleo de modelos matemáticos (Suarez, 2011).

G. angustifolia debe ser manejada de una manera sostenible, teniendo en cuenta el potencial productivo y su capacidad de recuperación donde se aproveche de forma selectiva los individuos que se encuentren en un estado más maduros con el fin de garantizar las futuras cosechas, por otra parte, para el desarrollo de estas labores se emplean actividades de forma cronológica (Vásquez, 2020), algunas de las más importantes son:

- Socola. Eliminación de la vegetación y/o individuos que crecen en estratos inferiores los cuales generan competencia por espacio y nutrientes.

- Desganche. Se trata de una entresaca selectiva en donde se eliminan todos los individuos no deseables con un diámetro determinado.

- Saneamiento. Eliminación de los culmos que no se encuentran en adecuadas condiciones fitosanitarias, así como los que están secos.

- Cosecha o aprovechamiento: conjunto de actividades que permiten la extracción de los productos forestales maderables y no maderables del bosque

Los planes de manejo en guadua se enfocan en plantear las actividades a realizar dentro del guadual, dependiendo del objetivo fijado, el cual puede ser de conservación o de aprovechamiento, en este orden de ideas, los planes de aprovechamiento se enfocan principalmente en elaborar el plan de corte, el cual consiste en establecer la época adecuada de los periodos de corte, intensidad y ciclo de corte (12, 18 o 24 meses), es importante recalcar que el porcentaje intervención para la cosecha máximo es del 50% en un periodo de 24 meses (Cardona, 2012).

Según Camargo *et al.,* (2007), el manejo de guadua es un proceso de planificación y debe contemplar mínimo tres aspectos:

a. *Estado actual del bosque:* diagnóstico del estado actual del guadual (extensión, densidad, estado de madurez y estado fitosanitario), potencialidad, ventajas y desventajas y servicios ambientales.

b. *Definir los objetivos del manejo*: conservación (promover la aparición permanente de nuevos rebrotes favoreciendo la regeneración natural) o aprovechamiento (se enfoca en el aprovechamiento en intensidad y ciclo de cosecha), además, se debe establecer el tiempo en el que se realizarán las actividades.

c. Formulación del plan de manejo: documentación acerca de las metas que se quieren lograr, que metodología se debe emplear y el tiempo estipulado para cada una.

1.1.4 Inventario en bosque de guadua. El inventario es el método de recolección y registro de los diferentes individuos que conforman un bosque, con el fin de de aportar la información acerca de la oferta actual y la capacidad de producción, sin embargo, cuando se cuentan con la posibilidad de medir e identificar cada uno de los individuos al 100% se denomina censo.

Según Camargo (2004), mediante los resultados que otorgan los inventarios, se puede planificar el proceso de cosecha dentro del guadual, en donde se involucra la estructura del guadual principalmente, la densidad y el área del guadual con el fin de determinar los siguientes parámetros:

Intensidad de cosecha: se refiere al porcentaje de individuos que se utilizarán para el corte dentro del guadual, de acuerdo con la estructura (renuevos, verdes, maduros y sobremaduros) que presente el ecosistema.
Ciclo de corta: tiempo y frecuencia en que se realizarán las intervenciones (cosechas) dentro del guadual durante un periodo, de acuerdo con los objetivos del manejo.

La cosecha, es la actividad que consiste en el aprovechamiento de los culmos, para el cálculo de la biomasa aérea es necesario realizar la cosecha para cuantificar la biomasa del culmo y la de las

ramas, con el fin de extrapolar los resultados a todo el ecosistema, se realiza cubicación de los culmos para tener mayor exactitud en los resultados (Camargo *et al*.,2008).

Según Camargo (2008), las variables más importantes para la recolección en inventarios en los guadales son:

1.1.4.1 Variables asociadas a los culmos

***Longitud del culmo* (m).** Definida como la distancia lineal entre la base y el ápice del culmo, mientras que la longitud comercial es desde la base hasta donde el culmo es comercialmente utilizable, García, (2004) estableció como valor promedio para el aprovechamiento una longitud de 14 metros.

***Diámetro a la altura del entrenudo* (m).** El diámetro es de gran importancia en los inventarios, debido a que aporta información acerca del tamaño de los culmos, área basal y volumen. La medición del diámetro se realiza a la altura de 1,30 metros desde el suelo, en la mitad del internudo a la altura del pecho con el fin de evitar error por el cambio de diámetro en los nudos.

***Espesor de la pared del culmo* (mm).** Es el ancho de la lámina de pared de los culmos, es utilizada como estándar de calidad y para las pruebas de tensión y resistencia de la guadua.

1.1.4.2 Variables de masa rodal y estructura de los rodales

***Densidad del rodal*.** Es el número de culmos en una unidad de área determinada, la cual puede variar de acuerdo con los patrones de crecimiento, condiciones agroclimáticas y el manejo, por otro lado, esta variable es utilizada para calcular el nivel de cosecha adecuado para el guadual.

***Estructura del rodal de guadua*.** Es la proporción en la que se encuentran distribuidos los diferentes estados de madurez (renuevos, verdes, maduros y sobremaduros) de los culmos pertenecientes al guadual en una zona determinada.

A partir de las variables anteriores se estiman los siguientes parámetros:

***Área basal* (G) (m^2).** Representa el espacio ocupado por cada individuo y la productividad de los bosques a partir del diámetro.

$$G = (DAP^2) * \frac{\pi}{4}$$

Volumen (m^3). Es la variable más utilizada para describir y cuantificar la productividad de los rodales, sin embargo, existen pocos estudios acerca de las estimaciones para guaduales, debido a

la estructura anatómica de la guadua, actualmente se conocen tres tipos de volumen para las especies de guadua.

- *Volumen aparente:* en donde se incluyen las secciones huecas y leñosas de la guadua.
- *Volumen interno:* donde no se incluyen las secciones huecas de la guadua (se tiene en cuenta el espesor de la pared del culmo).
- *Volumen neto:* es la diferencia entre el volumen aparente y neto.

1.1.5. Biomasa. De acuerdo con Lobovikov *et al*., (2007), la biomasa se define como la masa de los organismos o de un ecosistema forestal en un tiempo dado, la materia orgánica puede ser aérea o subterránea y puede estar viva o muerta, se utiliza la unidad de toneladas de materia seca por hectárea, por lo cual también se emplea el concepto de densidad de biomasa para referirse a esta variable.

En el proceso de la fotosíntesis las plantas captan energía lumínica y la transforman en energía química, sin embargo, los árboles en contraste con las especies anuales, quienes almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono dentro de las estructuras leñosas durante periodos largos, por lo cual son reservas naturales de carbono. Esta capacidad de almacenar carbono en forma de biomasa aérea es distinta en los ecosistemas, dependiendo de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato por comunidad vegetal (Acosta *et al,* 2002).

G. angustifolia, aporta en promedio, por individuo, una cantidad de 4,5 kg de biomasa a la edad de 7 años, de la cual el 75% se encuentra localizada en la biomasa aérea, correspondiente a las hojas, ramas y culmo, y puede aportar desde el 80,1 - 83% del total de la capacidad de fijación de carbono de la guadua (Camargo *et al,* 2010). Como se mencionó anteriormente, en el componente aéreo de los bosques es en donde se acumula mayor biomasa, por tal motivo es necesario realizar la cuantificación de la biomasa y para ello generalmente se realiza mediante el empleo de métodos destructivos directos o con el uso de modelos alométricos (Camargo *et al*.,2008).

1.1.6 Modelos alométricos. Mediante los principios básicos de la alometría se puede predecir las medidas de un árbol en función de otra medida, teniendo en cuenta que se define una ecuación alométrica como la fórmula que representa de forma cuantitativa dicha relación. En algunos casos estimaciones del material vegetal mediante inferencias, con este propósito se debe contar funciones matemáticas basadas en las relaciones alométricas que logren explicar las relaciones entre las variables (Camargo & Kleinn, 2010).

Las relaciones entre altura y diámetro en árboles se ajustan a modelos de funciones lineales, y no lineales, para el caso de la guadua, es importante considerar que debido a sus propiedades únicas es necesario la identificación de modelos que sean acordes a sus características (Picard *et al*.,2012). En el caso de la guadua, Camargo (2008), señala que mediante el uso de modelos matemáticos de regresión a partir del diámetro se puede predecir la longitud del culmo, debido a que los culmos de esta especie cuentan con diámetro y altura relativamente similar en el mismo guadual.

Existen relaciones entre el diámetro del culmo y longitud con el volumen, para lo cual es imprescindible la toma de muestras con el fin de obtener información acerca de la longitud. Los

modelos de volumen tienen mayor certeza, porque se tiene en cuenta la variable longitud para poder tener información más verídica, razón por la cual es importante realizar el aprovechamiento de los culmos (Sharma *et al.,* 2002).

El uso de estos modelos permite que se conozcan las condiciones de los guaduales, su dinámica, los servicios ecosistémicos y bienes que brindan, sin necesidad de realizar mediciones directas difíciles de realizar, con el fin de llevar a una toma de decisiones adecuada para poder manejarlo y conservarlo de manera sostenible durante el tiempo (Viáfara, 2013).

1.1.6.1 Regresión Estadística. Es el procedimiento estadístico que permite establecer la relación funcional o ecuación matemática que representa la relación entre las variables y la fuerza de dicha relación, Sir Francis Galton introdujo este término de regresión en 1877 (Cardona *et al*., 2013). Dentro de la terminología de este procedimiento, la variable dependiente (respuesta) es predicha por la variable independiente (explicativa), existen tres posibles formas en que las variables se relacionan: positiva, negativa y no se encuentra relación (Novales, 2010).

Según Peláez (2016) y Rodríguez & Mora (2001) existen algunos parámetros que se deben tener en cuenta dentro de la regresión:
Coeficiente de regresión: es la forma en que se mide el grado, afectación o fuerza que existe entre dos variables, es decir cuánto se afecta la variable "Y" por cada unidad en que cambie la variable "X", puede darse que:

Si $b_{X/Y} = 0$, para cualquier valor de X la variable Y es constante
Si $b_{X/Y} > 0$, las variables $X\ y\ Y$ aumentan directamente
Si $b_{X/Y} < 0$, las variables $X\ y\ Y$ tienen relación indirecta

Coeficiente de determinación(R^2): es la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión, midiendo la proximidad de la recta ajustada a los valores observados de Y, reflejando la bondad del ajuste de un modelo a la variable que pretender explicar. Estos valores varían de 0 – 1, donde más cercano esté de 1, más preciso y ajustado será el modelo.

Coeficiente de correlación (r): se emplea para describir que tanto puede explicar una variable de la otra. Este coeficiente se usa para modelos lineales y en relaciones con dos o más variables independientes. Los valores varían entre [-1,1], de la siguiente forma:

Si $r = 0$, las variables son independientes
Si $r > 0$, existe una relación directa entre las variables
Si $r < 0$, la correlación entre las variables es inversa

1.1.6.2 Regresión lineal. Es una técnica estadística empleada para el estudio de la relación entre variables aleatorias, caracterizada porque solo se encuentran dos variables: una independiente "x" y una dependiente "y", y en la gráfica de dispersión muestra que su relación se puede ajustar por medio de una recta, representada por $y = b_0 + b_1 x$, donde b_1 es la "pendiente" de la recta, y representa qué tanto cambia la variable dependiente por cada unidad de incremento de la variable independiente, estos modelos se ajustan mediante el método de mínimos cuadrados ordinarios (Cancino, 2012).

1.1.6.3 Regresión no lineal. Un modelo de regresión no lineal es una ecuación que describe la relación no lineal entre la variable respuesta y la variable predictora cuando los datos no se ajustan a la ecuación de la recta, por lo cual se emplean otras relaciones como la exponencial, potencial, polinomial, logarítmica, entre muchas más, algunos modelos no lineales pueden linealizarse mediante el uso de logaritmos para facilitar el ajuste (Novales, 2016).

1.1.6.4 Regresión lineal múltiple. Técnica estadística que se encarga de analizar situaciones en el que el valor de la variable dependiente o respuesta (Y) se determina a partir de un conjunto de variables independientes llamadas predictores $(X_1, X_2, X_3 \ldots)$. Este método permite identificar cuáles de las variables independientes son las que pueden explicar una variable independiente, comprobar las causas y predecir de forma aproximada los valores, este modelo de regresión lineal múltiple puede ser descrito a partir de la siguiente ecuación: $Y = b_0 + \beta 1 X_1 + \beta 2 X_2 + \ldots + \beta n X_n + \varepsilon$ (Novales 2010).

1.1.6.5 Evaluación de los modelos. Las siguientes pruebas se realizan para que los modelos cumplan los supuestos:

ANOVA de la regresión: proporciona la variación de la variable dependiente con la varianza total del modelo.

Prueba t: el objetivo de la prueba es observar si se puede concluir que β≠0. Se usan los datos de la muestra para probar las siguientes hipótesis: $H0 : \beta = 0 \; Ha : \beta \neq 0$ Si se rechaza H0 la conclusión será que β≠0 y que hay una relación estadísticamente significativa entre las dos variables.

Valor F: mide la importancia estadística del modelo, valor F significativamente inferior a 0,05 se considera significativo. Un valor F inferior a 0,05 garantiza que los resultados del análisis de la encuesta no son al azar.

Valor P: tiene una gran importancia estadística, indicando lo relevante y estadísticamente significativo que es el efecto de la variable independiente o de que el modelo sea significativo si el valor es inferior a 0,05.

Normalidad de los residuos: los residuos se deben distribuir de forma normal con media cero. Para comprobarlo se recurre a histogramas, a los cuantiles normales o a test de hipótesis de normalidad, se utiliza la prueba de Shapiro Wilks.

Homocedasticidad: la varianza de los residuos debe de ser constante en todo el rango de observaciones. Para comprobarlo se representan los residuos. Si la varianza es constante, se distribuyen de forma aleatoria manteniendo una misma dispersión y sin ningún patrón específico. Se emplean varias pruebas, entre ellas la prueba de Breusch-Pagan.

Detección de observaciones influyentes: existen situaciones en las cuales una o más observaciones tienen una gran influencia sobre los resultados obtenidos. Una observación es influyente si tiene un impacto notable sobre los coeficientes de regresión ajustados porque "jalan" al modelo en su dirección. Se caracterizan por tener un valor moderadamente inusual tanto en las predictoras como en la respuesta (Gutiérrez & Lopera, 2002).

1.1.7. Criterios para seleccionar modelos

En la selección del mejor modelo pueden usarse varios criterios. Entre ellos destacan el coeficiente de regresión, el índice de Akaike, el criterio de información bayesiano, la desviación estándar de los residuos, el coeficiente de variación residual y el error estándar de estimación. Según Novales, (2010), al utilizar estos indicadores debe preferir aquel modelo que entregue el valor más favorable según el criterio aplicado. Lo contrario sucede cuando se usa el coeficiente de correlación simple, el coeficiente de correlación ajustado o el coeficiente de determinación, criterios que también pueden ser útiles para la selección de modelos. Algunos de los criterios mencionados se describen a continuación:

AIC: el índice de Akaike (*AIC: Akaike's Information Criterion*) es útil para la selección de modelos que varían en el número de parámetros. Si dos o más modelos se ajustan relativamente igual a la información existente, este criterio conducirá a la selección del modelo más simple.

BIC: el criterio de información bayesiano (*BIC: Bayesian's information criterion)* es una medida de bondad de ajuste de un modelo estadístico, y es a menudo utilizado como un criterio para para la selección de modelos entre un conjunto finito de modelos. Se basa en la función de probabilidad logarítmica (LLF) y está estrechamente relacionado con el criterio de información de Akaike.

RMSE: El error estándar múltiple (*RMSE: Root mean squared error*) de la estimación es la medida de la eficiencia de la ecuación de regresión.

1.2 MARCO HISTÓRICO

A continuación, se presentan algunos estudios realizados a nivel nacional e internacional sobre inventarios en guaduales y empleo de modelos matemáticos de Guadua.

Camargo *&* Kleinn (2010), estimaron tres modelos para la predicción de la longitud del culmo y dos para el volumen del culmo, mediante el ajuste de datos de 303 cañas de bambú guadua (*Guadua angustifolia* Kunth). Los datos de 101 parcelas de inventario temporal sistemáticamente distribuidos en la región cafetera de Colombia (1.029.525 ha). Se utilizaron modelos de regresión, y la precisión de los modelos se evaluaron mediante validación cruzada. Para la longitud del culmo, el mejor ajuste mostró modelos que incluían variables predictoras relacionadas con características del rodal como diámetro medio cuadrático y número de tallos por ha. Para la predicción del volumen del culmo, la inclusión de la longitud del culmo mejoró significativamente el modelo. Como resultados los modelos desarrollados son útiles para facilitar la estimación de las características de los rodales que son relevantes para el manejo silvícola de los rodales de Guadua y también para la evaluación de sus servicios ambientales.

Camargo *et al (*2010), evaluaron una plantación de guadua con una densidad 625 plántulas por hectárea, para determinar su patrón de crecimiento y su contribución al secuestro de carbono. El crecimiento fue evaluado anualmente durante siete años, teniendo en cuenta la emisión de nuevos culmos, la longitud y diámetro basal. Según los resultados para las tres variables fue posible ajustar modelos que las describen de forma adecuada en función del tiempo. Además, se ajustó un modelo lineal que explica la variabilidad de la longitud total del culmo en función de su diámetro basal. La plantación mostró la capacidad de fijación de 76 t CO_2/ha, en donde el 83% es albergado en la parte aérea. Lo anterior, resalta la capacidad de esta especie de fijar carbono y la posibilidad del uso comercial de los culmos, también como las plantaciones de guadua constituyen una importante opción productiva para regiones con condiciones biofísicas similares.

García *et al* (2015), determinaron que las ecuaciones alométricas estiman el peso seco de una planta (biomasa) partiendo de las características dasométricas fáciles de medir en campo. El objetivo de la investigación fue generar una ecuación alométrica para estimar la biomasa de *Guadua sarcocarpa,* de los bosques de la Comunidad Nativa Bufeo Pozo, en Ucayali. Para esto, se seleccionaron 28 individuos de *Guadua sarcocarpa*, de los cuales se obtuvo el peso seco. El diámetro (DC) y el largo (LC) del culmo y fueron empleados como variables independientes en la predicción de la biomasa. Los resultados muestran que el 68% de la biomasa pertenecía al tallo, el 16,4% a las ramas y 15,6% a las hojas. Para el cálculo de la biomasa se estimaron diversas ecuaciones en donde se encontró que la mejor se ajusta aquella que utiliza como variable predictora el diámetro del primer culmo (DC). La ecuación propuesta es la siguiente: $\text{Biomasa (kg)} = -3.614311904 + (2.558090732)\ \text{DC}$. ($r= 0.89$; $p < 0.05$).

Fonseca & Rojas (2016), estimaron la biomasa y el carbono acumulado en la biomasa vegetal y en suelo en rodales artificiales de *Dendrocalamus latiflorus*, *Guadua angustifolia* y *Guadua aculeata* y desarrollar modelos matemáticos para estimar la biomasa y el carbono. La biomasa se estimó por el método destructivo. La fracción de carbono promedio osciló de 43,3 a 47,2% entre los diferentes componentes (hojas, ramas, raíz y tronco) en un mismo culmo y de 36,4 a 46,7% en la vegetación herbácea, en la necromasa fina y gruesa. El porcentaje de carbono en el suelo fue de 2,45%. El carbono almacenado/ ha en plantaciones de *D. latiflorus* fue de 186,73 Mg ha-1 y de 117,74 Mg ha-

1 en *G. angustifolia* y *G. aculeata*. Los culmos representan más del 87% del carbono de la biomasa total. Los resultados indican que los modelos ensayados por componente del culmo y para el culmo completo no presentaron buenos ajustes y se desestimaron, mientras que los modelos agregados poseen R^2 superiores al 89% y bajos errores de estimación.

Ramírez (2017), realizó un estudio en dos fragmentos de bosque dominados por *Guadua angustifolia* Kunth pertenecientes a la cuenca media y baja del Río La Vieja ubicados en Risaralda y Quindío, con el propósito de conocer las características ecológicas mediante el estudio de las relaciones entre estructura del paisaje y su estructura florística. Los resultados arrojaron 172 especies pertenecientes a 54 familias. El 50 % de las familias fue representado por una especie, mientras que Araceae y Leguminosae fueron las familias de mayor riqueza taxonómica con 21 y 14 especies respectivamente. El índice de diversidad de Shannon fue más alto en los rodales 3 (3,798) y San Miguel (3,664), mientras que los valores más bajos se presentaron en el rodal 4 (3,167). El dendrograma del índice de similitud Euclidiano reportó que los rodales presentan una similitud por debajo de 0,65, asociada a las 35 especies reportadas en los siete rodales, lo anterior confirma que los bosques dominados por *Guadua angustifolia* se caracterizan por una composición florística variada, por lo que no deben ser vistos como unidades aisladas, sino como sitios inscritos en un variado paisaje a nivel regional.

Flores de Melo (2017), desarrolló ecuaciones alométricas para estimar la biomasa seca total por encima y por debajo del suelo para árboles y bambú, mediante la aplicación de estas ecuaciones en datos de inventario forestal y probar métodos de extrapolación de las estimaciones al paisaje a través de información de teledetección. Para ajustar las ecuaciones alométricas se utilizó el método compartimental directo en 206 individuos de bambú (*Guadua weberbaueri)*, subdivididos en biomasa subterránea (raíces) y aérea (tallos, ramas y hojas. Para determinar la biomasa forestal a partir de datos de teledetección, se probaron métodos y densidad de puntos LIDAR. Los resultados mostraron que los patrones alométricos para estimar la biomasa arbórea en el suroeste de la Amazonía son diferentes a los de otras regiones muestreadas en la Amazonía. Teniendo en cuenta la precisión, la practicidad y los costos, el uso de la ecuación de potencia simple que involucra solo el diámetro ($Árbol\ AGB = a\ D\ b$) presentó el mejor rendimiento para estimar la biomasa forestal, lo que sugiere que existen diferentes patrones alométricos entre las poblaciones de bambú en esta parte de la Amazonía.

Rawat *et al* (2018), desarrollaron ecuaciones alométricas para cinco especies de bambú *(Bambusa tulda, Dendrocalamus hamiltonii, Dendrocalamus longispathus, Melocanna baccifera, Schizostachyum dullooa*) con el fin de medir biomasa y las reservas de carbono de los culmos. Se diseñaron 33 parcelas de muestreo en el distrito de Mamit de Mizoram. Las parcelas de muestra, cada una con un área de 0,1 ha, se diseñaron para la recopilación de datos y parámetros como DEAP y altura. Los culmos se clasificaron en tres clases de diámetro. La biomasa se obtuvo con método seco para cada clase de diámetro, junto a un análisis de regresión para analizar la relación entre la biomasa del culmo con el DEAP y la altura usando el software STATISTICA versión 7.0. La máxima biomasa del culmo se encontró en *Dendrocalamus longispathus* (48,34 Mg/ha). De manera similar, la reserva de carbono de los culmos osciló entre 6,22 y 22,71 ton/ha. La reducción total de emisiones de dióxido de carbono del culmo osciló entre 22,89 y 83,40 tCO2eq. Los resultados de este estudio mostraron una fuerte relación entre la biomasa con el DEAP y la altura, que se mostraron como variables predictoras cruciales.

Forero *et al* (2018), estimaron la biomasa total y el almacenamiento y fijación de carbono en PF y SAF. La investigación se realizó en el Centro Universitario Regional del Norte (CURDN) de la Universidad del Tolima, ubicado en Armero-Guayabal, Tolima. Se estimó el almacenamiento y fijación de carbono en la biomasa aérea (BA) y abajo del suelo (BAS) en siete PF y en SAF. Se midió la altura total y el diámetro a la altura del pecho (DAP) de los árboles con dap > 10 cm y el D30 en las plantas de *Theobroma cacao* en parcelas temporales de muestreo de diferente tamaño. La BA se estimó con modelos alométricos. Las PF de entre 5 y 25 años almacenaron entre 18,6 y 64,4 Mg C ha-1; mientras que los SAF capturaron 85 Mg C ha-1 (10-15 años). La tasa de fijación de carbono promedio fue de 1,4 y 4,9 Mg C ha-1 año-1 para las PF y los SAF, respectivamente. Los resultados mostraron la importancia de estos sistemas como mitigadores del cambio climático y enfatiza las ventajas de involucrar SAF con leñosas perennes como sumidero de gran cantidad de carbono permitiendo a su vez, la producción agropecuaria.

Montealegre & Molina (2016), cuantificaron la biomasa aérea de la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth en el municipio de Pitalito, Huila utilizando medidas dasométricas a través del método destructivo, para lo cual se seleccionaron 120 rodales de los cuales se tomaron muestras húmedas (hojas, ramas, madera) de 3 de culmos seleccionadas al azar por rodal, siguiendo rutas según la cobertura y extensión de la cuenca. Las muestras fueron llevadas a un proceso de secado con los cuales se realizó una serie de ecuaciones para determinar el contenido de humedad y el volumen de biomasa seca, determinándose promedios aproximados de 34% de contenido de humedad por guadua y 82 ton/ha de biomasa seca en área de estudio. A partir de estos resultados, se pueden proyectar trabajos de investigación con el fin de incluir a esta especie vegetal en estrategias de adaptación al cambio climático y de conservación de recursos naturales con el fin de motivar su comercio e industrialización en el mercado colombiano.

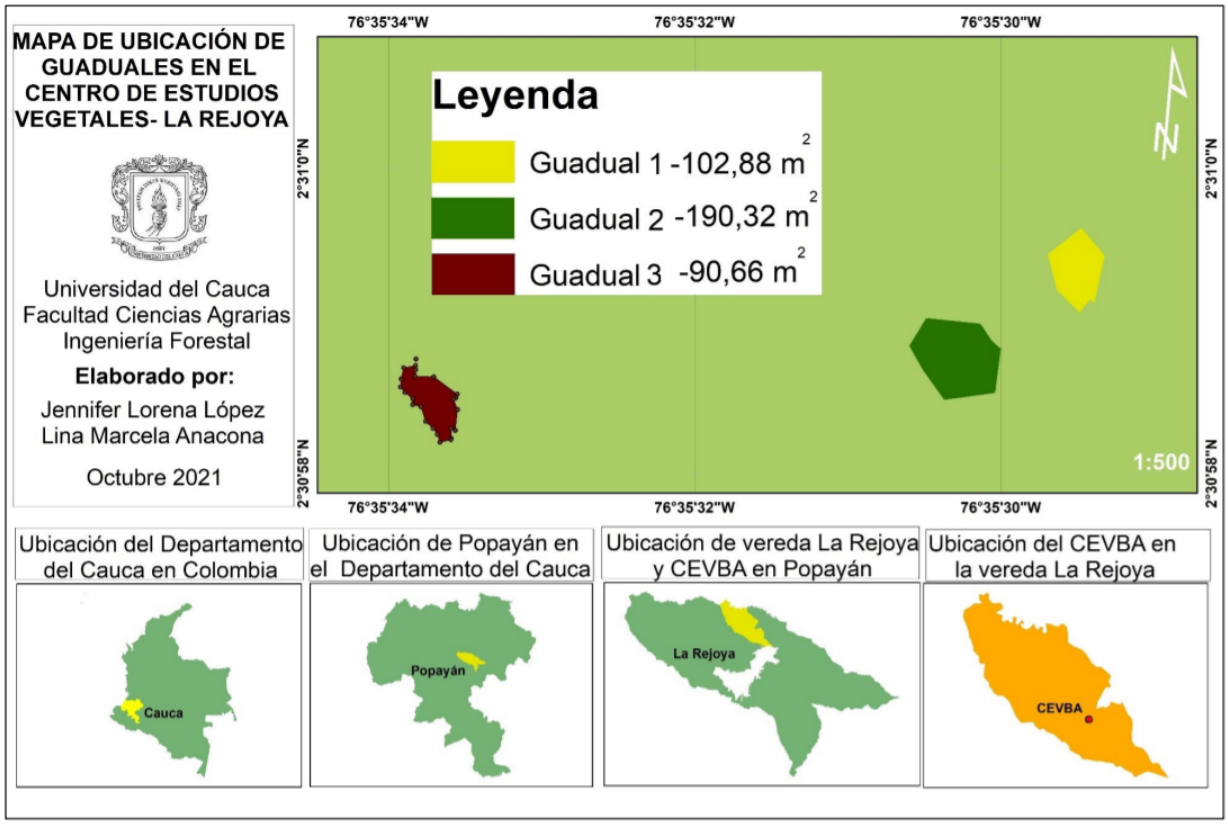
Briceño (2019), ajustó datos de campo a modelos no lineares con el fin de predecir el crecimiento y estimar la acumulación de biomasa en plantaciones de bambú bajo manejo en sitios productivos. La plantación ubicada en la comunidad de Rio Claro en el distrito de Guaycará, Puntarenas, Costa Rica. Cinco rodales fueron identificados para el estudio, con tres de ellos utilizados para la calibración y dos para la validación de modelos. Los datos de inventario se ajustaron mediante regresión no lineal a tres modelos de biomasa de bambú. Las variables predictivas utilizadas fueron diámetro, altura y área basal. La calidad de la predicción del modelo se probó mediante la prueba de Wilcoxon para muestras pareadas. Los resultados promedio obtenidos fueron 12,49, 12,82 y 12,9 Mg ha-1 de biomasa en los modelos Bm1, Bm2 y Bm3 respectivamente, son mayores a los encontrados por otros autores en bosques de bambú Moso en el sur de China donde encontraron 8,13 ± 2,15 Mg ha-1 Año-1. Aunque la comparación es con otra especie y la edad máxima es diferente de la plantación (5 años en Moso en comparación con 3 años) se puede sugerir que, al igual que en árboles, se espera un rango de biomasa según edad, manejo y dimensiones.

2 METODOLOGÍA

2.1 LOCALIZACIÓN

El estudio se realizó en el Centro de Estudios Vegetales y Biodiversidad Asociada (CEVBA), perteneciente a la Universidad del Cauca, ubicado en la vereda La Rejoya, municipio de Popayán, departamento del Cauca, con coordenadas geográficas 2°31'23'' N y 76°35'73'' W (Figura 10); según el sistema de zonas de vida el remanente de bosque se clasifica como húmedo premontano tropical (bh-P/T) (Holdridge, 1978) y selva subandina (Cuatrecasas, 1958), a una altitud de 1800 msnm. Los valores medios anuales de temperatura, precipitación y humedad relativa son 19 °C, 2142 mm y 67,7 – 75,2% respectivamente (López, 2020).

Figura 10. Mapa de localización y levantamiento topográfico de guaduales.



2.1.1 Georreferenciación y levantamiento topográfico de los guaduales. La georreferenciación y levantamiento topográfico de cada una de las matas de guadua, se realizó con GPS Garmin Navegador Satelital Etrex**,** con el cual se tomaron los puntos y los trackings para realizar el mapa a una escala 1:500 mediante el empleo del Software ArcGIS versión 10.5.

2.2 CENSO GUADUAL

El censo se realizó en las tres áreas de guadual. Para el desarrollo se tuvo en cuenta a cada uno de los culmos presentes en el guadual. Asimismo, para cada culmo se identificó su estado fitosanitario y de madurez, para clasificarlas se diseñaron placas con las siguientes características: *Estado de madurez*: renuevo (R), verde (V), maduro (M), sobremaduro (SM), *Color de cinta* y *Número de culmo*: $i = 1,2,3$.

La información obtenida se recolectó en el formato para censo de guadual (Anexo A).

Variables tomadas en el inventario

- *Estado de madurez:* se identificó con cintas de color dependiendo del estado de maduración de la siguiente forma.
- *Medición del diámetro del entrenudo a la altura del pecho.*

Variables que se calculan con datos del inventario

- Estructura del rodal de guadua.
- Densidad del guadual.
- Área basal del guadual.

2.3 APROVECHAMIENTO DE CULMOS

Después de obtener los datos del inventario y procesar la información se pudo establecer los siguientes parámetros para llevar a cabo la entresaca:

Disponibilidad: se tuvo en cuenta los diferentes individuos y el porcentaje en que se encuentran en cada una de las etapas de madurez.

Intensidad de cosecha (IC): teniendo en cuenta los parámetros *densidad y disponibilidad* y la relación entre ellos, se realiza el cálculo para poder identificar cual sería la intensidad de cosecha adecuada para generar sostenibilidad al bosque después del aprovechamiento. Además, se tuvo en cuenta lo propuesto por Camargo *et al.,* (2004) quien propone que se debe mantener entre 60 a 70% de culmos maduros.

Siguiendo la metodología propuesta por Camargo *et al.,* (2008) formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales el régimen de cosecha propuesto se calcula teniendo en cuenta las siguientes fórmulas:

$$\boldsymbol{TCA} = Total\ de\ culmos\ aprovechables\ x\ \%\ IC$$

$$\boldsymbol{TCo} = Total\ culmos\ secos\ + TCA$$

$$\boldsymbol{TR} = TCA - TCo$$

$$\boldsymbol{IE}\ \% = \ TCo\ /\ (TCo\ +\ TR)$$

Donde: **TCA:** Total *culmos aprovechables,* **IC:** *Intensidad de cosecha,* **TCo:** Total *culmos para corte total,* **TR:** Total *culmos remanentes,* **IE:** *Intensidad de cosecha evaluada.*

Tosne, (2009) propuso el **coeficiente del rodal ideal (RGI)**

$$\boldsymbol{RGI}\ = \frac{FC}{DA}$$

Donde: **FC:** *Futura cosecha*, **DA:** *Disponibilidad actual*

Según este indicador tenemos: **RGI<** 0,4 Bajo potencial, $[0{,}4 \leq \mathbf{RGI}\ \leq\ 0{,}5\ ]$ Ideal potencial y **RGI>** 0,5 baja disponibilidad actual

Ciclo de cosecha: hace referencia a la periodicidad del aprovechamiento, dando paso a la capacidad regenerativa de los guaduales en forma sostenible durante el tiempo.

Para la determinación del contenido de biomasa aérea se llevó a cabo un inventario destructivo de 60 culmos con el fin de obtener una muestra representativa para llegar a datos de mayor confiabilidad, se seleccionaron 20 culmos de cada guadual en donde se realizaron las siguientes actividades en cada uno de los guaduales:

Corte de culmos: se realizó a partir del tercer nudo debido a que la parte basal es muy gruesa y dificulta el corte además esta parte no se emplea comercialmente. Se seleccionaron culmos que se encuentren en estado sanos y libres de todo defecto y que representaran el promedio de los culmos del rodal o de la localidad (Figura 11). Se realizó a las 6:30 a.m para cada guadual. Para la toma de datos se empleó el formato de cosecha de guaduales (Anexo B).

Figura 11. Corte de culmos en guadual, descope y troceado descopado y trozado

En la tabla 2 se relacionan las variables que se tomaron para la determinación de biomasa de los guaduales.

Tabla 2. Variables para la determinación de biomasa.

Variable	Unidad	Instrumento/ Método
Longitud del culmo	m	Decámetro
Peso de culmo	kg	Balanza tipo reloj
Espesor de la pared del culmo	mm	Pie de rey

Cubicación: se empleó el método de *Smalian* para el cálculo del volumen.

$$Vol = \frac{\pi}{4}\left(\frac{d_S + d_i}{2}\right)^2 lt$$

Dónde: $\boldsymbol{d_S}$**:** Diámetro en el extremo superior de la troza en metros (m), $\boldsymbol{d_i}$**:** Diámetro en el extremo inferior de la troza en metros (m), $\boldsymbol{lt}$**:** Longitud de la troza en metros (m)

Cálculo del volumen: para el cálculo del volumen de guadua se modifica el método de Smalian, considerando que el culmo de la guadua en su parte interna presenta un vacío, para ello se tuvieron en se tuvo en cuenta las circunferencias externas e interna de cada troza, tanto inicial como final para el cálculo con las respectivas fórmulas (Figura 12 A y B).

Figura 12 *A.* Mediciones de circunferencia en campo en culmos

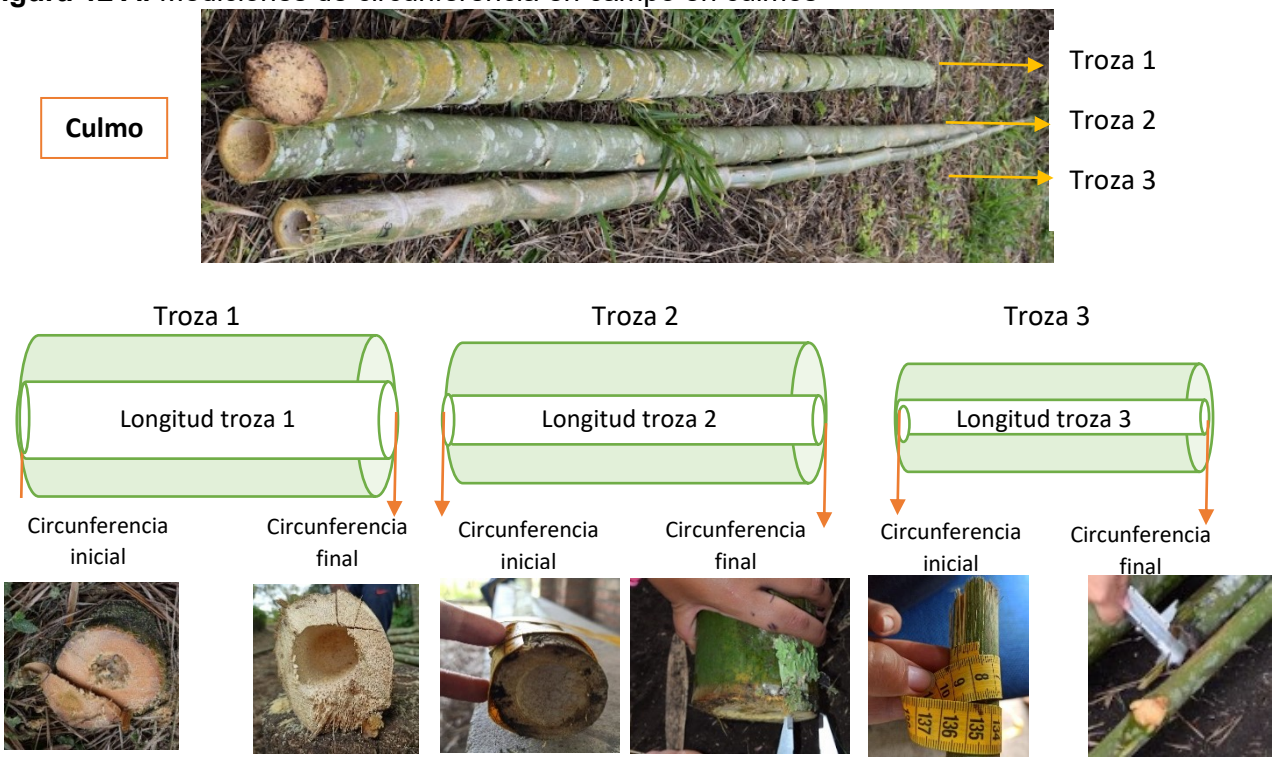
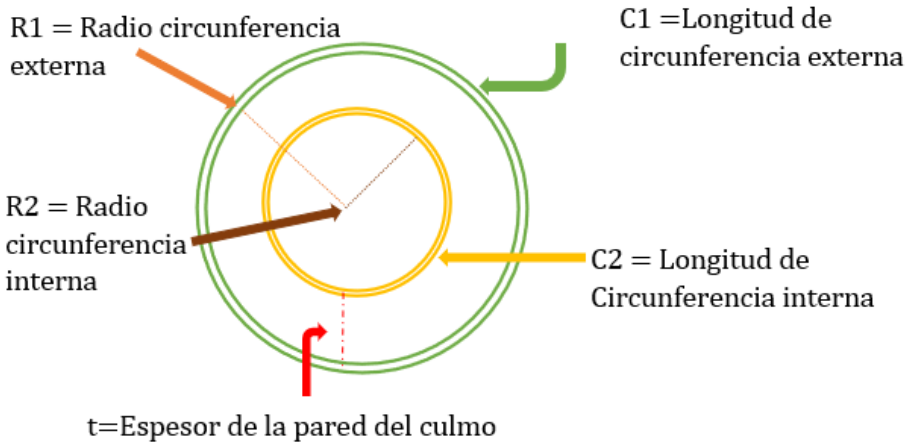


Figura 12. B. Variables para la determinación del volumen para guadua.



-Circunferencia externa (C1)

$$C1 = 2\pi \, \mathrm{R1}$$
$$\frac{C1}{2\pi} = \mathrm{R1}$$

-Circunferencia interna (C2)

$$C2 = 2\pi \, \mathrm{R2}$$
$$\frac{C2}{2\pi} = \mathrm{R2}$$

-Diferencia

$$R2 = \mathrm{R1} - \mathrm{t}$$

Luego de calcular los radios, se calcularon las áreas externas e internas de cada uno de los círculos de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$Área\ de\ circunferencia\ = \pi\, r^2$$

Finalmente, se calculan los volúmenes de acuerdo con las siguientes formulas:

$$Volumen\ externo\ o\ aparente\ = (\pi\, {r_E}^2)\,.\,lt$$

Donde: r_E: radio de circunferencia externa, lt: longitud de troza

$$Volumen\ \ interno\ = (\pi\, {r_I}^2)\,.\,lt$$

Donde: r_I: radio de circunferencia interna, lt: longitud de troza

$$Volumen\ \ neto\ = Volumen\ externo - Volumen\ interno$$
$$Volumen\ \ neto\ = (\pi\, {r_E}^2)\,.\,lt - (\pi\, {r_I}^2)\,.\,lt$$
$$Volumen\ \ neto\ = \pi\, lt({r_E}^2 - {r_I}^2)$$

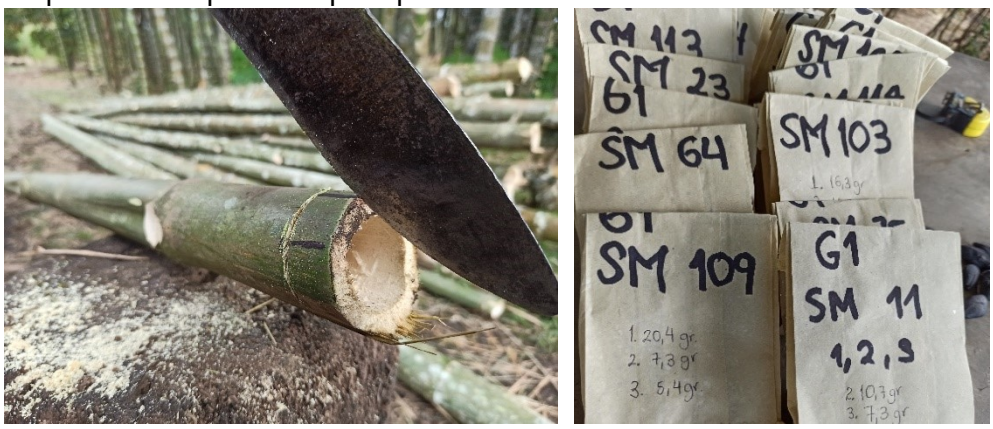
Adicionalmente para el cálculo de los parámetros: *Área basal y Volumen* (Aparente, interno y real) por hectárea, se calculó inicialmente cada valor para cada culmo, seguido del cálculo a nivel del

guadual teniendo en cuenta el área respectiva y posteriormente estos valores fueron extrapolados a hectáreas.
G6

2.4 DETERMINACIÓN DE BIOMASA

Se utilizó el protocolo de NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5525, (ICONTEC, 2007) para la realización de pruebas físicas mecánicas, se utilizaron probetas prismáticas de 25 mm de ancho y altura y con espesor de 1mm (Figura 13). A cada probeta se le asignó la información del culmo de procedencia y luego se empacó en una bolsa de papel para llevar al laboratorio. Se extrajo una probeta de la parte basal y otra de la parte media de cada culmo, para un total de 180 muestras.

Figura 13. Preparación de probetas para pruebas de laboratorio



Determinación del contenido de humedad (CH). inicialmente se pesaron las probetas extraídas en estado verde en la balanza, luego se empleó un horno para secar a 103°C las probetas hasta obtener una condición absolutamente seca, finalmente, se repitió el proceso anterior en un intervalo de 2 horas con el fin de obtener el peso constante. El contenido de humedad (CH), se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$CH = \left(\frac{Ph - Ps}{Ps}\right).100$$

Donde: $\boldsymbol{CH}$ corresponde al contenido de humedad, $\boldsymbol{Ph}$ el peso húmedo de la madera en gramos y $\boldsymbol{Ps}$ el peso seco de la madera en gramos.

Determinación de la densidad básica del material (ρ): inicialmente se calculó el volumen realizando mediciones directas sobre las probetas en condiciones húmedas, posteriormente se llevarán al horno con el fin de obtener la masa constante con exactitud. La densidad básica de la probeta (ρ), se calculó mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$p = \left(\frac{m}{v}\right)$$

Donde: $\boldsymbol{\rho}$ es densidad básica de la probeta (g / cm^3), $\boldsymbol{m}$ es la masa de la probeta seca en horno en gramos y $\boldsymbol{v}$ el volumen verde de la probeta en mm^3.

Determinación de la biomasa de las probetas (B): se calculó mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$B = Ph - (Ph \,.\, CH)$$

Donde: $\boldsymbol{B}$ es biomasa de la probeta (%), $\boldsymbol{Ph}$ peso húmedo de la madera y $\boldsymbol{CH}$ contenido de humedad.

Análisis estadístico de pruebas de laboratorio

- **Diseño experimental:** se empleó un diseño completamente al azar (D.C.A), con 3 tratamientos, 1 repetición por tratamiento que se definió como el lugar de procedencia de la probeta (G1, G2 y G3) y como unidad experimental 20 muestras.

- **Estadística descriptiva:** se determinaron estadísticos de tendencia central y dispersión como: media, mediana, desviación estándar y coeficiente de variación.

- **ANOVA:** para el desarrollo de la prueba se empleó un valor de p se consideró significativo a un nivel de probabilidad ($p<0.05$) inicialmente se tuvo en cuenta los supuestos de normalidad y homogeneidad, posteriormente se empleó una prueba de promedios Tukey ($p<0.05$) para determinar diferencias significativas entre los tratamientos.

El modelo matemático empleado para el ANOVA fue:

$$\boldsymbol{Y_{ij} = \mu + G_i + \varepsilon_{ij}}$$

Donde:

***Yij* =** variable de respuesta de la ij-ésima unidad experimental
***μ* =** media general
***Gi* =** efecto i-ésimo de los diferentes genotipos, i = G1,G2, G3
***Ɛij* =** efecto del error experimental asociado a la ij-ésima unidad experimental.

Hipótesis:

H0: $\boldsymbol{\mu}$ 1 = $\boldsymbol{\mu}$ 2 = $\boldsymbol{\mu}$ 3 Las medias poblacionales de los individuos son iguales.
Ha= $\boldsymbol{\mu}$ 1 ≠ $\boldsymbol{\mu}$ 2 = $\boldsymbol{\mu}$ 3 Al menos una media poblacional de los individuos es diferente.

2.5 PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Para la creación de la base de datos, se empleó el paquete de Microsoft Office Home: Excel 365 y para el análisis de la información se utilizó el software *Infostat, versión 2022.*

2.6 MODELOS ALOMÉTRICOS

Siguiendo la metodología de Camargo & Kleinn, (2010) con el empleo de las variables longitud, área basal, volumen y diámetro se estimaron los modelos de regresión de mayor ajuste a las condiciones del guadual. A continuación, se presentan los modelos (Tabla 3) que se utilizaron como referencia y comparación para la estimación de la longitud a partir del diámetro del culmo.

Tabla 3. Modelos para cálculo de la longitud de los culmos de *G. angustifolia* a partir de su diámetro.

No.	Modelo	Fórmula
1	Lineal	$LT = b_0 + b_1 . d$
2	Potencia (Prodan et al 1997)	$LT = b_0 . d^{b1}$
3	Buford (1986)	$LT = 10^{b_0} . d^{b_1}$
4	Prodan *et al* (1977)	$LT = e^{b0} . d^{b_1}$
5	Larsen and Hann (1987)	$LT = b_0 . e^{-e^{b_1 - b_2 . DEAP}}$
6	Potencia modificada	$LT = b_0 . {b_1}^{DEAP}$
7	Geometrico	$LT = b_0 . DAP^{\ b_1 . DEAP}$
8	Raíz	$LT = b_0 \times b_1^{\ (\frac{1}{DEAP})}$
9	Doble inverso	$LT = \frac{1}{b_0 + \frac{b_1}{DEAP}}$
10	Curva S	$LT = e^{bo + \frac{b1}{DEAP}}$
11	Logaritmo reciproco	$LT = \frac{1}{b_0 + b_1 . \ln DEAP}$
12	Raíz cuadrada Y, Inversa de X	$LT = \left(\frac{b_0 + b_1}{DAP}\right)^2$
13	Exponencial modificado	$LT = b_0 . e^{DEAP . b_1}$
14	Crecimiento saturado	$LT = \left(\frac{b_0 . DEAP}{b_1 + DEAP}\right)$
15	Recipoco Y.D	$LT = \frac{DEAP}{b_0 . b_1 . DEAP}$
16	Exponencial	$LT = e^{bo + b1 . DEAP}$

Donde, LT: longitud total del culmo, b: coeficientes de regresión estimados, $DEAP$: diámetro del entrenudo a la altura del pecho, ln: logaritmo natural y e: base del logaritmo natural.

A continuación, se relacionan los modelos que se utilizaron para predecir y estimar la biomasa en los guaduales (Tabla 4).

Tabla 4. Modelos para cálculo de la biomasa de los culmos de *G. angustifolia* a partir del área basal y DEAP.

No.	Modelo	Fórmula
17	Lineal	$B = b_0 + b_1 G$
18	Potencia (Prodan et al 1997)	$B = b_0.G^{b_1}$
19	Potencia modificada	$B = {b_0}^{G}. b_1$
20	Exponencial modificado	$B = b_0 . G^{b_1.G}$
21	Lineal	$B = b_0 + b_1 DEAP$
22	Potencia	$B = b_0 . DEAP^{b_1}$
23	Potencia modificada	$B = {b_0}^{DEAP}. b_1$
24	Exponencial modificado	$B = b_0 . DEAP^{b_1 .DAP}$

Donde, B:biomasa, G: área basal y $DEAP$: diámetro del entrenudo a la altura del pecho.

A continuación, se relacionan los modelos que se emplearon para estimar el volumen de los culmos (Tabla 5).

Tabla 5. Modelos para calculo los volúmenes aparente y real de culmos de *G. angustifolia* a partir del DEAP y longitud.

No.	Modelo	Fórmula
25	Berkhout (2003)	$V = b_0 . d^{b1}$
26	Alométrico I	$V = b_0 . d^{b1} . d_{int}^{b2}$
27	Alométrico II	$V = b_0 . d^{b1} . LT_{int}^{b2}$
28	Schumacher- Hall (2003)	$V = b_0 . d^{b1}. LT^{b2}$
29	Alométrico III	$V = b_0 . d^{b1} . t^{b2}$
30	Taper (2002)	$V = b_0 . LT^{(3- b_1)}$
31	Lineal	$V = b_0 + b_1. d$

Donde, LT: longitud del culmo, $LT_{int:}$ longitud en el primer entrenudo, b: coeficiente de regresión estimado, d: diámetro del entrenudo a la altura del pecho, $d_{int:}$ diámetro del entrenudo a la altura del primer entrenudo y t: espesor de la pared del culmo.

Para la evaluación de los modelos de regresión, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros en los modelos no lineales: coeficiente de determinación, normalidad ($p<0.05$), homocedasticidad ($p<0.05$), error estándar del modelo, error estándar de los residuales, AIC (Criterio de información de Akaike) y BIC (Criterio de información bayesiano) para los modelos lineales además se tuvo en cuenta la linealidad y la distancia de Cook. El ajuste y respectiva evaluación de los modelos se realizó mediante el empleo del software *R studio, versión 4.2* y el programa *Curve-expert.*

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 DIAGNOSTICO INICIAL

El Municipio de Popayán hace parte del sistema de zonas de vida que se clasifica como húmedo premontano tropical (bh-P/T) (Holdridge, 1978) y selva subandina (Cuatrecasas, 1958). El ecosistema de esta región se considera como un reservorio estratégico conformado por 13 microcuencas, humedales y manantiales, su regulación hídrica tiene influencia sobre la única zona de Páramo del Municipio de Popayán, además, los bosques andinos del Antiplano de Popayán presentan una estructura homogénea, siendo bosques secundarios de sucesión temprana (Gómez & Salamanca, 2015).

Los habitantes de la zona indicaron que los tres bosques de guadua ubicados en el CEVBA se sembraron hace aproximadamente diez años y dentro de este tiempo no han sido intervenidos artificialmente. De manera general, los dos guaduales (Figura 14) ubicados en la parte frontal del CEVBA presentan características similares, en contraste con el guadual 3 el cual se encuentra en una pendiente media, con mayor humedad y competencia (Bolaños *et al.,* 2010).

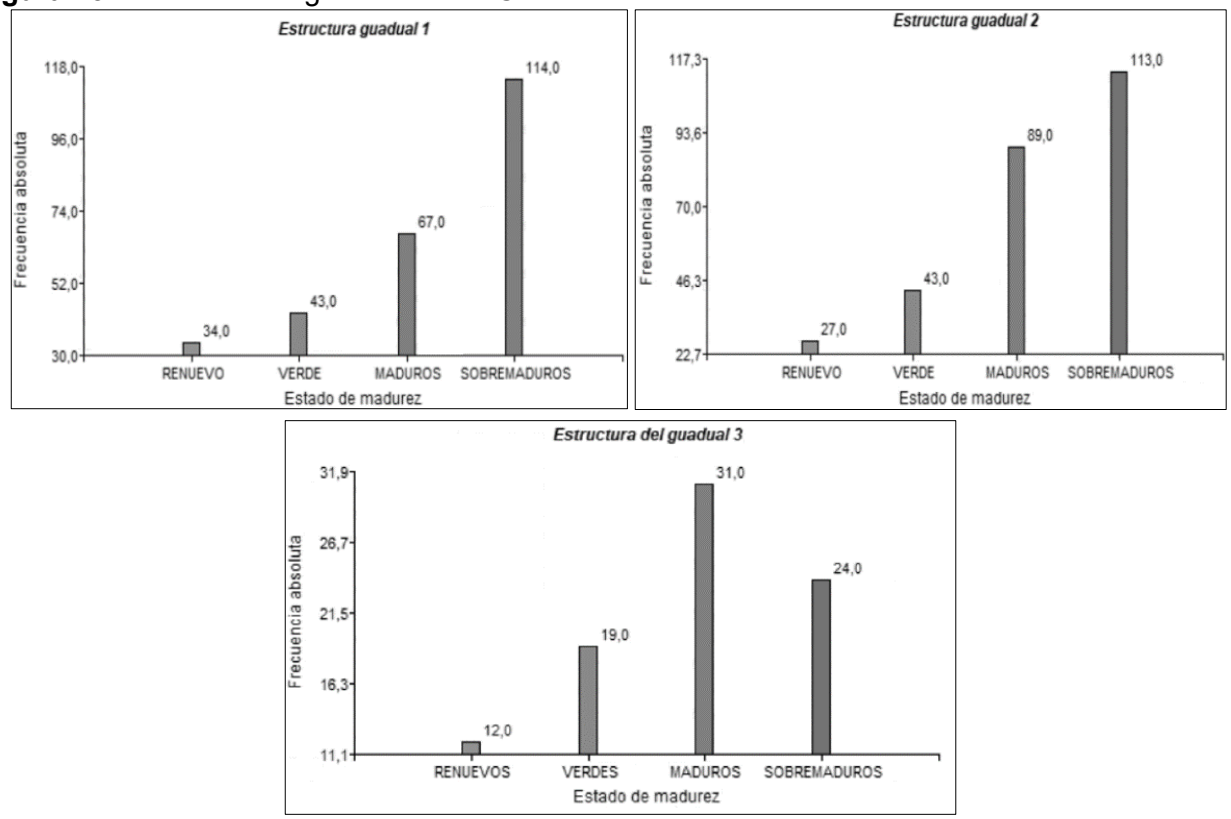
Por otra parte, las guaduas presentaron un estado fitosanitario sano, haciéndolas aptas para el aprovechamiento. Sin embargo; es importante realizar dentro de las actividades de manejo tratamiento silvícolas como: saneamiento y aprovechamiento.

Figura 14. Guaduales ubicados en el CEVBA

3.2 CENSO DEL GUADUAL

3.2.1 Estructura del guadual. Se reportaron 670 culmos en los tres guaduales, además, se pudo observar que las características de los guaduales 1 y 2 presentan una estructura similar con un mayor número de culmos en estado sobremaduro, en contraste con el guadual 3 (Figura 15), donde se encontró una mayor cantidad de individuos en estado maduro; asimismo, en el guadual 2 se reportó el mayor número de individuos (Tabla 6). Es importante mencionar que no se encontraron guaduas en estado seco.

Figura 15. Estructura de guaduales del CEVBA



Los resultados del Guadual 1 y 2 son distintos a los encontrados por Pedroza (2016), quien reporta para un bosque de guadua ubicado en la Cuenca Hidrográfica del río Guachicos, Huila una estructura con una composición de: (16%) renuevos, (35%) tallos verdes, (39%) maduros, sobremaduros (3%) y secos (0.02%), debido a que esta estructura es semejante a la presentadaen el Guadual 3 del estudio, esto podría deberse a las condiciones agroclimáticas predominantes de esta zona, donde destacan pendientes altas siendo similares a las halladas en el guadual 3.

Los valores encontrados dentro del censo son similares a los citados por Joaqui & Villareal (2014), en estudios realizados en bosque de guadua ubicados en los municipios de Saladoblancoy Timaná departamento del Huila, identificándose los siguientes resultados: 17370 (7%) renuevos, 113944 culmos verdes (42,1%), 139308 culmos maduros y sobre maduros (51,47%), estos indicadores podrían ser parecidos debido a una igualdad en las condiciones agroclimáticasque comparte con la

meseta de Popayán al formar parte de la cordillera central de los Andes.

Fonseca y Rojas (2016), identificaron un bosque de guadua ubicado en Costa Rica con la siguiente composición: (15%) renuevos, (11%) culmos verdes, (51%) culmos maduros y (17%) y(20%) de culmos secos. Estos resultados contrastan con los encontrados en el estudio, asimismoreflejan un posible manejo inadecuado del bosque, debido a que los culmos están llegando a unaedad en donde comercialmente no son viables, esto podría ser por la falta de aprovechamiento de los culmos maduros y el mal manejo de los remanentes.

Citando a Londoño *et al*. (2002), quienes consideran como estructura ideal un bosque de guaduacon las siguientes características: 10 % de renuevos, 30 % tallos verdes, 60 % maduros y sobre maduros 5% secos. Mientras que, Camargo, (2010), indica que un guadual en estadosustentable debe presentar una composición de guaduas en estado maduro que oscile entre 60% y 75%, valores aproximados a los encontrados en la zona de estudio con 76%, 75,2% y 66,2% perteneciente a cada uno de los guaduales 1, 2 y 3 respectivamente. De igual manera Charpentier (2018), señala la importancia de un desarrollo óptimo en los guaduales, con características como la auto-regeneración, asimismo, este debe ser sostenibles en producción y rentabilidad equilibrada, integrando una estructura horizontal entre 5% al 10% en estado renuevo, 20% y 25% verdes, 65% a 70% maduras.

Tabla 6. Estructura de guaduales del CEVBA

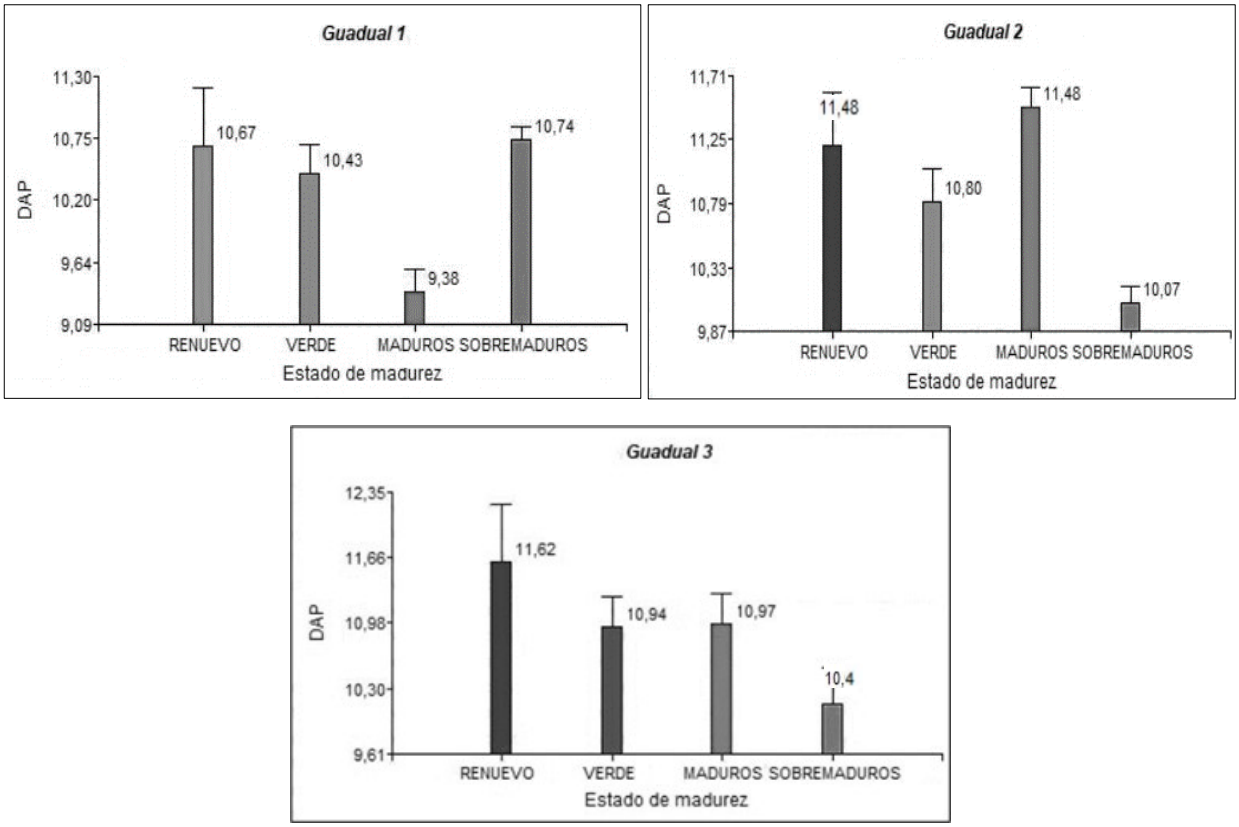
Guadual	Estado de madurez				
	Renuevos	**Verdes**	**Maduros**	**Sobremaduros**	**Total**
1	33	43	67	114	257
2	23	43	88	113	267
3	12	18	31	85	146
					670

Los resultados encontrados en el estudio son semejantes a los reportados por Tosne (2009), en investigaciones realizados en los municipios de Morales y Piendamó en el departamento del Cauca, describiendo gran similitud en cuanto la estructura del guadual con porcentajes de culmos del 31,89%, siendo valores de composición ideal en los bosques de guaduas. En contraparte, Briceño (2019), afirma que la fisiología de esta especie necesita que más del 80% de los culmos estén vivos, así como el 30 y 40% de población madura, con el fin de tener un rizoma en pleno vigor que permita el correcto desarrollo y apoyo a los renuevos. En este contexto, Camargo et al., (2010), manifiesta que porcentajes menores a 10% en estado renuevo y joven, indicaría baja regeneración de la especie en los sitios de estudio.

3.2.2 Diámetro del entrenudo a la altura del pecho. En relación con los diámetros a la altura del entrenudo (DEAP) se encontró un promedio de 10,5 cm para los guaduales con valores mínimos y máximos de 5,88 y 15,59 correspondientes a G1 y G2 respectivamente, resultados similares a los encontrados por García & Giraldo, (2018), indicando valores de 11,7 cm de DEAP, variando entre un mínimo de 7,5 cm y un máximo de 16,6 cm. No obstante, García et al., (2010), sugiere, que en trabajos de manualidades (artesanías) los DEAP deben ser de 13 cm, muebles 11,4 cm, construcción 12 cm y laminados 17 cm, estos resultados son diferentes a los presentados en el estudio, debido a que los guaduales 1 y 2 muestran individuos inferiores de 10 cm de DEAP lo cual podría explicarse debido a la falta de manejo en los guaduales.

Según Briceño (2019), señala que, en condiciones agroclimáticas ideales y espacio óptimo de crecimiento, se pueden presentar individuos con valores de 20 cm de diámetro en el entrenudo.En este sentido, programar una corta del material sobremaduro, es fundamental para ofrecer mayor espacio a los guaduales y facilitar el desarrollo de un diámetro mayor. Además, se observa (Figura 16), que en el guadual 3, presentan mayores valores de DEAP en los renuevos, indicando posiblemente mejores características físicas y mecánicas para el aprovechamiento en un futuro.

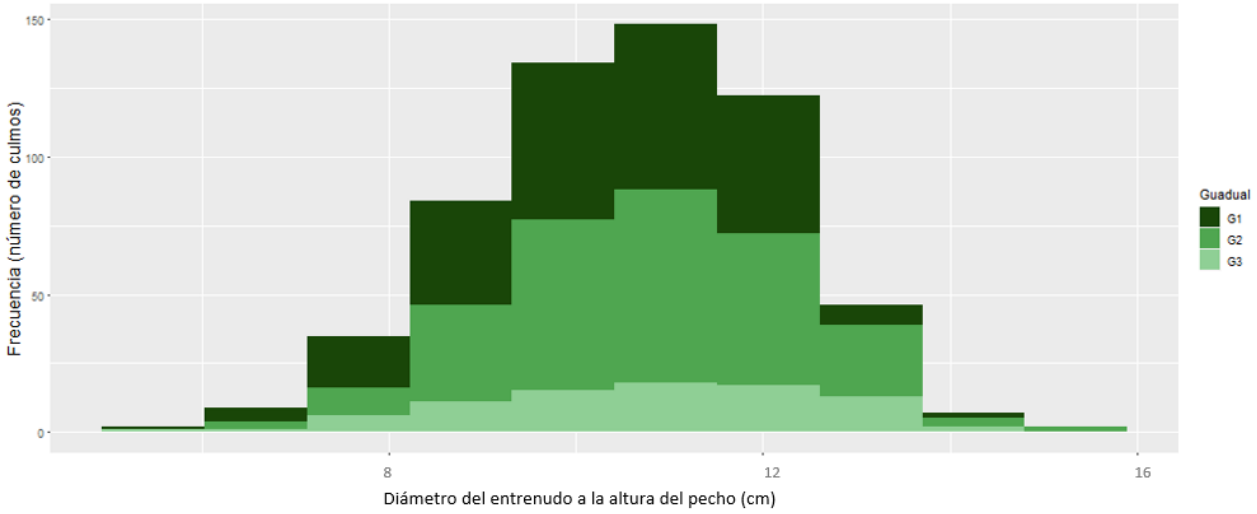
Figura 16. Diámetro a la altura del entrenudo de los guaduales del CEVBA



Se presentó una distribución unimodal típica (Figura 17), en donde la mayor cantidad de individuos se encuentran dentro de la media poblacional y la menor cantidad se ubican en los extremos de la distribución. De esta manera, el mayor número de individuos (144) se ubican en la sexta clase diamétrica comprendida entre 10,5 hasta 11,5 cm, de igual forma se puede observar que en la clase

quinta y séptima se presentaron valores de 130 y 124 individuos respectivamente. Además, se puede observar que en el guadual 1 se presentó la mayor cantidad de individuos dentro de la sexta clase diamétrica respecto a los otros bosques (Gómez & Salamanca, 2015).

Figura 17. Histograma de frecuencias de clases diamétricas en bosques de guadua



3.2.3 Densidad La estimación de la densidad fue tomada a partir de las áreas, los guaduales y el número de individuos como se indica en la Tabla 7. En este contexto, Camargo et al., (2008), recomienda tener aproximadamente 2000 culmos por hectárea. Lo que indicaría que al extrapolar los resultada a hectárea, se observaría una alta densidad en los guaduales, reafirmando lo citado por Montealegre & Molina, (2016), quienes indica que, a menor espacio de área, los culmos no podrían desarrollarse adecuadamente respecto su DEAP y longitud, evitando que se exprese todo el potencial genético del individuo.

Tabla 7. Densidad de guaduales del CEVBA

Estado de madurez	Guadual 1	Guadual 2	Guadual 3
Renuevos	33	23	31
Verdes	43	43	10
Maduros	67	88	18
Sobremaduros	114	113	24
Total	257	267	83
Area	102,888 m^2	190,32 m^2	90,66 m^2
Densidad ind/ m^2	2,49 culmos m^2	1,40 culmos m^2	0,91 culmos m^2

Pedroza (2016), reporta una densidad entre 0,2 a 0,8 culmos /m^2, valores diferentes a los reportados en el estudio, indicando que los culmos no presentan las mismas características físico-mecánicas que se esperaría para ser aprovechados con fines comerciales al estar en una comunidad con alta población. Además, Londoño et al., (2002), logró identificar una densidad entre 0,3 a 0,8 culmos/ m^2, recalcando la importancia de esta variable que se relaciona con atributos como crecimiento y mortalidad, siendo un indicador fundamental para medir la integridad ecológica de este ecosistema.

De acuerdo con Joaqui & Villareal (2014), quien describe densidades de 0,343 a 0,344 culmos/ m^2 estos resultados difieren a los presentados en el estudio. Se observó que en el guadual 1 se presentó la mayor densidad, lo que podría tomarse como un indicador de la falta de manejo silvicultural en este, asimismo, se presenta una situación similar respecto al número de culmos en estado sobremaduro, reafirmando la necesidad de realizar el aprovechamiento lo más pronto posible, con el fin de mejorar el espacio del guadual incrementando así la oferta de servicios ecosistémicos como producción de culmos, captura de carbono, ciclaje de nutrientes y de agua, entre otros (Sierra & Giraldo, 2018).

3.2.4 Área basal - G (m^2). Los resultados obtenidos (Tabla 8) muestran que los bosques de guadua 1 y 3 presentaron un área basal similar, el guadual 3 fue el que presentó el menor G en el estudio. A nivel individual en el guadual 3 se identificó el culmo que aportó mayor G dentro del ecosistema con (0,015 m^2).

Tabla 8. Área basal de guaduales del CEVBA

Medidas Resumen			
Guadual	**G**	**Área m^2**	**G (m^2/ ha)**
G1	2,0376	102,88	198,07
G2	2,4637	190,32	129,44
G3	0,7900	90,66	87,13

Estos resultados son superiores a los reportados por Veldman (2008), quien indica valores de 58 m^2/ha en bosques de guadua de la Chiquitania, Bolivia en estudios para determinar la influencia de los incendios, densidades bajas y doseles de árboles abiertos en el crecimiento de un guadual, los resultados se pueden explicar debido a la exposición del dosel que se encontraba la guadua para tener mayor crecimiento en la zona, además algunos factores como fertilidad y perturbación del bosque son determinantes para el establecimiento de esta especie.

Camargo (2008) reportó un área basal de 43,78 m^2 y coeficientes de variación del 51%, contrastando con los resultados presentados en este estudio en donde se obtuvo valores promedios de G=138m^2/ha y un coeficiente de variación del 33,1%, lo anterior puede deberse a las características agroclimáticas de los lugares en donde se realizó el muestreo en el Eje cafetero colombiano, en donde se encontraron guaduales que tenían un manejo silvicultural adecuado lo que conllevaría posiblemente al aumento de la productividad dentro del rodal.

3.3 CRITERIOS PARA LA COSECHA DE GUADUALES

3.3.1 Disponibilidad actual. La oferta o disponibilidad actual del guadual (Tabla 9), se calculó teniendo en cuenta la estructura de los guaduales, el estado de madurez y las condiciones físico mecánicas adecuadas para diferentes usos.

Tabla 9. Disponibilidad de guaduales del CEVBA

Guadual	Renuevo	Verdes	Maduros	Sobremaduros	Disponibilidad Actual (Maduro + Sobremaduro)
1	33	43	67	114	181
2	23	43	88	113	201
3	10	18	31	24	55

3.3.2 Intensidad de Cosecha. Para establecer la intensidad de cosecha se tuvo en cuenta la estructura del guadual y la disponibilidad con el fin de lograr porcentaje más adecuado para las condiciones actuales y brindando un equilibrio sostenible y económico para las futuras cosechas. Los resultados se obtuvieron siguiendo la metodología propuesta por Camargo, et al. (2008) para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales (Tabla 10 - 12).

Tabla 10. Cálculo de índice de cosecha guadual 1

Total	Renuevo	Verdes	Maduros	Sobremaduros	DA	IC	TCA	TCo	TR	IE
257	33	43	67	114	181	10	18	18	239	7
257	33	43	67	114	181	15	27	27	230	11
257	33	43	67	114	181	20	36	36	221	14
257	33	43	67	114	181	25	45	45	212	18
257	33	43	67	114	181	30	54	54	203	21
257	33	43	67	114	181	**35**	63	63	194	25
257	33	43	67	114	181	40	72	72	185	28

Tabla 11. Cálculo de índice de cosecha guadual 2

Total	Renuevo	Verdes	Maduros	Sobremaduros	DA	IC	TCA	TCo	TR	IE
267	23	43	88	113	201	10	20	20	247	8
267	23	43	88	113	201	15	30	30	237	11
267	23	43	88	113	201	20	40	40	227	15
267	23	43	88	113	201	25	50	50	217	19
267	23	43	88	113	201	30	60	60	207	23
267	23	43	88	113	201	**35**	70	70	197	26
267	23	43	88	113	201	40	80	80	187	30

Tabla 12. Cálculo de índice de cosecha guadual 3

Total	Renuevo	Verdes	Maduros	Sobremaduros	DA	IC	TCA	TCo	TR	IE
83	10	18	31	24	55	10	6	6	78	7
83	10	18	31	24	55	15	8	8	75	11
83	10	18	31	24	55	20	11	11	72	13
83	10	18	31	24	55	25	14	14	69	17
83	10	18	31	24	55	30	17	17	67	20
83	10	18	31	24	55	**35**	19	19	64	23
83	10	18	31	24	55	40	22	22	61	27

*Donde: **DA:** disponibilidad actual**, IC:** índice de cosecha, **TCA:** total de culmos aprovechables, **TCo:** total de culmos para corte, **TR:** total de culmos remanentes, **IE:** intensidad de cosecha evaluada.*

Camargo et al., (2013) indican que intensidades de cosecha del 30 al 40% son las más recomendadas en un guadual que supere los 2000 individuos por hectárea, en el caso de los guaduales del estudio se hace necesario realizar una intervención inicial a los culmos de estado

sobremaduro, sin embargo, no se escoge un %IC más alto, con el fin de darle tiempo al guadual para que los renuevos y verdes pasen a estadios más avanzados para mantener la disponibilidad para las futuras cosechas.

Según la estructura observada después del aprovechamiento para el bosque de guaduales en tres cosechas (Tabla 13), una intensidad de cosecha escogida (35%) sería la más adecuada, porque época los renuevos y verdes ya serían maduros y habría más individuos dentro del bosque por lo tanto un %IC del 35, sería ideal para el sostenimiento del bosque de guadual (Sierra & Giraldo, 2018). Además, teniendo en cuenta la regla de decisión del RGI, podemos inferir que para las dos primeras cosechas todos los guaduales presentan un potencial ideal para el aprovechamiento.

Por otro lado, para las cosechas futuras, se calcula la disponibilidad futura teniendo en cuenta la siguiente fórmula:

$$Disponibilidad\ futura = \ Disponibilidad\ actual - Individuos\ intesidad\ de\ cosecha$$

Tabla 13. Programación de futuras cosechas del CEVBA

1 Cosecha								
Guadual	**Renuevos**	**Verdes**	**Maduros**	**Sobremaduros**	**DA**	**IC 35%**	**DF**	**RGI**
1	33	43	67	114	181	63	118	0,65
2	23	43	88	113	201	70	131	0,65
3	10	18	31	24	55	19	36	0,65
2 Cosecha								
1	33	43	67	51	118	63	54	0,46
2	23	43	88	43	131	70	60	0,46
3	10	18	31	5	36	19	17	0,46

*Donde: **DA:** disponibilidad actual**,** Donde: **DF:** disponibilidad final**, RGI:** coeficiente del rodal ideal.*

3.3.3 Ciclo de cosechas. De acuerdo con las características de crecimiento de la guadua, se determinó que 1 año es el tiempo ideal para realizar las intervenciones con el fin de dar el espacio suficiente para que las guaduas maduren y sean aprovechables. En ese orden de ideas la primera y segunda cosecha debe enfocarse en la extracción de 118, 131 y 36 individuos sobremaduros correspondientes a G1, G2 y G3 respectivamente con el fin de mejorar la dinámica dentro del bosque generando mayor espacio para el crecimiento de los renuevos y verdes (Flores de Melo, 2017).

Para la tercera cosecha ocurrida en un año se recomendaría la extracción de individuos maduros principalmente y trascurridas las intervenciones es necesario realizar nuevamente un censo con el fin de identificar las estrategias que se deban emplear de acuerdo con el crecimiento y estado de los guaduales (Camargo et al., 2013).

3.4. VOLUMEN (m^3/ha)

3.4.1 Volumen aparente o externo. Los valores observados (Tabla 14) permiten inferir que los bosques de guadua presentaron un volumen aparente similar, sin embargo, el guadual 1 fue el que obtuvo mayor volumen aparente en la investigación, A nivel individual en el guadual 3 se presentó el culmo que aportó mayor V.A con 0,1183m^3 en el bosque.

Tabla 14. Medidas resumen del volumen aparente en guaduales del CEVBA.

Medidas resumen					
Guadual	**V.A(m^3)**	**ha**	**VA(m^3/ha)**	**n**	**C.V**
G1	1,457	0,010	141,630	20	25,65
G2	1,189	0,019	62,484	20	29,49
G3	1,332	0,009	146,946	22	47,25

En general, los resultados son superiores a los reportados por Viáfara, (2013) quien identificó volúmenes de 60 - 70 m^3 por hectárea promedio en estudios realizados en el Valle del Cauca que tienen como objetivo analizar la producción y potencialidad económica de la cadena productiva de la guadua. Los valores obtenidos en el CEVBA pueden deberse a que se encuentran los guaduales con altas densidades, lo cual eleva la producción, además, de acuerdo con Camargo et al., (2019) este volumen incluye las secciones huecas y leñosas de la guadua y estos autores mencionan volúmenes de hasta 125 m^3 por hectárea.

Volumen interno. De acuerdo con los resultados obtenidos (Tabla 15) se observa que elvolumen interno en los bosques de guadua fue diferente en cada uno, el guadual 1 se caracterizó por tener la mayor cantidad, seguido del guadual 3 y del guadual 2 y los coeficientes de variaciónfluctuaron entre 28,5 – 42,16. En el guadual 1 se encontró el culmo con mayor volumen interno con 0,0689 m^3/ha.

Tabla 15. Medidas resumen volumen interno en guaduales del CEVBA.

Medidas resumen					
Guadual	**V.I(m^3)**	**ha**	**VI(m^3/ha)**	**n**	**C.V**
G1	0,608	0,010	59,066	20	40,62
G2	0,274	0,019	14,380	20	28,56
G3	0,494	0,009	54,468	22	42,16

En este sentido, los resultados se ubican dentro de los reportes de Camargo & García (2012), quienes encontraron valores de volumen interno de 0,05 m^3, es importante recalcar que en este volumen no se incluyen las secciones huecas de la guadua (se tiene en cuenta el espesor de la pared del culmo.

3.4.3 Volumen neto. Según los valores obtenidos (Tabla 16) se determinó que el volumen netoen los bosques de guadua tuvo valores desde 0,830 – 0,916 m^3 correspondientes al guadual 3 y2 respectivamente, los coeficientes de variación fluctuaron entre 37,12 al 54,27%. El culmo que mayor volumen presentó pertenece al guadual 3 con 0,0906 m^3.

Tabla 16. Medidas resumen volumen neto en guaduales del CEVBA.

Medidas resumen					
Guadual	**V.N(m^3)**	**ha**	**V.N(m^3/ha)**	**n**	**C.V**
G1	0,849	0,010	82,563	20	37,12
G2	0,916	0,019	48,104	20	34,53
G3	0,838	0,009	92,477	22	54,27

Los valores presentados en la investigación son similares a los citados por Acosta *et a*l., (2021) quienes reportan que los cultivos de Guadua deben aprovecharse cada 18 meses y producen un volumen de 60 - 70 m^3 por hectárea. Al respecto, Camargo & García, (2012) reportaron valores de volumen neto de 0,13 m^3/culmo, estos valores han permitido establecer los términos de referencia para la formulación de planes de manejo y aprovechamiento sostenible de guaduales.

El volumen neto promedio de las secciones basal, medial y apical por culmo fue de 0,025m^3, 0,011m^3, 0,005m^3 respectivamente, estos valores son superiores a los presentados por Lazaro *et a*l (2016), quienes evaluaron las variables asociadas con la productividad de *Bambusa vulgaris* y su potencial de secuestro de dióxido de carbono en culmos con longitudes de 12 metros y DEAP's de 7,10 cm, con valores de 0,12 m^3, 0,056 m^3, 0,045 m^3 en las secciones previamente nombradas.

3.4.2 Tabla del rodal

A continuación, se presenta la información general de los parámetros productivos de los guaduales (Tabla 17)

Tabla 17. Tabla del rodal de guadua del CEVBA

Guadual	Densidad (ind/ m^2)	Área basal (m^2/ ha)	Volumen aparente (m^3/ ha)	Volumen interno (m^3/ ha)	Volumen neto (m^3/ ha)
G1	2,49	198,07	141,630	59,066	82,563
G2	1,40	129,44	62,484	14,380	48,104
G3	0,91	87,13	146,946	54,468	92,477
Total	4,81	414,6	3,979	1,375	2,603

3.5 DETERMINACIÓN DE BIOMASA

3.5.1 Contenido de humedad - CH (%)

Los contenidos de humedad fluctuaron entre 39,12 a 45,22% correspondientes a G1 y G3 respectivamente (Tabla 18), y los coeficientes de variación entre 14,14 a 28,24% representadospor G2 y G1; resultados similares a los presentados por Gonzales & Tam (2014), quienes encontraron contenidos de humedad que varían entre 12% y 50% en estudios de valores de resistencia a tensión

paralela a la fibra y en función del contenido de humedad del material que se realizaron en laboratorios ubicados en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Tabla 18. Contenido de humedad (%) para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA, La Rejoya.

Guadual	n	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Min	Max
G1	40	39,12	11,05	28,24	12	58,67
G2	40	45,22	6,39	14,12	33,98	60,49
G3	40	44,84	7,54	16,81	18,18	59,42
Total		43,06				

De acuerdo con los resultados los datos expresaron una normalidad en su distribución y según el análisis de varianza se determinaron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Tabla 19).

Tabla 19. Resultados de ANOVA para Contenido de humedad

Pruebas de supuestos					
Prueba			**p (α)0,05**		
Normalidad (Shapiro Wilks)			0,055		
Homogeneidad (Levene)			0,009		
Análisis de la varianza					
Variable	*n*	*R*	*R Aj*		*CV*
Contenido de humedad	120	0,10	0,08		19,87
Cuadro de Análisis de la varianza (SC tipo III)					
Factores de variación	*SC*	*Gl*	*CM*	*Fc*	*p-valor*
Modelo	932,53	2	466,27	6,37	0,0024
Guadual	932,53	2	466,27	6,37	0,0024
Error	856708	117	73,22		
Total	9499,62	119			

La prueba Tukey permitió la conformación de dos grupos (A y B). El grupo A correspondiente a G1 presentó los menores resultados con porcentajes de 39,12 %, (Tabla 20), en contraste en el grupo B se encuentran G3 y G2, con los valores más altos de contenido de humedad 44,84 y 45,22 respectivamente.

Tabla 20. Resultados de prueba de Tukey Contenido de humedad

Prueba de Tukey p (α)0,05, gl: 117				
Guadual	Medias	n	Error estándar	Agrupación
G1	39,12	40	1,35	A
G3	44,84	40	1,35	B
G2	45,22	40	1,35	B

Los resultados son superiores a los reportados por Molina & Montealegre, (2016) quienes identificaron valores de contenido de humedad aproximadamente de 34% de contenido de humedad

para *G. angustifolia* en el municipio de Pitalito, Huila. Al respecto, Vélez (2020) indica que la guadua se caracteriza por tener los mayores contenidos de humedad 34,88%; porcentaje que se considera alto si se compara con cultivos de cítricos que presentan valores de 19,71%.

Charpentier (2018), indica que los guaduales con mayor densidad aparente y neto son los que poseen superficies con mayor volumen de poros y por tanto pueden retener mayor contenido de humedad, así mismo el contenido de la materia orgánica y residuos vegetales cumplen un papel importante en el ciclaje hídrico, mejorando la actividad microbiana y aumenta la penetración de las raíces.

3.5.2 Densidad básica. Los valores de densidad obtenidos para la zona basal fluctuaron entre 0,44 (G3) – 0,7 (G1) y C.V entre 13,18% (G1) – 13,69%, en la zona media se encontraron valores de 0,51 (G3) – 0,66 (G1) con C.V mínimo y máximo de 16,14% (G2) y 19,89% (G1) respectivamente, finalmente, para la zona apical los valores se ubicaron entre 0,5 (G3) – 0,66 días (G2) y C.V de 20,05% (G2) – 47,79% (G3) (Tabla 21). Los bajos coeficientes de variación obtenidos en las secciones basal y media de los culmos, se podría explicar, debido a que los culmos expresan una homogeneidad en su densidad y características en la primera zona, contrastando con los cambios que ocurren durante el crecimiento hacia la zona apical, que resultaron ser más heterogéneos, por lo menos en los guaduales 1 y 3.

Tabla 21. Medidas tendencia central para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA.

Variable	Guadual	n	Media	Media total	Desviación estándar	Coeficiente de variación (%)	Min	Max
Densidad	G1	20	0,7		0,09	13,18	0,53	0,88
zona	G2	20	0,65	0,59	0,09	13,51	0,43	0,82
basal	G3	24	0,44		0,08	13,69	0,45	0,74
Densidad	G1	20	0,66		0,13	19,89	0,38	0,85
zona	G2	20	0,54	0,57	0,09	16,14	0,37	0,78
media	G3	24	0,51		0,08	16,64	0,35	0,66
Densidad	G1	7	0,60		0,25	42,11	0,37	1,12
zona	G2	6	0,66	0,58	0,13	20,05	0,46	0,80
apical	G3	7	0,50		0,24	47,79	0,001	0,70

El ANOVA, permitió identificar que en las variables densidad de zona basal y media, se presentaron diferencias significativas ($p<0,05$), entre los guaduales (Tabla 22).

Tabla 22. ANOVA – Prueba de Tukey para densidad para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA.

Variable	*Supuestos*		*General*		*ANOVA* p (α)0,05						*Tukey*
	N	H	*N*	*CV*	*F.V*	*SC*	*Gl*	*CM*	*FC*	*p-valor*	*Grupos*
Densidad zona basal	0,33	0,108	64	13,5	Modelo	0,26	2	0,13	18,13	<0,0001	G1 B
					Guadual	0,26	2	0,13	18,13	<0,0001	G2 B
					Error	0,44	61	0,01			G3 A
					Total	0,70	63				

Continuación Tabla 22											
Densidad zona media	0,059	0,061	64	18,04	Modelo	0,25	2	0,13	12,13	<0,0001	G1 B
					Guadual	0,25	2	0,13	12,13	<0,0001	G2 A
					Error	0,63	61	0,01			G3 A
					Total	0,88	63				
Densidad zona apical	0,76	0,17	24	37,5	Modelo	0,25	2	0,13	12,13	0,428	
					Guadual	0,25	2	0,13	12,13	0,428	
					Error	0,63	61	0,01			
					Total	0,88	63				

La prueba Tukey (Tabla 22) identificó la conformación de dos grupos (A y B) para la variable densidad en la zona basal. El grupo A presentó el mayor valor de densidad (G3), seguido del grupo B en donde se ubicaron los guaduales 1 y 2. Por otra parte, para la variable densidad zona media se presentaron dos grupos: A y B, en el A se encuentran los guaduales 2 y 3 con losvalores más altos de densidad seguido del grupo B en donde se ubica el guadual 1 con el menorvalor.

Charpentier (2018), al respecto indica que la densidad de los culmos es una variable importante para evaluar el grado de compactación de los suelos, en las evaluaciones realizadas a varios agro ecosistemas, en los que se incluyeron bosques de guaduas, el suelo mostró niveles bajos de compactación de 0,69 gr/cm^3, en comparación con un sistema productivo que tiene entre 0,98 y1,05 gr/cm^3, es decir que la densidad aparente disminuye significativamente en aquellos sistemasdonde los contenidos de la materia orgánica son altos y las densidades reales de los materiales que conforman la matriz del suelo son bajas.

Los resultados son similares a los citados por Córdoba *et al.,* (2018), quienes encontraron valoresde densidad 0,687 g/cm^3 en las secciones medias y basales del culmo en estudios de cuantificación de biomasa aérea utilizando medidas dasométricas para *Guadua angustifolia* Kunth, en la cuenca hidrográfica del río Guarapas municipio de Pitalito Huila, los autores infierenque las densidades varían dentro del culmo debido a la estructura interna; en la zona basal se encuentran muchos poros de tamaño grande por lo tanto hay demasiada parénquima y menos fibras, en contraste con la parte apical donde hay más presencia de poros pequeños y las fibrasson más largas.

3.5.3 Biomasa de culmo. La biomasa del culmo presento valores entre 0,05 a 0,07 ton/ ha correspondientes a G2 y G1 respectivamente (Tabla 23), y los coeficientes de variación fluctuaron entre 15,94 a 16,67% representados por G1 y G3 respectivamente.

Tabla 23. Medidas tendencia central y dispersión biomasa para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA.

Guadual	n	Media	Desviación estándar	Coeficiente de variación	Min	Max
G1	40	0,07	0,01	16,14	0,04	0,08
G2	40	0,06	0,01	16,67	0,04	0,08
G3	40	0,05	0,01	15,94	0,04	0,07
Total		0,06				

De acuerdo con los resultados del análisis de varianza se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (Tabla 24).

Tabla 24. ANOVA Biomasa para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA, La Rejoya.

Pruebas de supuestos					
Prueba	p (α)0,05				
Normalidad (Shapiro Wilks)	0,149				
Homogeneidad (Levene)	0,10				
Análisis de la varianza					
Variable	*N*	*R*	*R Aj*		*CV*
Biomasa culmo	120	0,22	0,20		16,32
Cuadro de Análisis de la varianza (SC tipo III)					
Factores de variación	*SC*	*Gl*	*CM*	*Fc*	*p-valor*
Modelo	3,2 E -03	2	1,6E-03	16,32	0,0001
T	3,2 E -03	2	1,6E-03	16,32	0,0001
Error	0,01	117	9,7E-05		
Total	0,01	119			

La prueba Tukey identificó la formación de tres grupos (A, B y C). El grupo A presentó los menores valores 0,05 ton/ha, segundo del B con 0,06 ton/ha y finalmente en el grupo C se encuentran valores de 0,07, perteneciente a G3, G2 respectivamente (Tabla 25), los cuales difieren del grupo C en donde se encuentra G1 con altos valores en la variable biomasa.

Tabla 25. Prueba de Tukey biomasa de culmo para muestras de probetas de guadua tomadas de los guaduales del CEVBA, La Rejoya.

Prueba de Tukey p (α)0,05, gl: 117				
Guadual	**Medias**	**N**	**Error estándar**	**Agrupación**
G3	0,05	40	1,6 E - 03	A
G2	0,06	40	1,6 E - 03	B
G1	0,07	40	1,6 E - 03	C

Los resultados son inferiores a los reportados por Arbelaez *et al.,* (2011), quienes indican que la producción de biomasa en Guadua es de 22 a 42 ton/ha/año de materia seca y de 2 a 4 ton/ha/año, aporte de biomasa general de 30 a 35 ton/ha/año, producción promedia por hectáreade 70 m^3, área en bosque natural: 3.476 ha y 616 ha en plantaciones de guadua en el departamento de Risaralda, de las cuales 323 ha se tienen bajo aprovechamiento.

Montealegre & Morales (2016), indican valores de 0,66 ton/ha en porcentajes de biomasa para el componente culmo de la guadua en estado maduro, con un p-valor de 0,71, en evaluaciones realizadas en bosques de guadua que se encuentran ubicados cerca de la ribera del rio Guarapasen Pitalito, Huila.

Vásquez, (2020), señala que la guadua puede producir entre 30- 35 ton/ha/ año de biomasa parael suelo de la cual aproximadamente entre 10 a 14% corresponde a la biomasa perteneciente alculmo y que, al aportar biomasa al suelo, junto al sistema de raíces estos ecosistemas ayudan disminuyendo la erosión del suelo.

3.6 MODELOS ALOMÉTRICOS

3.6.1 Ecuaciones DEAP y longitud del culmo. Los valores para las variables longitud de culmo y el diámetro del entrenudo a la altura del pecho estuvieron entre 6 y 17,92 m, y 0,002 y 0,10 m respectivamente (Tabla 26), y los coeficientes de variación fluctuaron entre 14,14 a 26,84%, según la prueba de normalidad Kolmolgovov mostró que las dos variables presentaron una tendencia normal p α (0,05), razón por la cual pueden ser empleadas para la construcción de los modelos de regresión.

Tabla 26. Longitud Total (LT) y DEAP en *Guadua angustifolia del* CEVBA.

Variable	n	Media	Desviación estandar	Coeficiente Variación	Min	Max	p-valor	p-valor
Longitud	55	12,38	0,34	26,84	6	17,92	<0,0001	0,2686
DEAP	55	0,10	2,0 E - 03	14,4	0,06	0,14	<0,0001	0,0977

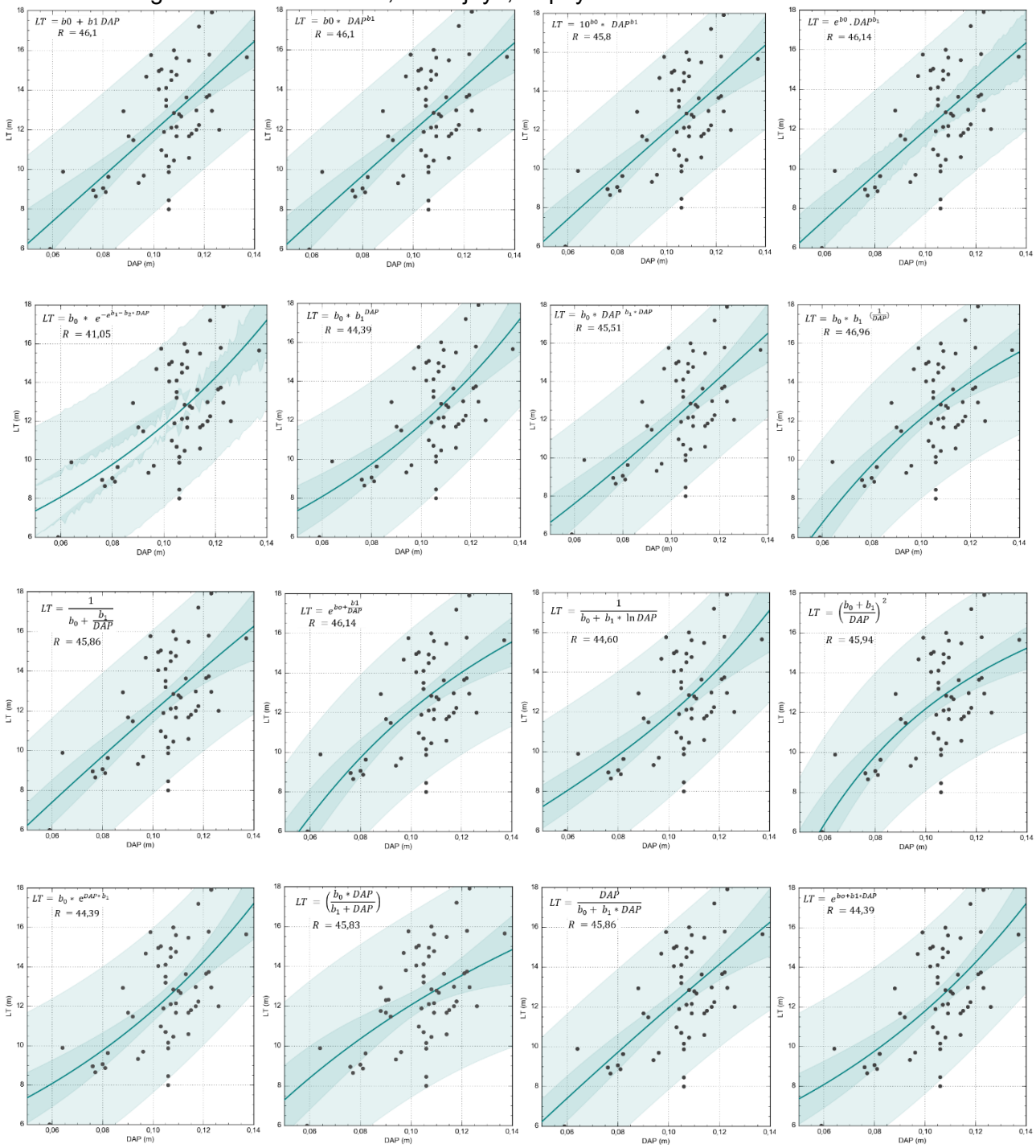
Tabla 27. Modelos alometricos DEAP- Longitud en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán

No.	Modelo	R^2	Error estándar	AIC	BIC	Coeficientes		Error E.	t - valor	p- valor
1	$LT = b_0 + b1\ DEAP$	46,1	2,061	239,57	245,59	b_0	1,731	1,966	0,892	0,376 '.'
						b_1	101,67	18,62	5,461	1,29 e – 06 ***
2	$LT = b_0.DEAP^{b1}$	46,14	2,058	239,449	245,471	b_0	82,215	31,052	2,648	0,0107*
						b_1	0,837	0,837	4,964	7,54 e - 06***
3	$LT = 10^{b_0}.DEAP^{b1}$	45,80	2,058	239,44	245,111	b_0	1,9149	0,164	11,674	2,85 e – 16 ***
						b_1	0,8375	0,1687	4,964	7,54 e - 06 ***
4	$LT = e^{b_0}.DEAP^{b_1}$	46,14	2,058	239,49	245,48	b_0	4,4098	0,377	11, 674	2,85 e- 13 ***
						b_1	0,8376	0,168	4,964	7,54 e – 06 ***
5	$LT = b_0.e^{-e^{b_1 - b_2 \cdot DEAP}}$	41,05	2,313	243,352	248,91	b_0	18,147	6,981	2,60	0,121***
						b_1	1,124	0,827	1,356	0,1809
						b_2	20,191	17,718	1,140	0,2597
6	$LT = b_0.b_1^{DEAP}$	44,39	2,078	240,485	246,507	b_0	5,1331	0,937	5,477	1,21 e – 06 ***
						b_1	4252,13	7141,7	0,595	0,554
7	$LT = b_0.\ DEAP^{\ b_1 \cdot DEAP}$	45,51	2,062	239,664	245,686	b_0	2,664	0,836	3,185	0,00242 **
						b_1	-6,506	1,308	-4, 974	7,26 e - 06 ***
8	$LT = b_0 \times b_1^{\ (\frac{1}{DEAP})}$	46,96	2,053	239,15	245,173	b_0	26,816	4,194	6,393	4,26 e – 08 ***
						b_1	0,923	0,015	60,88	< 2 e -16 ***
9	$LT = \frac{1}{b_0 + \frac{b_1}{DEAP}}$	45,86	2,056	239,35	245,37	b_0	0,0143	0,0141	1,014	0,315
						b_1	0,0069	0,0015	4,517	3,54 e – 05 ***
10	$LT = e^{bo + \frac{b1}{DEAP}}$	46,14	2,053	239,15	245,17	b_0	3,289	0,1564	21,028	< 2 e -16 ***
						b_1	-0,076	0,0164	-4,852	1,12 e - 05 ***
11	$LT = \frac{1}{b_0 + b_1.\ln DEAP}$	44,60	2,052	239,13	245,16	b_0	-0,132	0,0252	-5,239	1,01e-11 ***
						b_1	-0,095	0,0109	-8,712	1,04 e- 06 ***
12	$LT = \left(\frac{b_0 + b_1}{DEAP}\right)^2$	45,94	2,055	239,285	245,30	b_0	4,804	0,250	19,168	< 2 e -16 ***
						b_1	-0,131	0,025	-5,108	4,54 e- 06 ***
13	$LT = b_0.e^{DEAP \cdot b_1}$	44,39	2,078	240,48	246,50	b_0	0,937	0,937	5,477	1,21 e – 06 ***
						b_1	1,679	1,679	4,975	7,26 e – 06 ***
14	$LT = \left(\frac{b_0.DEAP}{b_1 + DEAP}\right)$	45,83	2,056	239,35	245,37	b_0	69,68	68,75	1,014	0,315
						b_1	0,481	0,581	0,829	0,411
15	$LT = \frac{DEAP}{b_0 + b_1.DEAP}$	45,86	2,056	239,35	245,37	b_0	0,006	0,001	4,517	3,54 e - 05 ***
						b_1	0,014	0,014	1,014	0,315
16	$LT = e^{bo + b1 \cdot DEAP}$	44,39	2,078	240,48	246,50	b_0	1,806	0,187	8,959	3,40e – 12 ***
						b_1	8,356	1,679	4,975	7,26e – 12 ***

*Significancia códigos 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' .* Donde LT: longitud total del culmo, b: coeficientes de regresión estimados, $DEAP$ diámetro del entrenudo a la altura del pecho, ln logaritmo natural y e base del logaritmo natural.

En la (Tabla 27) se presentan los modelos alométricos que fueron evaluados para las regresiones lineales y no lineales con las variables longitud y DEAP. De igual forma, en la figura 18, se muestra la dispersión de los puntos generado por cada modelo.

Figura 18. Dispersión de puntos en modelos de regresión de DEAP – Longitud Total para culmos de Guadua angustifolia en el CEVBA, La Rejoya, Popayán.



De acuerdo con los resultados se identificó que el coeficiente de determinación de los modelos de regresión evaluados para las variables longitud y diámetro del culmo expresan una relación directa y moderada, representadas en valores promedio de $R2$ = 0,44 indicando que el porcentaje de la variabilidad de la variable Longitud de culmo puede ser explicado por el modelo de regresión ajustado, además, se debe tener en cuenta que mientras más cercano el valor esté de 1, más preciso se considera el modelo (Rodríguez, 2005). En este contexto, los modelos 1, 4, 8 y 10 obtuvieron los valores mayores de ajuste 0.461, 0.4614, 0.469 y 0.446 respectivamente, estos valores son semejantes a los presentados por Camargo & Kleinn (2010), quienes reportan coeficientes de determinación de hasta 0.5, en los modelos para la relación longitud y diámetro en guaduales ubicados en el del eje cafetero colombiano.

Los datos reportados son similares a los encontrados por Malleux (2009), quienes encontraron gran dispersión de las observaciones entre los diámetros y las longitudes con respecto al modelo ajustado, en este estudio la ecuación lineal presentó el mayor valor de R^2 = 0.34 siendo una correlación relativamente baja, lo cual podría explicarse debido a la falta de manejo silvicultural, los cambios de la calidad de sitios y porque no existe una buena correspondencia entre diámetros con sus respectivas longitudes, lo cual los autores han encontrado que es una constante en este tipo de poblaciones.

Como se puede observar en la (Tabla 27), los modelos 1,5,6,9,14 y 15 no presentaron nivel de significancia estadística en el p-valor (< 0.05), es decir que se aceptó la hipótesis nula, indicando que los cambios en el valor de la variable predictora no se encuentran relacionados con cambios en la variable de respuesta, debido a lo anterior, estos modelos fueron descartados como sugiere Acuña, (2014). Asimismo, los modelos 2 y 7 tuvieron significancia alta por lo cual también fueron descartados para el análisis posterior, porque solo se tuvieron en cuenta aquellos modelos que presentaran una alta significancia.

El modelo lineal obtuvo alta significancia en el p-valor (< 0.05) y un coeficiente de determinación del 0.46, siendo similar con los resultados presentados por Camargo & Kleinn, (2010) quienes encontraron en el modelo lineal un R^2 de 0.462, estos autores reportan que el empleo de más variables independientes podría mejorar el ajuste y la precisión del modelo; sin embargo, se debe tener en cuenta que se aumentaría el esfuerzo y los costos para la realización del inventario y las mediciones, además es importante mencionar que el patrón de crecimiento de la Guadua es diferente de cualquier árbol y que su comportamiento es diferente respecto al ambiente debido a la alta variabilidad genética propia de la especie.

A pesar de los valores obtenidos, el modelo lineal no se tuvo en cuenta debido a que no presentó un p-valor (< 0.05) para el intercepto $b1$, por lo cual fue descartado. En este orden de ideas los modelos que se ajustaron mejor para la determinación de longitud a través del diámetro de la guadua en este estudio se presentan en la (Tabla 28).

Tabla 28. Modelos empleados para evaluación de variables longitud-diámetro en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán

No	Modelo	ANOVA			RSME	AIC	Normalidad
		SCR	CMR	Valor p			
3	$LT = 10^{1,914}.\ DEAP^{0,837}$	2,75	0,027	0,0001	2,058	239,449	0,214
4	$LT = e^{0,377}.DEAP^{0,168}$	2,38	0,035	0,0001	2,058	239,449	0,214
8	$LT = 26{,}816\,.\,0{,}923^{\ (\frac{1}{DEAP})}$	2,44	0,040	0,0001	2,052	239,151	0,291
10	$LT = e^{3,289+\frac{-0,076}{DEAP}}$	2,351	0,039	0,001	2,056	239,351	0,221
11	$LT = \frac{1}{-0{,}132 - 0{,}095\,.\ln DEAP}$	2,65	0,037	0,0001	2,052	239,138	0,265
12	$LT = \left(\frac{4{,}804 - 0{,}131}{DEAP}\right)^2$	2,02	0,031	0,0001	2,055	239,285	0,1664
13	$LT = 0{,}937.e^{DEAP\,.\ 1{,}679}$	2,12	0,022	0,0001	2,077	240,485	0,1664
16	$LT = e^{1,806+8,356 \times DEAP}$	1,154	0,019	0,0001	2,056	240,48	0,347

Donde $\boldsymbol{SCR}$: Suma de cuadrados de residuales, $\boldsymbol{CMR}$**:** Cuadrado medio, $\boldsymbol{RSME}$**:** error cuadrático medio y $\boldsymbol{AIC}$: criterio de información de Akaike.

De acuerdo con Mayer *et al*., (1994) se debe tener en cuenta la normalidad, como se observa en la tabla 28, todos los modelos cumplen con este supuesto además para el parámetro RMSE, se tiene en cuenta los modelos que obtuvieron menores valores, este parámetro junto al R^2 ayuda a la regresión como técnica de validación debido a que tienen una relación, valores de RMSE bajos implican un R^2 alto, pero las diferencias entre lo simulado por el modelo y lo observado crecen conforme los valores de la variable longitud de culmo aumentan, por lo cual se busca que los modelos tengan valores bajos en este parámetro, para el caso del estudio los modelos de regresión con mejor comportamiento fueron: 8,11 y 12 (Soto & González, 2019). Respecto al AIC y BIC los modelos que tuvieron menores valores fueron el 8 y 11.

Teniendo en cuenta todos los parámetros evaluados anteriormente, el modelo 8 fue el de mejor ajuste para la explicación de esta relación, este resultado concuerda con lo encontrado por Camargo y Kleinn (2010), quienes sugieren un modelo no lineal para la relación de estas variables. Al respecto, (Diéguez- Aranda *et al*., 2003) sugiere que es evidente que la longitud del culmo no depende solo del diámetro, si no de algunas variables del rodal y de las condiciones agroclimáticas del sitio en el que se encuentre desarrollando. Algunos autores señalan que para mejorar los valores de ajuste se emplean variables del rodal como: densidad y el número de entrenudos.

Es importante tener en cuenta, que no se encontraron referencias para aplicar estos modelos a Guadua, ni en otras especies de bambú en la región, debido a que los guaduales de Colombia tienden a tener alta densidad y particularidades únicas, además los modelos seleccionados no fueron validados porque la base de datos empleada es muy pequeña y se recomienda su utilización específicamente para la zona de la meseta de Popayán, Cauca, de acuerdo con lo sugerido por Quiñónez, (2012).

3.6.2 Ecuaciones para estimación de Biomasa. Los valores se situaron entre 0,06 a 0,14 ton/ha y 0,002 – 0,01 m^2 para las variables biomasa y área basal respectivamente (Tabla 29), los coeficientes de variación se ubicaron entre 13,87 a 25,28%, según la prueba de normalidad Kolmogorov, las dos variables presentaron una tendencia normal p α (0,05), razón por la cual pueden ser empleadas para la construcción de los modelos de regresión.

Tabla 29. Medidas resumen Biomasa (B) y Área basal (G) en culmos de *Guadua angustifolia*.

Variable	N	Media	Desviación estandar	Coeficiente Variación	Min	Max	p-valor
Biomasa	55	0,06	0,01	13,87	0,06	0,14	0,375
Área basal	55	0,01	2,0 E - 03	25,28	2,7e-03	0,01	0,103

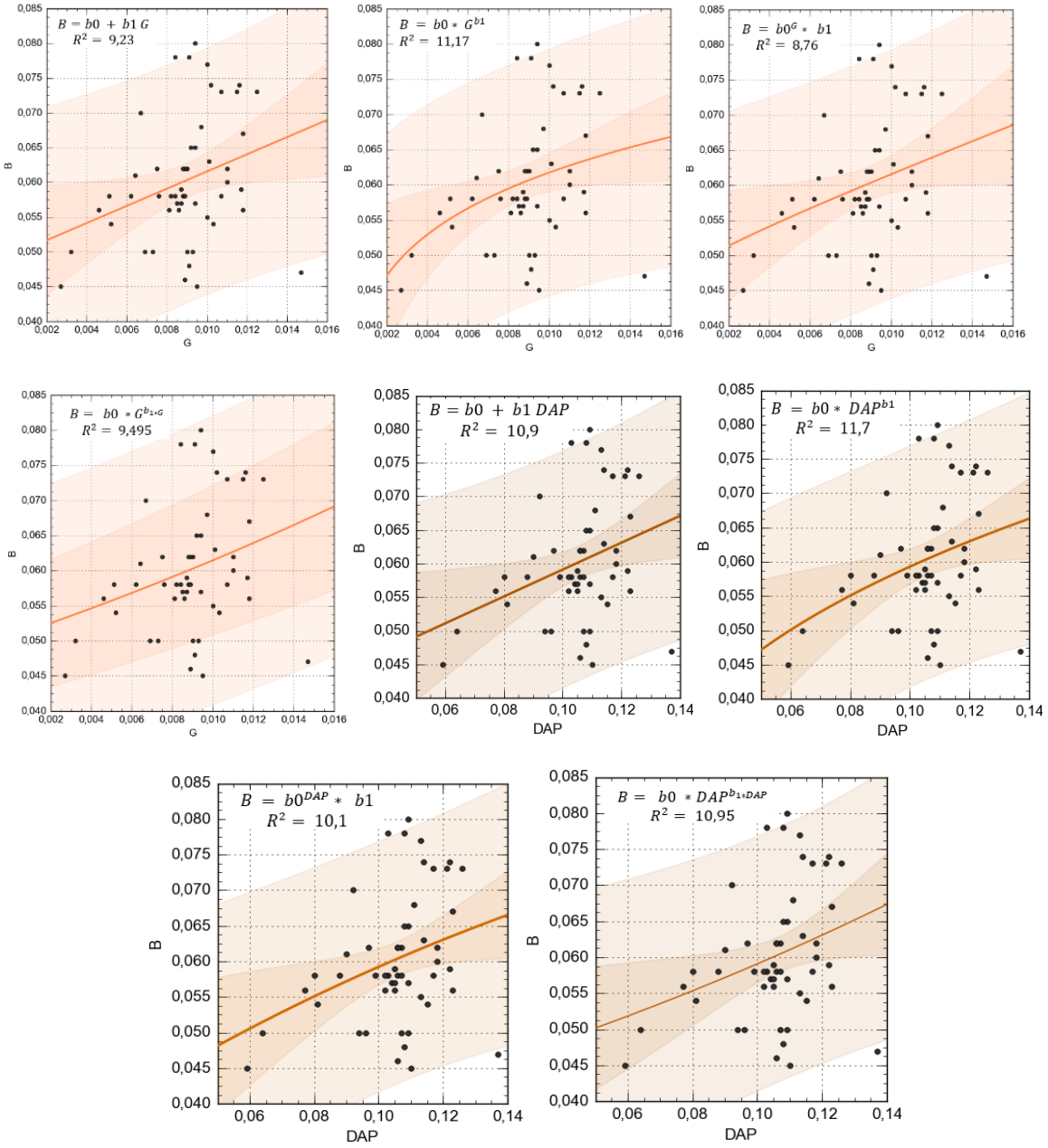
A continuación, (Tabla 30) se presentan los modelos alométricos que fueron evaluados para las regresiones lineales y no lineales con las variables Biomasa respecto al área basal y DEAP. De igual forma, en la (Figura 19), se muestra la dispersión de los puntos generados por cada modelo.

Tabla 30. Modelos alométricos B-G y B – DEAP en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán.

No.	Modelo	R^2	Error estándar	AIC	BIC	Coeficientes		E.E	t - valor	p- valor
17	$B = b_0 + b_0\, G$	9,233	0,0086	-342,292	-336,438	b_0	1,212	0,537	2,255	0,0285 *
						b_1	0,040	0,022	1,849	0,0704 '-'
18	$B = b_0 . G^{b_1}$	11,17	0,0085	-343,416	-337,561	b_0	0,132	0,043	3,030	0,00387**
						b_1	0,165	0,069	2,373	0,02151 *
19	$B = b_0{}^{G}.\ b_1$	8,760	0,0086	-342,024	-336,170	b_0	2,350e+08	2,143e+09	0,11	0,913
						b_1	5,067e-02	4,322e-03	11,72	5,87e-16***
20	$B = b_0 . G^{b_1 . G}$	9,495	0,0086	-342,44	-336,586	b_0	0,0482	0,00501	9,632	5,59 e- 13 ***
						b_1	-5,277	2,395	-2,2	0,0324 *
21	$B = b_0 + b_1\, DEAP$	10,90	0,0086	-343,019	-337,166	b_0	0,1998	0,0825	2,421	0,0191 *
						b_1	0,1958	0,1246	1,572	0,1223
22	$B = b_0 . DEAP^{b_1}$	11,17	0,0085	-343,416	-337,561	b_0	0,12690	0,03976	3,192	0,00244**
						b_1	0,33044	0,13923	2,373	0,02151 *
23	$B = b_0{}^{DEAP} . b_1$	10,10	0,0086	-342,792	-336,938	b_0	26,260	37,848	0,694	0,491
						b_1	0,0426	0,0066	6,444	4,44 e-08***
24	$B = b_0\, DEAP^{b_1 . DEAP}$	10,95	0,0085	-343,288	-337,434	b_0	0,0327	0,0085	3,836	0,000351 ***
						b_1	-2,572	1,0920	-2,355	0,022480 *

Donde LT: longitud total del culmo, b: coeficientes de regresión estimados, $DEAP$ diámetro del entrenudo a la altura del pecho, B:biomasa, G:área basal.

Figura 19. Dispersión de puntos para los modelos de regresión de B – G y B – DEAP en *Guadua angustifolia*, CEVBA.



De manera general la variable Biomasa (B) presentó una relación muy baja con las variables área basal y DEAP con coeficientes de correlación muy bajos, teniendo en cuenta lo citado por Justo, (2006), quien indica que cuanto más se aproxime el valor a la unidad, bien sea positivo o negativo, mayor correlación existirá entre las variables, asimismo la baja relación entre las variables tendría valores cercanos a 0 y se puede observar en las nubes gran dispersión en los puntos y mayor distancia de estos en la recta de regresión.

Los resultados muestran que los modelos presentaron bajo coeficiente de determinación los cuales fluctuaron entre 0.0923 a 0.1117 para la relación biomasa y área basal, en el caso de los modelospara biomasa y DEAP, los R^2 variaron entre 0.1010 a 0.1117, al respecto Guevara, (2014)

plantea que el coeficiente de determinación explica la asociación entre las variables e indica como es la dispersión de los residuos y la distancia con la recta de regresión, para estas variables la relación fue muy débil es decir que la biomasa del culmo no depende ni del DEAP, ni del área basal.

El modelo que mejor representó la relación $B - G$ en el estudio fue $B = b_0 \, . \, G^{b1}$ al presentar significancia alta con un p-valor (0,05) en todas las pruebas, este resultado difiere del planteado porFonseca y Rojas, (2016) quienes encontraron en *G. angustifolia y G. aculeata* para ecuaciones queincluyan el área basal con la biomasa un modelo lineal $B = 13.8618 + 1.85367 \, . \, G$ con R^2 de 70%,sin embargo, los autores señalan que es común encontrar estudios con coeficientes de determinación bajos, lo cual podría explicarse por el comportamiento biológico de la especie, porque los rebrotes podrían llegar a tener el mismo diámetro y biomasa en menos de un año que los maduros y sobremaduros dificultando el ajuste del modelo, asimismo sugieren que se podría explicar variabilidad observada en la biomasa si se utilizan otras variables predictoras como la longitud total.

En este sentido, Monroy & Návar, (2004) indican que en la especie *G. aculeata* la regresión lineal fue la de mejor estimación para la biomasa de la especie debido a que la mayor parte de los coeficientes presentaron significancia estadísticamente alta, por lo anterior esta ecuación se recomendó para la estimación de la biomasa de los componentes y del árbol de esta especie, asimismo los autores afirman que la biología, ecología y silvicultura de la especie influyen directamente en el comportamiento de la especie y deben tenerse en cuenta estos aspectos para futuras investigaciones.

En la relación DEAP- Biomasa el modelo de mejor desempeño fue $B = b_0 \, . \, DEAP^{b1}$, siendo altamente significativo con los parámetros evaluados, estos resultados difieren de los postulados por García *et al*., (2015), quienes reportaron valores altos de coeficientes de determinación 0.9 en estudios con *Guadua sarcocarpa* en Uyucali en la Amazonia Peruana empleando el modelo lineal $B = -3.614311904 + 2.558090732 \, . \, DEAP$, los autores se basaron respecto a la morfología del fuste de forma cilíndrica de la guadua, en donde el volumen y la biomasa crecen proporcionalmente donde la ecuación lineal representaría la mejor relación con la biomasa, además señalan que para los modelos es recomendable el empleo del DEAP debido a que no se encontraron diferencias empleando largo de entrenudo disminuyendo tiempo y costos en el levantamiento en campo.

Fonseca y Rojas, (2016) sugieren que debido a las características únicas de los guaduales es difícil el empleo de modelos alométricos en estas variables, porque siempre hay mayor número de culmos en estado maduro y sobremaduro los cuales tienen menor biomasa dentro de sus paredes en comparación con los de estado verde, por lo cual los resultados tienden a ser inconclusos. En este contexto, Pita & Pertega (2010) sugieren el uso de métodos no paramétricos con el fin de comprobar si las variables tienden a elevarse conjuntamente o a moverse en direcciones diferentes.

3.6.3 Ecuaciones Longitud – DEAP para volumen. Los resultados (Tabla 31) indican que las variables volumen neto y aparente presentaron una tendencia normal p α 0,05 por lo cual pueden ser empleadas para la construcción de una regresión con las variables LT y DEAP.

Tabla 31. Medidas resumen para volumen neto y aparente en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán

Variable	N	Media	Desviación Estándar	W*	p-valor
V. Neto	62	0,04	0,02	0,95	0,1379
V. Aparente	62	0,06	0,02	0,98	0,8667

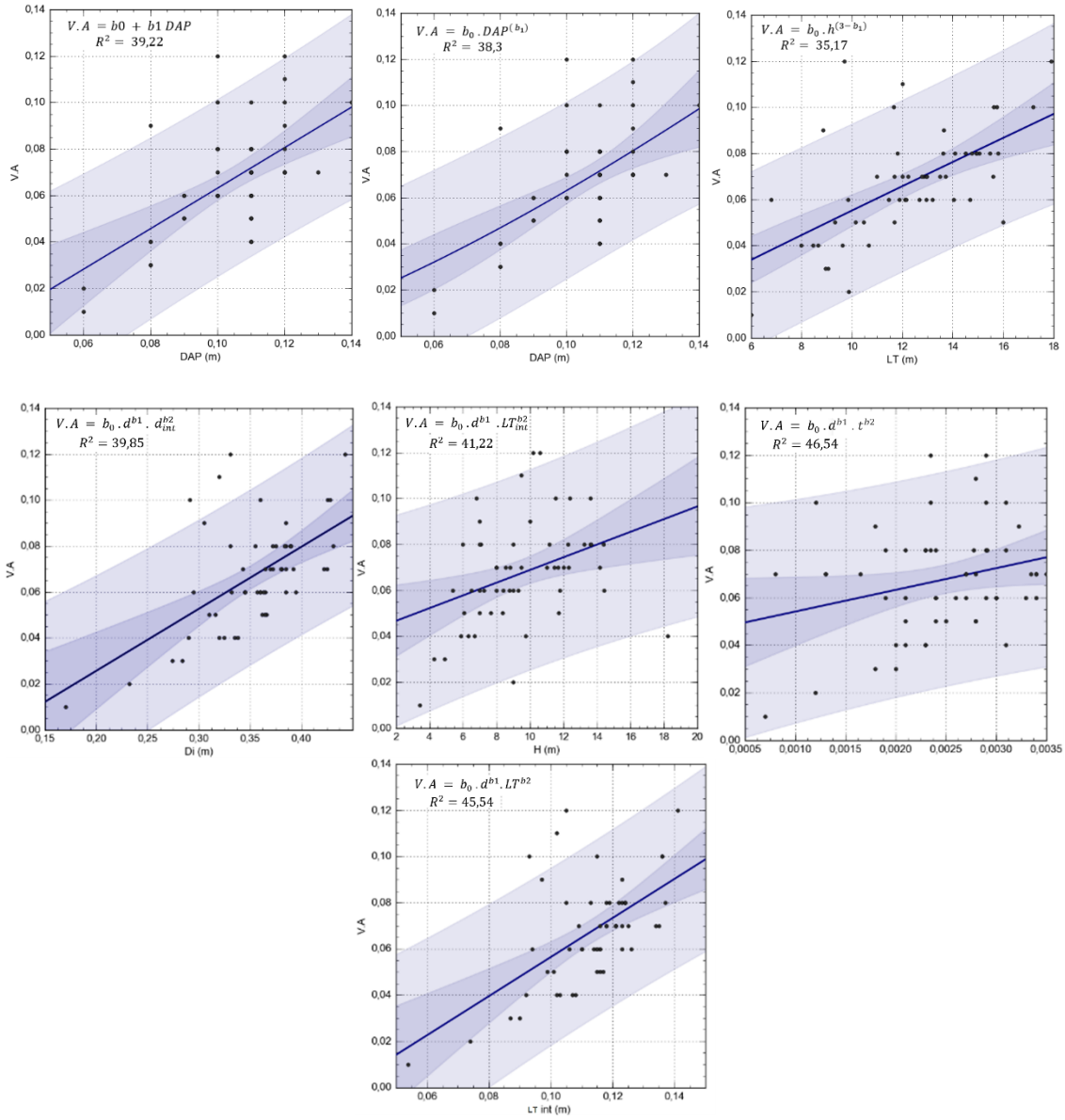
A continuación, (Tabla 32 y 33) se presentan los modelos alométricos que fueron evaluados para las regresiones lineales y no lineales para la variable volumen aparente y neto respectivamente. De igual forma, en las figuras 20 y 21, se muestra la dispersión de los puntos generado por cada modelo.

Tabla 32. Modelos empleados relación Volumen Aparente - DEAP y LT en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán

No.	Modelo	R^2	Error estándar	AIC	BIC	Coeficientes		E.E	t – valor	p- valor
25	$V.A = b_0 + b_1\ DAP$	39,22	0,017	-283,97	-277,95	b_0	-0,030	0,016	-1,837	0,071 '.'
						b_1	0,934	0,159	5,849	3,15 e – 07 ***
26	$V.A = b_0 . DAP^{(b_1)}$	38,30	0,017	-283.145	-277.123	b_0	1,704	1,129	1,510	0,137
						b_1	1,7437	0,298	4,817	1,26 e - 05***
27	$V.A = b_0 . LT^{(3-b_1)}$	35,17	0,018	-280.428	-274.406	b_0	0,0067	0,0032	2,10	0,0405 *
						b_1	2,0854	0,1848	11,28	1,05 e - 15 ***
28	$V.A = b_0 . d^{b1} .\ d_{int}^{b2}$	39,85	0,015	-276,62	-268,59	b_0	1,88	1,36	1,38	0,1743
						b_1	0,74	0,74	0,47	0,1227
						b_2	0,76	0,76	0,50	0,1324
29	$V.A = b_0 . d^{b1} . LT_{int}^{b2}$	41,22	0,016	-279,23	-271,20	b_0	0,48	0,38	1,26	0,2124
						b_1	1,13	0,30	3,75	0,0004 **
						b_2	0,27	0,13	2,10	0,040 *
30	$V.A = b_0 . d^{b1} . LT^{b2}$	45,54	0,014	-286,20	-278,17	b_0	0,09	0,09	0,99	0,3290
						b_1	0,86	0,31	2.77	0,0079 **
						b_2	0,66	0,19	3,41	0,0013 **
31	$V.A = b_0 . d^{b1} . t^{b2}$	46,54	0,013	-274,48	-266,45	b_0	1,16	1,01	1,01	0,2530
						b_1	1,36	0,32	4,24	0,0001 **
						b_2	-0,04	-0,04	-0,28	0,7782

Donde, LT: longitud del culmo, $LT_{int:}$ longitud en el primer entrenudo, b: coeficiente de regresión estimado, d: diámetro del entrenudo a la altura del pecho, $d_{int:}$ diámetro del entrenudo a la altura del primer entrenudo y t: espesor de la pared del culmo.

Figura 20. Nube de puntos para los modelos de regresión de V.A - DEAP y LT en *Guadua angustifolia*, CEVBA.



Según los resultados las variables Volumen aparente, DEAP y LT gráficamente presentaron una alta dispersión (Figura 23) lo cual es un indicador que las variables no se relacionaron de forma estrecha, además se observa que la relación entre las variables es directamente proporcional (Justo, 2006). Las variables volumen aparente con DEAP y LT presentaron coeficientes de determinación que fluctuaron desde 0.3537 hasta 0.46 indicando que existe relación entre estas tres variables (Lahura 2018).

Los modelos 26,28,29,30 y 31 no presentaron diferencias significativas, el modelo 25: $V.A = b_0 + b_1 DEAP$ fue significativo a un nivel de confiabilidad del 0,10 y el modelo 27: $V.A = b_0 . LT^{(3-b1)}$ presentó diferencias altamente significativas para todos los parámetros, a pesar de que tuvo el menor R^2 de los modelos evaluados. Estos resultados difieren de los planteados por Camargo & Kleinn, (2010),

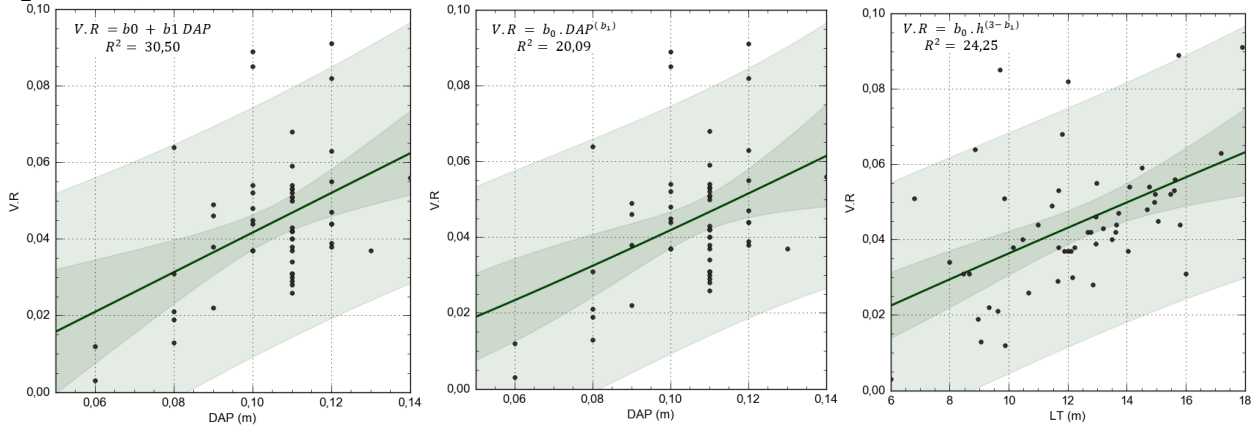
quienes describieron que el (Modelo 6) *Schumacher-Hall* para estas variables obtuvo un R^2 =0.939, los autores afirman que el diámetro y la longitud del culmo geométricamente son determinantes para el cálculo del volumen en el culmo y al incluir estas variables dentro de las regresiones el ajuste de los modelos será más fiable. Al respecto Lobovikov *et al*., (2007) señalan que las variables predictoras diámetro del entrenudo a la altura del pecho y longitud total se podrían emplear para la estimación de volumen del culmo, el autor también denota que los modelos en donde se tiene en cuenta la altura tienden a tener un mayor porcentaje de error.

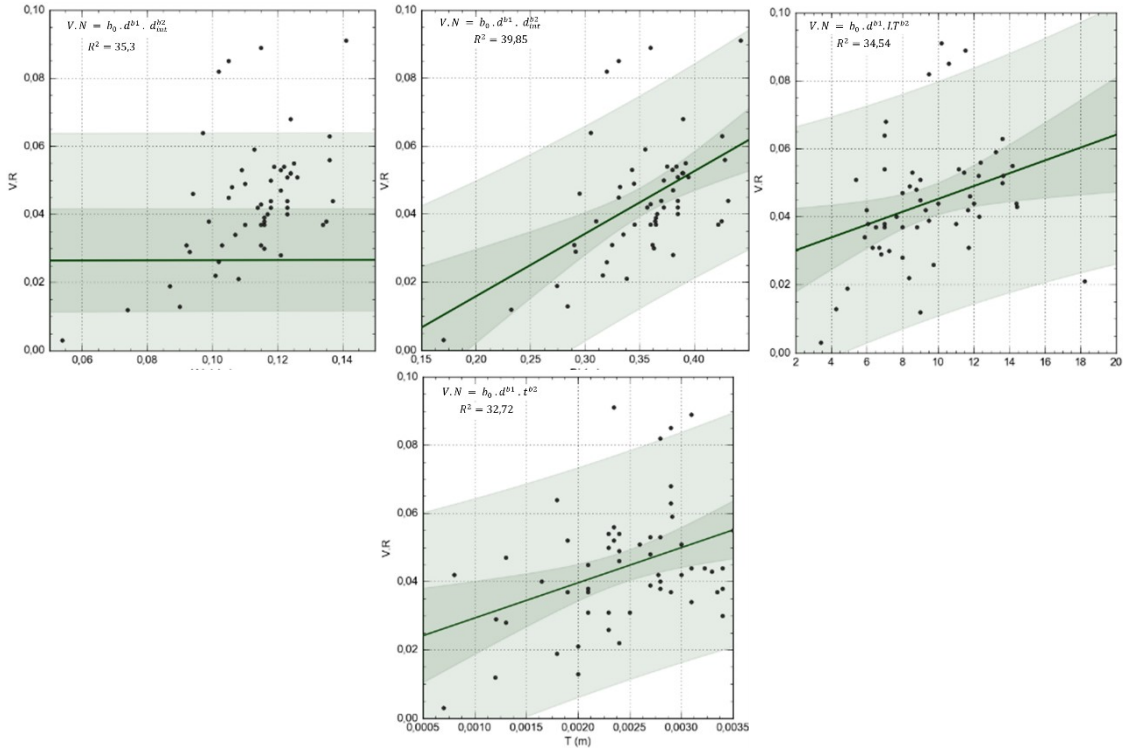
Tabla 33. Modelos empleados relación Volumen neto - DEAP y longitud en *Guadua angustifolia*, CEVBA La Rejoya, Popayán

No.	Modelo	R^2	Error estándar	AIC	BIC	Coeficientes		E.E	t - valor	p- valor
32	$V.N = b_0 . DEAP^{(b_1)}$	20,09	0,016	-278,060	-272,207	b_0	0,4974	0,4451	1,117	0,2692
						b_1	1,0636	0,4024	2,643	0,0109*
33	$V.N = b_0 + b_1 \ DEAP$	30,50	0,016	-278,201	-272,348	b_0	-0,006	0,0163	-0,406	0,68611
						b_1	0,493	0,1538	3,209	0,00233**
34	$V.N = b_0 . LT^{(3-b_1)}$	24,25	0,018	-280,428	-274,406	b_0	0,0042	0,0026	1,612	0,113 '. '
						b_1	2,0640	0,2406	8,575	1,36 e - 11 ***
35	$V.N = b_0 . d^{b1} . d_{int}^{b2}$	39,85	0,017	-278,46	-270,65	b_0	0,44	0,48	0,91	0,3655
						b_1	0,69	0,72	0,96	0,3428
						b_2	0,69	0,73	0,95	0,3466
36	$V.N = b_0 . d^{b1} . LT_{int}^{b2}$	35,32	0,01	-281,56	-273,75	b_0	0,1	0,11	0,95	0,3601
						b_1	0,72	0,4	1,78	0,0816 *
						b_2	0,38	0,17	2,24	0,0295
37	$V.N = b_0 . d^{b1} . LT^{b2}$	34,54	0,014	-280,51	-272,70	b_0	0,04	0,06	0,69	0,4941
						b_1	0,62	0,44	1,39	0,1695
						b_2	0,57	0,27	2,11	0,0396 *
38	$V.N = b_0 . d^{b1} . t^{b2}$	32,72	0,017	-288,83	-290,80	b_0	1,31	1,54	0,85	0,3980
						b_1	0,81	0,43	1,87	0,0669 '. '
						b_2	0,26	0,18	1,42	0,1607

Donde, LT: longitud del culmo, $LT_{int:}$ longitud en el primer entrenudo, b: coeficiente de regresión estimado, d: diámetro del entrenudo a la altura del pecho, $d_{int:}$ diámetro del entrenudo a la altura del primer entrenudo y t: espesor de la pared del culmo.

Figura 21. Dispersión de puntos para los modelos de regresión de VN - DEAP y LT en *Guadua angustifolia*, CEVBA.





Los resultados de las regresiones de Volumen neto, DEAP y LT a pesar de que tuvieron una relación directa presentaron una nube con alta dispersión (Figura 21) demostrando la razón por la que tuvieron coeficientes de determinación con valores de 20 hasta 39%, donde se afirma que, aunque existe influencia entre estas tres variables la notación es baja

De los modelos estudiados el 32,33,34,35,36 y 37 no presentaron diferencias altamente significativas, sin embargo, el modelo 34: $V.R = b_0 . LT^{(3- b1)}$ fue el único que presentó significancia en la prueba de t, para un nivel de confiabilidad del 0,10, lo anterior se podría explicar debido a que no se presentó una alta relación entre las variables anteriores. Al respecto Prodan *et al.,* (1997) indican que para los modelos de volumen en donde únicamente se usa el diámetro como predictora es necesario que la relación entre el diámetro del culmo y la altura del culmo tenga una correlación del 90% paraobtener resultados fiables, lo cual se da en poblaciones homogéneas y pequeñas.

En el cálculo del volumen neto el espesor de la pared es indispensable, debido a que este disminuye al igual que el diámetro desde la base hasta la parte superior, esta tendencia hace parte de la naturaleza de la especie debido que geométricamente el culmo es considerado un cono, sin embargo, se presenta variabilidad dentro de los individuos lo que provoca mayor dificultad en el ajuste en los modelos (García, 2004). En este sentido, Kleinn (2006) señala la necesidad de tomar la información correspondiente a las diferentes formas que se encuentran desde la base hasta el ápice de cada uno de los culmos, lo cual podría contribuir en la obtención de resultados más verídicos.

4 CONCLUSIONES

En el censo del guadual se identificaron 670 culmos en los tres bosques, los guaduales 1 y 2 presentaron una estructura similar con un número mayor de individuos en estado sobremaduro producto de la falta de intervención silvicultural, en contraste con el guadual 3 donde sobresalieron los culmos maduros y se caracterizaron por tener una estructura horizontal de 10% renuevos, 25% verdes y 65% maduros, parámetros que los califica como sostenibles ambiental y económicamente.

En los guaduales 1 y 2 se observó una alta densidad, por lo que resulta necesario el aprovechamiento, con el fin de que los culmos tengan mayor espacio para poder desarrollarse de forma adecuada para que alcancen características productivas ideales.

Para el aprovechamiento de los bosques de guadual se estableció un Índice de cosecha del 35% de acuerdo con la estructura y disponibilidad actual de cada guadual, el RGI determinó que esta intensidad de cosecha será adecuada hasta la realización de la segunda entresaca y se espera que en un 1 año los culmosverdes pasen a estado maduro, en este orden de ideas la 1° y 2° cosecha será de los culmos en estado sobremaduro que tiene como objetivo mejorar la dinámica ecológica dentro del bosque.

Las pruebas de laboratorio arrojaron valores promedios de *CH*= 43,06% en los guaduales, donde los guaduales 2 y 3 G2-G3 tuvieron los mayores valores, mientras que para la biomasa del culmo se reportó un valor promedio en los guaduales de 0,06 ton, donde G1 presentó los mejores resultados, manifestando características ideales para el almacenamiento de altos volúmenes de agua y de biomasa debido a la estructura morfológica de la guadua que podría servir como una herramienta clave ante el cambio climático.

Los valores promedios de densidad básica para el material en las secciones basal, media y apical del culmo fueron 0,59; 0,57; 0,56 g/cm^3, respectivamente donde G1 destacó en las tres variables con valores superiores, por otro lado, estos resultados identificaron un comportamiento esperado de la especie en el cual se disminuye la densidad del culmo desde la base hacia el ápice, ratificando su importancia como materia prima de las comunidades de la región al aprovechar todas las partes de la estructura en diferentes usos, además de ser asequible por su bajo precio.

La relación entre la longitud total y el diámetro a la altura del entrenudo es R^2=0,4 indicando que son variables que tienen dependencia la una de la otra, por lo que los modelos ajustados podrían ser utilizados en diferentes guaduales para una predicción de la longitud del culmo. En este orden de ideas el modelo de raíz $LT = 26{,}816 \,.\, 0{,}923^{\left(\frac{1}{DEAP}\right)}$ fue el que mejor explico los parámetros evaluados.

Las variables área basal y el DEAP con la biomasa tuvieron un R^2 promedio de 0,10 manifestando que son variables que tienen una relación muy baja, asimismo los modelos que mejor expresaron la relación: biomasa con DEAP fue: $B = 0{,}126 \,.\, DEAP^{0{,}3304}$ y para biomasa con área basal fue: $B = 0{,}0482 \,.\, G^{-5{,}277\,.\mathrm{G}}$ y al fueron altamente significativos en las pruebas realizadas, sin embargo se hace necesario intensificar el muestreo y el empleo de más variables para llegar a resultados de mayor confiabilidad.

El volumen aparente y el DEAP tuvieron un R^2 de 0,35 en promedio, expresando una relación significativa, el modelo $V.A = 0{,}0067 \,.\, LT^{(3-\,2{,}0854)}$presentó las mejores características para las variables evaluadas y podría ser empleado como herramienta útil en los inventarios y en la gestión de los rodales de guadua al constituir una fuente de información para el cumplimiento de los objetivos de la evaluación de los recursos forestales mundiales propuesto por la FAO.

Respecto al volumen neto y el DEAP, el modelo $V.N = 0{,}0042 \,.\, LT^{(3-\,2{,}064)}$ tuvo un R^2 =0,24, no obstante, esta ecuación podría ser empleado para la planificación y el manejo de los rodales de guadua en la región de la meseta de Popayán.

5 RECOMENDACIONES

Trascurridas las cosechas propuestas para los guaduales del CEVBA, realizar nuevamente un censo con el fin de ajustar los parámetros para el manejo silvicultural de los 3 guaduales.

Realizar el censo para la finca la Sultana con el fin de obtener información actual acerca del estado de los guaduales de las fincas de la Universidad.

Realizar la toma de la biomasa subterránea, de hojas, frutos y ramas para llegar a resultados más concluyentes

Emplear mayor número de ecuaciones con el fin de comparar y proporcionar información con alto grado de veracidad.

BIBLIOGRAFÍA

ACUÑA EDGAR. (2014) ESTADÍSTICA APLICADA I. Universidad de Puerto Rico Recinto. Pruebas no paramétricas. Capítulo 11. Puerto Rico.

ACOSTA-LEAL, D., GONZÁLEZ-MARTÍNEZ, C., PÉREZ, C. C., & CASTIBLANCO, D. F. (2021). Condiciones edafológicas y climáticas para el crecimiento de Guadua angustifolia Kunth: análisis comparativo entre Colombia y China. *Daniel Acosta-Leal*, 54.

ACOSTA-MIRELES, M., VARGAS-HERNÁNDEZ, J., VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, A., & ETCHEVERS-BARRA, J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, *36*(6), 725-736.

AÑAZCO, M. (2013). Estudio de vulnerabilidad del bambú (guadua angustifolia) al cambio climático. *Quito, Ecuador: Red Internacional del Bambú y Ratán INBAR*.

ARAUJO ESPINOZA, D. L. (2015). Propagación vegetatica de Dendrocalamus asper (Schult. Schult. f.) Backer ex K. Heyne y *Guadua angustifolia* Kunth establecidas en campo definitivo, Tulumayo-Tingo María.

ARBELAEZ A. A., RODRIGUEZ S., HURTADO A., (2011) Investigaciones sobre *Guadua angustifolia* Kunth realizadas en Colombia. (1950-2000). Universidad nacional de Colombia, Sede Medellín. Facultad de Ciencias Agropecuarias y departamento de bibliotecas corporación autónoma regional del quindio (CRQ). Medellín, Colombia.

BENÍTEZ, C (2015). Centro de productividad de caña Guaua para el Cantón La Concordia, Provincia de Santo Domingo de Los Tsáchilas. Trabajo de grado pregrado. Quito, Ecuador: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

BRICEÑO E, E. (2019). Modelos ajustados para biomasa de culmos de Guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) individuales en rodales manejados en el sur de Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*, *32*(2), 3-17.

BOLAÑOS GUETSHY YOHANNA; FEUILLET CAROLINA; CHITO EDITH; MUÑOZ EDUARD Y RAMÍREZ BERNANDO. (2010) Vegetación, estructura y composición de un área boscosa en el jardín Botánico; Álvaro José Negret, vereda La Rejoya, Popayán- Cauca. Boletín Científico del Centro de Museos de Historia Natural de la Universidad de Caldas, vol. 14, no. 19, p. 38.

CAMACHO, M & DE LA CRUZ, L (2016). Diagnostico situacional de la producción de bambú *Guadua angustifolia K*, en el distrito de La Florida, de la provincia de San Miguel, Región Cajamarca. Tesis para optar por el título de Ingeniero Agrónomo. Lambayaque, Perú: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo

CAMARGO, J. C., RODRÍGUEZ, J. A. & ARANGO A. M. (2010). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera. Revista Recursos Naturales y de Ambiente. Comunicación Técnica. 61; pp. 86 – 94. CATIE, Turralba, Costa Rica.

CAMARGO, J. C., RODRÍGUEZ, J. A., & ARANGO, A. M. (2019). Crecimiento y fijación de carbono en una plantación de guadua en la zona cafetera de Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, (61).

CAMARGO, J. C., MORALES, T., & GARCÍA, J. H. (2008). *Mensura e inventario forestal para la planificación y manejo sostenible de bosques Guadua* (No. 634.9285 C172m). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira (Colombia). Facultad de Ciencias Ambientales Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Pereira (Colombia) COLCIENCIAS, Bogotá (Colombia).

CAMARGO GARCÍA, J. C., GARCÍA SIERRA, J. H., & MORALES PINZÓN, T. (2006). Bases para la planificación y manejo silvicultural de bosques de guadua: una aplicación a nivel de finca en la zona cafetera de Colombia (No. 634.9509861 C287). COLCIENCIAS, Bogotá (Colombia) Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira (Colombia) Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Pereira (Colombia).

CAMARGO, J. C. (2004). Silvicultura y productividad de la Guadua angustifolia en la Zona Cafetera de Colombia. In *Memoria del Simposio International Guadua* (pp. 31-40).

CAMARGO GARCÍA, J. C., & KLEINN, C. (2010). Curvas de longitud y funciones de volumen para guadua Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) para la región cafetera de Colombia. Revista Europea de investigación forestall, 129(6), 1213-1222.

CARDONA, A. (2012). Hacia el fortalecimiento del comercio de la guadua en Colombia. Revista Recursos Naturales y Ambiente Número 65-66 (Marzo-Agosto 2012), páginas 6-9.

CARDONA MADARIAGA, D. F., GONZÁLEZ RODRÍGUEZ, J. L., RIVERA LOZANO, M., & CÁRDENAS VALLEJO, E. (2013). *Inferencia estadística Módulo de regresión lineal simple*. Editorial Universidad del Rosario.

CASTAÑO NIETO, F. (2004). Modelo de núcleo productivo de la guadua cuenca hidrográfica del río Guadalajara Buga-Colombia. Fundaguadua, Buga

CLAYTON, W.D.; VORONTSOVA, M.; HARMAN, K. & WILLIAMSON, H. (2002) onwards. World Grass Species: Descriptions, Identification, and Information Retrieval.

CANCINO CANCINO, J. O. (2012). *Dendrometría básica*. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente.

CHARPENTIER SALAZAR G. (2018) Guadua Angustifolia en zonas rurales de Costa Rica. Manual para el manejo agronómico y usos del bambú *Guadua Angustifolia* en zonas rurales de Costa Rica Ministerio de Agricultura y Ganadería. Costa Rica

CÓRDOBA, G. A. R., CALDERÓN, D. S. M., & ROJAS, W. S. M. (2018). Cuantificación de biomasa aérea utilizando medidas dasométricas para la *Guadua angustifolia* Kunth, en la cuenca hidrográfica del río Guarapas municipio de Pitalito Huila. *Documentos de Trabajo ECAPMA*, (2). Colombia.

DIÉGUEZ-ARANDA, U., BARRIO, M., CASTEDO, F., RUIZ GONZÁLEZ, A.D., ÁLVAREZ TABOADA, M.F., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G., ROJO, A. (2003). Dendrometría. Editorial Mundi-Prensa y Fundación Conde del Valle de Salazar. 325 p. Madrid, España.

GARCÍA, J. C. C., & KLEINN, C. (2010). Length curves and volume functions for guadua bamboo (Guadua angustifolia Kunth) for the coffee region of Colombia. *European journal of forest research*, *129*(6), 1213-1222. Pereira, Colombia.

GARCÍA-SORIA, D., ABANTO-RODRIGUEZ, C., & DEL CASTILLO-TORRES, D. (2015). Determinación de ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa aérea de *Guadua sarcocarpa.* Londoño & PM Peterson de la comunidad nativa Bufeo Pozo, Ucayali, Perú. *Folia Amazónica*, *24*(2), 39-44. Perú.

GARCÍA J. H. (2004) Definición de áreas óptimas de calidad de guadua (Guadua angustifolia Kunth), orientada a satisfacer las necesidades del mercado. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica de Pereira, p 110. Colombia.

GUTIÉRREZ-VÉLEZ, V. H., & LOPERA ARANGO, G. J. (2002). El árbol de área basal promedia como predictor del volumen por usos del rodal. *Faculty/Researcher Works*.

ESPINOZA PÉREZ, D. C., & de Agrocadenas, O. (2003). La cadena de la guadua en Colombia.

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y DESARROLLO RURAL. Observatorio Agrocadenas Colombia. Documento de Trabajo No.35. Bogotá, Colombia.

FLORES DE MELO, A. W. (2017). Alometria de Árvores e Biomassa Florestal na Amazônia Sul-Ocidental. Tesis doctoral. Instituto nacional de Pesca de la Amazonía. Programa de Posgrados de Ciencias Forestales Tropicales. Manaus, Amazonas, Brasil. Agosto 2017. Brasil.

FORERO, S. P., SANTOS, L. N. S., CASTAÑEDA, H. J. A., & MADRIGAL, M. A. S. (2018). Captura de carbono en biomasa en plantaciones forestales y sistemas agroforestales en Armero-Guayabal, Tolima, Colombia. *Revista de investigación agraria y ambiental*, *9*(2), 121-134. Tolima, Colombia.

FONSECA, W., & ROJAS, M. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, *20*(38), 85-98.

GÓMEZ C. S. E. & SALAMANCA A. M. T. (2015). Caracterización del bosque natural en los agroecosistemas de producción cafetera en el altiplano de Popayán, departamento del Cauca. Tesis Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad del Cauca. Popayán, Cauca.

GONZÁLEZ, M. G., & TAM, C. P. T. (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú Guadua Angustifolia Kunth. *Scientia et Technica*, *19*(3), 245-250. Bogotá, Colombia.

GUEVARA FERNÁNDEZ, D. A. (2014). Alcances de la responsabilidad civil, en la prestación de servicios de turismo en el noroccidente de la provincia de Pichincha; caso práctico de estudio alojamiento en la localidad de Mindo (Bachelor's thesis, PUCE).

ICONTEC (2007). NORMA TÉCNICA NTC COLOMBIANA 5525. Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia* Kunth en Colombia.

JARAMILLO RÍOS, C. F., LONDOÑO OSPINA, I. T., & CAMARGO GARCÍA, J. C. (2004). *Conceptos básicos para el manejo silvicultural de la guadua (Guadua angustifolia Kunth) en el eje cafetero de Colombia* (No. 634.9509861 J37). Grupo de Investigación en Gestión de Agroecosistemas Tropicales Andinos, Pereira (Colombia) Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira (Colombia) COLCIENCIAS, Bogotá (Colombia).

JOAQUÌ ORTEGA, F., & VILLARREAL ARTUNDUAGA, J. R. (2014). Caracterización forestal y productiva de la guadua *Guadua Angustifolia* Kunth, en los municipios de Saladoblanco y Timaná al sur del departamento del Huila.

JUSTO, F. C. (2006). Relación entre las variables autoconcepto y creatividad en una muestra de alumnos de educación infantil. *Revista electrónica de investigación educativa*, *8*(1), 1-16.

KLEINN C, MORALES D (2006) An inventory of Guadua (Guadua angustifolia) bamboo in the coffee region of Colombia. Eur J For Res 125(4):361–368. doi:10.1007/s10342-006-0129-3.

LAHURA, E. (2018). *El coeficiente de correlación y correlaciones espúreas* (Vol. 218). Pontificia Universidad Católica del Perú, Departmento de Economía. 2003. Reeditado

LÁZARO LEÓN, K. C., GONZÁLES MORA, H. E., & CÁRDENAS OSCANOA, A. J. (2016). Propiedades mecánicas del material compuesto elaborado con bambú (Guadua angustifolia Kunth) y polipropileno. Revista mexicana de ciencias forestales, 7(38), 95-110.

LOBOVIKOV M, PAULDEL S, PLAZZA M, REN H, WU J (2007) World bamboo resources. A thematic study prepared in the framework of the global forest resources assessment 2005. Non wood forest products 18. International network for bamboo and rattan (INBAR) and food and agriculture organization of the United Nations (FAO). Rome, p 73.

LONDOÑO, X., CAMAYO, G. C., RIAÑO, N. M., & LÓPEZ, Y. (2002). Characterization of the anatomy of *Guadua angustifolia* (Poaceae: Bambusoideae) culms. *Bamboo Science and Culture*, *16*(1), 18-31.

LÓPEZ HOYOS, J. L. (2020) Caracterización biológica y productiva de razas de gusano de seda *Bombyx mori* L., para el programa de mejoramiento de sericultura caucana. Tesis Ingeniería Agropecuaria, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad del Cauca. Popayán, Cauca.

MALLEUX, J. (2009). Promoción de la rehabilitación, manejo y uso sostenible de los bosques tropicales de Bambú en la región Noroccidental del Perú: Inventario de bosques de bambú en el ámbito del proyecto PD4287. Perú.

MAYER, D.G., M.A. (1994) Stuart, and A.J. Swain. Regression of real word data on model output: an appropiate overall test of validity. Agric.

MÉNDEZ PEDROZA, N. M. (2014). Trabajo de grado Doctorado “Diagnóstico de guaduales y propuesta de un modelo de ordenamiento forestal sostenible productivo para el manejo e industrialización de la guadua (*Guadua angustifolia* Benth), con participación comunitaria en la Cuenca hidrográfica del río Guarapas, zona sur del departamento del Huila, Colombia.

MEJÍA GALLÓN, M. N., & MORENO ORJUELA, R. D. (2013). Estado del Arte de la Cadena de la Guadua en Colombia 2003-2012.

MONROY RIVERA, C., & NÁVAR CHÁIDEZ, J. D. J. (2004). Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Muell. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques Volumen 10, número 2*.

MONTEALEGRE ROJAS, W. S., & MOLINA CALDERÓN, D. S. (2016). Cuantificación de biomasa aérea utilizando medidas dasométricas para la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth) en la cuenca hidrográfica del río Guarapas en el municipio de Pitalito Huila, como aporte a la cuantificación de captura de carbono orgánico en guaduales.

NOVALES, A. (2010). Análisis de regresión. *Universidad Complutense de Madrid: Madrid, Spain*. Estadística Informática: casos y ejemplos con el SPSS. Capítulo 4, 116. España

NOVALES. A (2016). Estimación de modelos no lineales. Departamento de Economía Cuantitativa Universidad Complutense. *Universidad Complutense de Madrid: Madrid, Spain.*

PELÁEZ, I. M. (2016). Modelos de regresión: lineal simple y regresión logística. *Revista Seden*, *14*, 195-214.

PEDROZA, N. M. M. (2016). *Diagnóstico de guaduales y propuesta de un modelo de ordenamiento forestal sostenible productivo para el manejo e industrialización de la guadua (Guadua angustifolia kunth), con participación comunitaria en la cuenca hidrográfica del río guarapas, zona sur del departamento del Huila (Colombia)* (Doctoral dissertation, Universidad Católica de Ávila).

PICARD, N., SAINT-ANDRÉ, L., & HENRY, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción.

PITA FERNÁNDEZ S., PÉRTEGA DÍAZ S. Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complexo Hospitalario Juan Canalejo. A Coruña (España). *Cad Aten Primaria*, *10*, 59-63. Actualización 30/03/2010.

PRODAN M, PETERS R, COX F, REAL P (1997) Mensura forestal. GTZ. IICA. Series de investigación y educación en desarrollo sostenible, p 560.

QUIÑÓNEZ BARRAZA, G., CRUZ COBOS, F., VARGAS LARRETA, B., & HERNÁNDEZ, F. J. (2012). Estimación del diámetro, altura y volumen a partir del tocón para especies forestales de Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *3*(9), 23-39.

RAWAT, R.S., ARORA, G., RAWAT, V.R.S., BORAH, H.R., SINGSON, M.Z., CHANDRA, G., NAUTIYAL, R. AND RAWAT, J. (2018). Estimación de biomasa y almacenamiento de carbón de especies de Bambo a través del desarrollo de ecuaciones alométricas. Consejo de Investigación y Educación Forestal Indio. Dehradun, India.

RAMÍREZ, F. (2017). Características florísticas y estructurales de dos fragmentos de bosques dominados por Guadua angustifolia Kunth pertenecientes a la cuenca media y baja del Río La Vieja. Tesis de grado Maestría en Biología Vegetal. Facultad de Ciencias Ambientales. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, Colombia.

RODRÍGUEZ-JAUME, M. J., & MORA CATALÁ, R. (2001). Análisis de regresión múltiple. *Técnicas de investigación social II*.

RODRÍGUEZ, E. M. (2005). Errores frecuentes en la interpretación del coeficiente de determinación lineal. *Anuario jurídico y económico escurialense*, (38), 315-331.

SALAS DELGADO, E. (2006). Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia: Simón Velez: símbolo y búsqueda de lo primitivo.

SCHRÖDER, S. (2012). Environmental impact of guadua bamboo.

SHARMA M, ODERWALD RG, AMATEIS RL (2002) A consistent system of equation for tree and stand volume. For Ecol Manage 165: 183–191

SIERRA GARCÍA, J. H., & GIRALDO GÓMEZ, J. A. (2018). Bosques urbanos de guadua en Pereira. Potencial para la conformación de Núcleos Forestales Productivos.

SOTO-BRAVO, F., & GONZÁLEZ-LUTZ, M. I. (2019). Análisis de métodos estadísticos para evaluar el desempeño de modelos de simulación en cultivos hortícolas. *Agronomía Mesoamericana*, *30*(2), 517-534.

SUAREZ, J. F. D. (2011). *Estrategias para el manejo y aprovechamiento de guaduales bajo el esquema de nucleos forestales productivos de guadua* (Doctoral dissertation, Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales. Administración Ambiental).

TOSNE CUICAL, GUSTAVO ADOLFO (2009). Evaluación del estado actual y definición de estrategias de manejo de 15 Guaduales localizados en las veredas Santa Rosa, San Rafael, Danubio, Mata Redonda y Corrales, en los municipios de Morales y Piendamó Departamento del Cauca. Universidad del Cauca, Facultad de Ciencias Agrarias, Tesis Ingeniería Forestal. Popayán, Cauca.

VASQUEZ GONZALEZ, V. (2020), Plan de manejo del cultivo y aplicaciones del bambú (*Guadua angustifolia*) para promover el desarrollo sostenible del distrito de Jaén – Cajamarca. Tesis para optar por el grado académico de Maestría en Ciencias Gestión Ambiental. Universidad Nacional de Trujillo. Escuela de Posgrado. Unidad de Posgrado en Ciencias biológicas. Trujillo, Perú.

VIÁFARA CARABALÍ, E Y. (2013). *Descripción de la producción y potencialidad de la guadua en el Valle del Cauca.* Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas. Universidad Autónoma de Occidente. Cali, Colombia.

VILLEGAS, MARCELO. (2005). *Guadua: arquitectura y diseño*. Villegas Asociados.

ZARAGOZA-HERNÁNDEZ, I., ORDÓÑEZ-CANDELARIA, V. R., BÁRCENAS-PAZOS, G. M., BORJA-DE LA ROSA, A. M., & ZAMUDIO-SÁNCHEZ, F. J. (2015). Propiedades físico-mecánicas de una guadua mexicana (Guadua aculeata). Maderas. Ciencia y tecnología, 17(3), 505-516.

ANEXOS

Anexo A. Formato para recolección de información del inventario.

	FORMATO DE CENSO PARA GUADUAL						
Fecha		**Número de guadual**				**Lugar**	
Responsable						**Tipo de bosque**	
Número de culmo	Circunferencia del entrenudo a la altura del pecho (cm^2)	Diámetro del entrenudo a la altura del pecho (cm^2)	Estado de madurez				Daños o deformación
			R	**V**	**M**	**SM**	
Estado de madurez: (**R**) Renuevo, (**V**) Verde, (**M**) Maduro, (**SM**) Sobremaduro							

Anexo B. Formato para inventario destructivo de guadual

FORMATO DE INVENTARIO DESTRUCTIVO DE GUADUAL

Fecha		**Número de guadual**		**Lugar**	
Responsable				**Tipo de bosque**	

#	**LT (m)**	D1i (cm)	EC1i (mm)	D1f (cm)	EC1e (mm)	L1 (m)	W1 (kg)	D2f (cm)	EC2i (mm)	D2e (cm)	EC2e (mm)	L2 (m)	W2 (kg)	D3i (cm)	EC3i (mm)	D3f (cm)	EC3e (mm)	L3 (m)	W3 (kg)	**WB (Kg)**

#: número de guadual, **LT**: longitud total de culmo, **D1i**: diámetro troza inicial 1, **D1f**: diámetro troza final 1, **L1**: longitud troza 1, **W1:** peso troza 1, **EC1i**: espesor de pared de culmo 1 inicial, **EC1f**: espesor de pared de culmo 1 final, **WB:** peso de biomasa.