



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA
AGRICULTURA**

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO AGROPECUARIO**

**MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMAR CARBONO DE TRES
ESPECIES ARBÓREAS PLANTADAS EN ÁREAS AFECTADAS POR LOS
PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA AMAZONIA DEL
ECUADOR**

AUTOR: GALLEGOS ANDRANGO, VINICIO SEBASTIAN

DIRECTOR: ING. VILLACÍS BUENAÑO, JAIME EMILIANO, Ph.D.

SANGOLQUÍ

2019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación ***“MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMAR CARBONO DE TRES ESPECIES ARBÓREAS PLANTADAS EN ÁREAS AFECTADAS POR LOS PROCESOS DE EXTRACCIÓN DE PETRÓLEO EN LA AMAZONIA DEL ECUADOR”*** fue realizado por el señor ***Gallegos Andrango, Vinicio Sebastian*** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jaime Villacís', is written over a horizontal dotted line.

Ing. Jaime Emiliano Villacís Buenaño, Ph.D.

C.C.) 710004076



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, *Gallegos Andrango, Vinicio Sebastian* declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: *Modelos alométricos para estimar carbono de tres especies arbóreas plantadas en áreas afectadas por los procesos de extracción de petróleo en la amazonia del Ecuador* es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma

A handwritten signature in blue ink is written over a horizontal dotted line. The signature is cursive and appears to read 'Vinicio Sebastian Gallegos Andrango'.

Gallegos Andrango Vinicio Sebastian

CC: 1724180060



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA VIDA Y DE LA AGRICULTURA

CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

AUTORIZACIÓN

Yo, *Gallegos Andrango, Vinicio Sebastian* autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: *Modelos alométricos para estimar carbono de tres especies arbóreas plantadas en áreas afectadas por los procesos de extracción de petróleo en la amazonia del Ecuador* en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 16 de julio de 2019

Firma

A handwritten signature in blue ink is written over a dotted line. The signature appears to be 'Vinicio Sebastian Gallegos Andrango'.

Gallegos Andrango Vinicio Sebastian

CC: 1724180060

DEDICATORIA

A mis padres, Wilfrido y Mónica por su amor, apoyo y consejos que me permiten superar cada obstáculo que se me ha presentado y me enseñan que todo es posible si lo intento.

A mis hermanos, Alejandro y Nicolás por ser una razón para cada día superarme y ser un ejemplo que ellos puedan superar.

A mi abuelita Natividad quien forjo en mí valores y ahora es mi angelito que me cuida.

AGRADECIMIENTO

A mis padres, por siempre creer en mí todos mis logros conseguidos es en parte por su apoyo incondicional.

A la Universidad de las Fuerzas Armadas, Carrera de Ingeniería Agropecuaria, por haberme brindado todos los conocimientos para desarrollar mi formación personal y profesional.

Al Dr. Jaime Villacís director de tesis, por su apoyo, consejos, amistad y ser guía durante la realización del proyecto.

Al Dr. Carlos Chiriboga, Dr. Wilmer Pozo e Ing. Mario Landívar, por su apoyo en la fase de campo de la Investigación.

A Petroamazonas EP, por permitir realizar mi proyecto de investigación en sus instalaciones y brindar todas las facilidades para su desarrollo.

A los Ingenieros Daniel Hidalgo y Juan Carlos López supervisores del Centro de Investigación de Tecnologías Ambientales del proyecto Amazonia Viva, por su colaboración en la logística para realizar la toma de datos.

A mi familia, en especial a mis tías Anita, Fernanda, Elena; mis tíos Daniel, German y mi abuelita Teresa por su interés en mi formación personal y académica.

A Jhadira por ser mi apoyo y compañera, a mis amigos por compartir momentos únicos vividos en la universidad.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CARÁTULA

CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....	ii
AUTORIZACIÓN.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	General.....	2
1.1.2	Específicos.....	3
1.2	Hipótesis	3

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1	Suelos.....	4
2.1.1	Suelos amazónicos.....	4
2.1.2	Celdas de lodos y ripios.....	5
2.1.3	Unidades de tratamientos de suelos contaminados.....	5
2.1.4	Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros	5

2.2	Especies arbóreas.....	6
2.2.1	Características de las especies seleccionadas	6
2.2.1.1	Chíparo (<i>Zygia longifolia</i>)	6
2.2.1.2	Guarango Espinado (<i>Piptadenia pteclorada</i>).....	6
2.2.1.3	Caoba (<i>Plastymiscium pinnatum</i>).....	7
2.3	Carbono en ecosistemas forestales	7
2.3.1	Gases de efecto invernadero	7
2.3.2	Ciclo del carbono	8
2.3.3	Biomasa	8
2.3.4	Métodos para calcular la biomasa.....	9
2.3.5	Modelos alométricos.....	10
2.3.5.1	Estimación de volumen mediante modelos alométricos.....	11
2.3.5.2	Estimación de biomasa y/o carbono mediante modelos alométricos	11
2.3.5.3	Evaluación de los modelos alométricos.....	12

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1	Ubicación política.....	16
3.2	Ubicación geográfica	17
3.3	Métodos	17
3.3.1	Selección de especies arbóreas	17
3.3.2	Selección de sitios de muestreo y obtención de la muestra	17
3.3.3	Variables medidas.....	18
3.3.4	Modelos alométricos a evaluar	21
3.3.5	Criterios de Evaluación.....	23

CAPÍTULO IV**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

4.1	Resultados y Discusión.....	25
4.2	Modelos alométricos para árboles de <i>Piptadenia pteroclada</i>	25
4.3	Modelos alométricos para árboles de <i>Platimiscium pinnatum</i>	31
4.4	Modelos alométricos para árboles de <i>Zygia Longifolia</i>	37
4.5	Estimación de la cantidad de carbono secuestrada por las especies forestales.....	45

CAPÍTULO V**CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

5.1	Conclusiones.....	48
5.2	Recomendaciones	49
5.3	Bibliografía	50

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	<i>Ubicación geográfica de las parcelas experimentales</i>	17
Tabla 2	<i>Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa total</i>	22
Tabla 3	<i>Ecuaciones alométricas para estimación de volumen, biomasa y carbono</i>	23
Tabla 4	<i>Valores promedios de las variables dasométricas para Piptadenia pteroclada, Zygia longifolia y Platymiscium pinnatum a los seis años</i>	25
Tabla 5	<i>Modelos alométricos lineales y estadísticos obtenidos para estimar el volumen en arboles de Piptadenia pteroclada</i>	26
Tabla 6	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de volumen obtenidos para Piptadenia pteroclada</i>	29
Tabla 7	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de biomasa obtenidos para Piptadenia pteroclada</i>	30
Tabla 8	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de carbono obtenidos para Piptadenia pteroclada</i>	31
Tabla 9	<i>Modelos lineales alométricos y estadísticos de Volumen obtenidos para Plastimiscium pinnatum</i>	32
Tabla 10	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de volumen obtenidos para Plastimiscium pinnatum</i>	34
Tabla 11	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para Plastimiscium pinnatum</i>	36
Tabla 12	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para Plastimiscium pinnatum</i>	36
Tabla 13	<i>Modelos alométricos lineales y estadísticos de Volumen obtenidos para Zygia longifolia</i>	37
Tabla 14	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Volumen obtenidos para Zygia longifolia</i>	40
Tabla 15	<i>Modelos alométricos lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para Zygia longifolia</i>	41
Tabla 16	<i>Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para Zygia longifolia</i>	43

Tabla 17 Modelos alométricos lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para <i>Zygiolongifolia</i>	44
Tabla 18 Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para <i>Zygia longifolia</i>	45
Tabla 19 Cantidad de carbono secuestrada por los árboles de las tres especies <i>Piptadenia</i> <i>pteroclada</i> , <i>Zygia longifolia</i> y <i>Plastimiscium pinnatum</i>	46

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Ubicación del proyecto de investigación.....	16
Figura 2	Parcela experimental.	18
Figura 3	Disposición de trampas para la recolección de hojarasca en las parcelas	21
Figura 4	Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y altura para el modelo 1	27
Figura 5	Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln DAP y altura para el modelo 3	28
Figura 6	Modelos no lineales de Gompertz para estimar el volumen de <i>Piptadenia pteroclada</i> : a) Modelo 1; b) Modelo 4	29
Figura 7	Modelos no lineales exponenciales para estimar la biomasa de <i>Piptadenia pteroclada</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.	30
Figura 8	Modelos no lineales exponenciales para estimar la cantidad de carbono secuestrada por <i>Piptadenia pteroclada</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.....	31
Figura 9	Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y altura para el modelo 1	33
Figura 10	Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln altura y DAP para el modelo 3.	34
Figura 11	Modelos no lineales logístico y Gompertz para estimar el volumen de <i>Plastimiscium pinnatum</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.....	35
Figura 12	Modelos no lineales exponencial e hiperbólico para estimar la cantidad de biomasa por <i>Plastimiscium pinnatum</i> a) Modelo 1; b) Modelo 2.	35
Figura 13	Modelos no lineales exponencial e hiperbólico para estimar la cantidad de carbono secuestrada por <i>Plastimiscium pinnatum</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.	37
Figura 14	Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y Ln altura para el modelo 1.....	39
Figura 15	Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln altura y dap para el modelo 2.....	40
Figura 16	Modelos no lineales Logístico y Gompertz para estimar el volumen para <i>Zygia longifolia</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.	41

Figura 17 Dispersión residuos parciales de Biomasa en función de la altura y Ln área de copa para el modelo 1.....	42
Figura 18 Modelos no lineales exponenciales para estimar la cantidad de biomasa secuestrada por <i>Zygia longifolia</i> . a) Modelo 1; b) Modelo 2.....	43
Figura 19 Dispersión residuos parciales de Carbono en función de la altura y Ln área de copa para el modelo 1.....	44

RESUMEN

Se desarrollaron modelos alométricos mediante métodos no destructivos para estimar la cantidad de carbono que secuestran los árboles de tres especies arbóreas (*Platymiscium pinnatum*, *Zygia longifolia* y *Piptadenia pteroclada*), plantadas sobre suelos perturbados de la amazonia ecuatoriana. En ocho parcelas permanentes de muestreo se midió el diámetro a la altura del pecho, la altura total, el diámetro de copa y la densidad de madera de 40 individuos de cada especie. Además, se determinó la biomasa total producida por cada espécimen durante un año. Se evaluaron aproximadamente 250 modelos alométricos para estimar el volumen, biomasa y el carbono almacenado de las tres especies. Para estimar el volumen de los árboles de cada especie se obtuvieron modelos lineales y no lineales, mientras que para la biomasa total y el carbono se encontraron modelos no lineales para las tres especies arbóreas. Los modelos que mejor ajuste presentaron para estimar la cantidad de carbono fueron $C=0,04*\exp(0,0045*\text{diámetro})$, $C=0,003*\exp(0,02*\text{área de copa})$ y $C=0,064*\exp(0,01*\text{diámetro})$, para los árboles de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia*, respectivamente. La cantidad de carbono secuestrada por los árboles de las especies *Piptadenia pteroclada*, *Zygia longifolia* y *Platymiscium pinnatum* fue 0,82, 0,70 y 0,58 Mg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Los modelos alométricos generados pueden ser utilizados bajo condiciones similares a las de este estudio, para estimar el volumen total, la biomasa total y la cantidad de carbono secuestrada por las tres especies plantadas sobre suelos perturbados de la cuenca amazónica

PALABRAS CLAVE:

- **MÉTODOS NO DESTRUCTIVOS**
- *Platymiscium pinnatum*
- **MODELOS LINEALES Y NO LINEALES**
- **SECUESTRO DE CARBONO**

ABSTRACT

Allometric models by non-destructive methods to estimate total volume, total biomass and total carbon stored by trees of *Platymiscium pinnatum*, *Zygia longifolia* and *Piptadenia pteroclada* species, planted on degraded soils in Ecuadorian amazon were developed. Diameter at breast height, total height, crown diameter and wood density of 40 specimens of each species was measured. In addition, the total biomass produced by each specimen during one year was determined. Approximately 250 allometric models to estimate the volume, biomass and carbon stored by trees of three species were evaluated. To estimate the volume of trees of each species, linear and non-linear models were obtained, while for total biomass and total carbon stored, non-linear models were found. The most significant equation to estimate the total carbon stored were $C = 0.04 * \exp(0.0045 * \text{diameter})$, $C = 0.003 * \exp(0.02 * \text{tree canopy})$ and $C = 0.064 * \exp(0.01 * \text{diameter})$, for *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* and *Zygia longifolia* species, respectively. The total carbon stored trees of *Piptadenia pteroclada*, *Zygia longifolia* and *Platymiscium pinnatum* species was 0,82, 0,70 and 0,58 Mg tree⁻¹ year⁻¹, respectively. The allometric models generated can be used to estimate the total volume, total biomass and total carbon stored of three forest species in affected soils of amazon basin.

KEY WORDS:

- **NON-DESTRUCTIVE METHODS**
- *Platymiscium pinnatum*
- **LINEAR AND NONLINEAR MODELS**
- **CARBON STORED**

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Los bosques tropicales se consideran como los más diversos y ecológicamente complejos del planeta (Meli, 2003) y constituyen el 45% de los recursos forestales mundiales (Fonseca, Ruíz, Rojas, & Alice, 2013). Los bosques cumplen un rol importante en la estabilidad del clima mundial (Bravo, 2007), ya que brindan servicios ambientales de captación de agua, mantenimiento de suelo y fijación de CO₂ (S Brown, Gillespe, & Lugo, 1998). Sin embargo, los bosques han sido afectados debido a la gran cantidad de actividades antropogénicas como la explotación hidrocarburífera (Forman & Deblinger, 2000).

En el Ecuador, debido a la extracción de hidrocarburos, se han afectado cerca de 4,2 millones de ha, debido a la apertura de caminos, construcción de plataformas, construcción de infraestructura, helipuertos, etc (Guaranda, 2014). Estas acciones involucran actividades destructivas y contaminantes que han generado cambios ambientales en los ecosistemas naturales de la región (Zamora & Ramos, 2010).

Ante esta situación, PETROAMAZONAS desde el año 2000 ha venido llevando a cabo proyectos de reforestación sobre los sitios afectados. Para la selección de las especies más idóneas para reforestar se han realizado estudios previos sobre crecimiento y desempeño a nivel de vivero (Villacís, Armas, Hang, & Casanoves, 2016), y a nivel campo por un periodo de 2 años (Villacís, Casanoves, Hang, Keesstra, & Armas, 2016). Además, se han realizado estudios para evaluar el desempeño de las especies a los 5 años y sus efectos sobre las características del suelo (Espinoza, 2018). Sin embargo, hace falta evaluar el potencial de estas especies para proveer servicios ecosistémicos como la fijación y almacenamiento de

carbono, importante para la reducción de los gases de efecto invernadero y mitigación del cambio climático (Fonseca, Rey Benayas, & Alice, 2011).

Dentro de los proyectos forestales de fijación y almacenamiento de carbono es fundamental el desarrollo de modelos alométricos para estimar el carbono almacenado dentro de estos ecosistemas reforestados (Segura & Andrade, 2008). Los modelos alométricos permiten describir el comportamiento de una variable dependiente como el volumen, biomasa o carbono en las especies arbóreas (Jaramillo, 2014; Lerma & Orjuela, 2014), para cuantificar el potencial de las plantaciones forestales como mitigadoras del cambio climático en los procesos de restauración vegetal (Fonseca et al., 2013).

En este estudio se van a generar modelos alométricos para predecir el volumen, biomasa y carbono para individuos de tres especies arbóreas de 6 años, plantadas sobre cuatro tipos de suelos degradados. Los árboles de las especies presentes en las plantaciones tienen la función de recuperar los ecosistemas afectados por las actividades de explotación petrolera en la Amazonia ecuatoriana. Por tal motivo, los modelos matemáticos generados permitirán valorar el servicio ecosistémico secuestro de carbono de las especies que mejor comportamiento han presentado sobre las plantaciones establecidas.

1.1 Objetivos

1.1.1 General

Generar modelos alométricos a través de métodos no destructivos para estimar la captura de carbono de tres especies arbóreas plantadas en suelos afectados por los procesos de extracción del petróleo.

1.1.2 Específicos

- Ajustar modelos alométricos a partir de variables dasométricas, para la estimación de volumen, biomasa y carbono de tres especies arbóreas.
- Estimar la cantidad de carbono orgánico que secuestran los árboles de *Platymiscium pinnatum*, *Zygia longifolia* y *Piptadenia pteroclada*, plantadas sobre suelos degradados.

1.2 Hipótesis

H₁: Los modelos alométricos, a través de métodos no destructivos, permiten determinar la cantidad de carbono que secuestran los árboles de tres especies arbóreas.

H₀: Los modelos alométricos, a través de métodos no destructivos, no permiten estimar la cantidad de carbono que secuestran los árboles de tres especies arbóreas.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

La amazonia ecuatoriana se encuentra en la subregión andino- amazónico, comprende un área de transición entre los andes y la cordillera oriental definiendo ecosistemas como: piedemonte con alturas hasta 2300 msnm, selva alta con alturas entre 600-2200 msnm, y su vasta llanura amazónica o selva baja caracterizada por ser áreas de inundación (López A et al., 2013). Estas áreas han sido resultado de un proceso de cambio en el uso de suelo, impulsados por factores mercantiles e institucionales (políticas petroleras, reformas agrarias y de colonización) provocando la pérdida de los bosques andinos (Bravo, 2007). Para el año 2000 (año base), los bosques cubrían una superficie de 88.420 km² equivalentes al 76% de la cuenca del amazonas y un área deforestada de 18.482,3 km² cerca del 16% de la región; mientras que para el periodo 2000-2010 se registró una deforestación acumulada de 2.136 km² siendo un 2,4% del área total, ubicando a Ecuador en el tercer lugar en deforestación de todos los países amazónicos (Santos, 2013).

2.1 Suelos

2.1.1 Suelos amazónicos

Los suelos de la Amazonia Ecuatoriana son considerados como suelos jóvenes y con un mínimo desarrollo de su perfil (Ibáñez, Blanquer, Manu, & Moreno, 2011); la mayoría de estos suelos son pertenecientes al orden Inceptisoles (IGM, 2010), que tienen un aprovechamiento forestal, tierra de cultivo y praderas (Ibáñez et al., 2011). Los suelos de la provincia de Sucumbíos son arcillosos, ácidos, con pobre materia orgánica y moderadamente profundos; mientras que los suelos de la provincia de Orellana son moderadamente alcalinos, arcillosos, con contenido medio de materia orgánica y poco profundos (Villacís, 2016).

Los suelos amazónicos en su mayoría son pobres en nutrientes, debido a su bajo potencial de retención de calcio, potasio y fosforo, debido a sus altas temperaturas y precipitaciones, y alta concentración de aluminio e hidrogeno (Moragas, 2008); a pesar de esto las especies arbóreas han logrado adaptarse a este tipo de condiciones, logrando recapturar los nutrientes producto de la descomposición de la materia orgánica mediante sus raíces superficiales y participación de hongos (Moragas, 2008).

2.1.2 Celdas de lodos y ripios

Las celdas de lodos y ripios (CLR), son plataformas generalmente piscinas de corte de 2 a 4 metros de profundidad donde los desechos contaminantes resultados del proceso de perforación son tratados de acuerdo con su disponibilidad, a fin de reducir las grandes concentraciones de metales pesados (mercurio, plomo, zinc y níquel) para una futura reforestación (Ballesteros & Tapia, 2007).

2.1.3 Unidades de tratamientos de suelos contaminados

Las unidades de tratamientos de suelos contaminados (UTSC), son plataformas de tratamiento de suelos contaminados por hidrocarburos, en estas áreas se realizan procesos de lavado y secado, separación de hidrocarburos a partir de la utilización de bacterias degradadoras. Y, además, se realizan controles de pH, temperatura, humedad, aireación y de concentración de hidrocarburos totales de petróleo (TPH) hasta lograr un nivel permisible de hidrocarburos en el suelo (L. Rodríguez, 2008).

2.1.4 Plataformas que circunscriben a los pozos petroleros

Las plataformas que circunscriben a los pozos petroleros (PCPP), son grandes áreas instaladas alrededor del pozo para extracción de petróleo, para su instalación se realizan algunas actividades destructivas y contaminantes como el ingreso de maquinaria pesada al área, que deja al finalizar

con la instalación deja toda la vegetación eliminada con un suelo desnudo y propenso para condiciones medioambientales adversas (Villacís, Casanoves, et al., 2016).

2.2 Especies arbóreas.

2.2.1 Características de las especies seleccionadas

2.2.1.1 Chíparo (*Zygia longifolia*)

Árbol perteneciente a la familia Fabácea, distribuido a una altitud de 0-1100 msnm en bosques húmedos tropicales desde México hasta Sudamérica (Zappi, Brako, & Zarucchi, 1994). Su tronco alcanza 4,24 m de altura y 10,78 cm de diámetro a los cinco años, presentan una longevidad >60 años, su copa es compacta y tronco muy ramificado, poseen un crecimiento medio anual de 2,01 cm en diámetro y 0,74 m en altura (Espinoza, 2018).

Son especies utilizadas para programas de recuperación de suelos por ser fijadora de nitrógeno (Cerdán, 2007), por presentar altos porcentajes de sobrevivencia en suelos afectados por actividades de extracción de petróleo en especial en PCPP y mostrar un aumento en los niveles de nutrientes y una disminución de niveles de metales pesados e hidrocarburos (Espinoza, 2018).

2.2.1.2 Guarango Espinado (*Piptadenia pteclorada*)

Árbol perteneciente a la familia Fabácea, originario de América de Sur, Posee un fuste corto, cilíndrico, recubierto de una corteza gris espinosa que alcanza 12,19 m de altura y 7,50 cm de diámetro a los cinco años, su copa es irregular y poca densa con ramas ascendentes, sus hojas son alternas, compuestas pinnadas o bipinnadas, posee un crecimiento medio anual de 2,42 cm de diámetro y 1,37 m en altura (Espinoza, 2018); es utilizado en programas de reforestación ya que se adaptan a suelos secos por su sistema radicular profundo y pivotante que facilita la absorción de agua de los horizontes inferiores del suelo (Villacís, 2016), crece en pastizales y es utilizado

por los campesinos porque su tallo produce madera de encofrado de buena calidad (Muñoz, 2012), es una madera suave de color blanco (Hernández, Gagnon, & Davidson, 2015).

2.2.1.3 Caoba (*Platymiscium pinnatum*)

Árbol perteneciente a la familia fabácea, domestico de fácil adaptación (Hernández et al., 2015), presentes en bosques perennifolios húmedos que van desde 0-1000 msnm de Sudamérica, alcanza 4,43 m de altura y 7,11 cm de diámetro a los cinco años (Espinoza, 2018). Su fuste es recto, cilíndrico, sin espinas y libres de ramas en los dos tercios del fuste (Gómez & Toro, 2011); las hojas son imparipinnadas, opuestas, compuestas, de color verde oscuro (Jiménez, 2009); presentan un crecimiento medio anual de 0,78 m en altura y 1,27 cm en diámetro (Espinoza, 2018).

Son utilizados en sistemas agroforestales como árbol sombra, bosques naturales, cultivos mixtos y plantaciones comerciales, su madera puede utilizarse con fines de construcción pesada y de muebles finos por ser dura y pesada (Gómez & Toro, 2011).

2.3 Carbono en ecosistemas forestales

2.3.1 Gases de efecto invernadero

El efecto invernadero se refiere cuando la atmosfera de la tierra aumenta de temperatura debido al incremento sustancial de la concentración de los gases de efecto invernadero; este efecto se dio a partir de la revolución industrial con acciones contaminantes como el frecuente consumo y combustión de combustibles fósiles, cambio de uso del suelo y deforestación de bosques naturales (Caballero & Lozano, 2007).

El dióxido de carbono (CO₂) es el gas de efecto invernadero más abundante en la atmosfera y principal responsable del calentamiento global (Schlegel, 2001), tiene tal importancia que sin su presencia la temperatura media actual del planeta seria de 33°C más fría convirtiendo a la tierra

en un planeta congelado (Díaz-Ríos, Vázquez-Alarcón, Uribe-Gómez, Vélez, & Bueno, 2016), cerca del 20% de emisiones de este gas son resultado de la eliminación y degradación de ecosistemas forestales (Schlegel, 2001).

2.3.2 Ciclo del carbono

El ciclo del carbono se considera como un conjunto de cuatro reservas interconectadas: biosfera terrestre, atmosfera, sedimentos y océanos, estas reservas son fuentes de liberación de carbono o sumideros que absorben carbono de reserva del ciclo (Norambuena & Orellana, 2012); la fotosíntesis, respiración y oxidación son los mecanismos principales del intercambio del carbono (González, 2008).

Las plantas absorben el CO₂ de la atmosfera a través de la fotosíntesis y este a su vez proporciona elementos para su desarrollo y crecimiento, el carbono resultante de este proceso se deposita en follaje, tallos y sistemas radiculares (González, 2008); son fuentes de carbono atmosférico cuando se perturba el ecosistema, se convierte en sumideros de carbono atmosférico durante su abandono y regeneración después de la perturbación (Álvarez, 2008), se considera que el 80% del carbono terrestre se encuentran en ecosistemas forestales (Jandl, 2011), y los bosques tropicales contienen hasta un 40% de carbono almacenado como biomasa terrestre (Phillips, 1998). Por tal motivo, los ecosistemas forestales son muy importantes en el ciclo global de carbono (S Brown et al., 1998).

2.3.3 Biomasa

La biomasa es el nombre que se le da cualquier materia orgánica acumulada procedente de organismos vivos en un sitio o volumen determinado a lo largo del tiempo (González, 2008), es importante para cuantificar la cantidad de nutrientes en diferentes estructuras de las plantas, comparar distintos tipos de especies o comparar especies similares en áreas diferentes (Fonseca

G, Alice G, & Rey B, 2009), determinar la cantidad de carbono y por consiguiente se pueden realizar estimaciones sobre la cantidad de dióxido de carbono que ingresa a la atmosfera cada vez que se quema o desmonta un bosque (Álvarez, 2008; Sandra Brown & Iverson, 1992).

La contribución porcentual de los diferentes componentes en la biomasa total de un árbol varía dependiendo de la especie, edad, sitio y sistema silvicultural (Gayoso A & Guerra C, 2005), concentrando la mayor cantidad de biomasa aérea en el fuste representado entre 55-77% del total, mientras que las ramas están entre 5 a 37% y las hojas y corteza del fuste posee entre 1-15% del total (Overman, Witte, & Saldarriaga, 1994).

La estimación de la biomasa es esencial para aspectos de estudios de poblaciones de carbono, efectos de la deforestación y secuestro de carbono (Ketterings, Coe, van Noordwijk, Ambagau , & Palm, 2001), es el primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas y su contribución en el ciclo del carbono (Schlegel , 2001). Comúnmente existen tres métodos usados para su estimación: métodos directos, métodos destructivos e indirectos (modelos de biomasa o volumen) (Schlegel, 2001).

2.3.4 Métodos para calcular la biomasa

El primer paso para evaluar la productividad de la contribución de bosques tropicales en el ciclo del carbono es el cálculo de la biomasa. Para esto, existen tres métodos:

Método directo: Se basa en los datos del volumen (a partir de información de inventario forestal), la densidad básica de la madera y el factor de expansión de la biomasa (FEB) (Verma et al., 2014).

Método destructivo: Este método proporciona un valor más exacto del cálculo de la biomasa, se basa en la destrucción del árbol para calcular su peso seco de biomasa, además permite

formular relaciones entre la biomasa y las variables de fácil medición como el DAP, altura total y otros (González, 2008).

Método indirecto: Se utiliza cuando existen arboles adultos de grandes dimensiones o se necesita calcular la biomasa sin destruir el árbol, se basa en realizar con fórmulas dendrométricas o con modelos alométricos (González, 2008).

2.3.5 Modelos alométricos

La alometría estudia la proporcionalidad entre razones específicas o relativas de crecimiento (Orrego, Del Valle A, & Moreno, 2003), sugiere que existe proporcionalidad entre las tasas de crecimiento relativas de dos variables de tamaño, que puede ser el peso de diferentes secciones o parte de un organismo o una de sus dimensiones, estos cambios en tamaño satisfacen una ecuación o función alométrica (Broad, 1998). La curva de crecimiento alométrico ha tenido aplicación para varios organismos, ya que la razón entre incrementos en estructuras de diferente tamaño es aproximadamente constante, mostrando incrementos en una de las variables con respecto a otra sobre la escala logarítmica (Sprugel, 1983).

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar biomasa, carbono y volumen de árboles o arbustos (Segura & Andrade, 2008), estos modelos son específicos para cada tipo de ecosistema, zona de vida, especie o grupo de especies (Lerma & Orjuela, 2014). El modelo alométrico se expresa comúnmente de la siguiente forma:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X$$

Donde Y representa la variable dependiente (Volumen, Biomasa y/o carbono), β_0, β_1 son los parámetros estimados y X es la variable independiente.

Los modelos alométricos son métodos no destructivos que se enfocan en evaluar no solo especies de interés comercial sino también especies de gran importancia ambiental (Díaz-Ríos

et al., 2016), están basados en análisis de regresión, que utilizan variables como: diámetro a la altura del pecho (dap), la altura comercial (hc) y total (ht), diámetro de la copa (m), y la densidad específica de la madera (Fonseca G et al., 2009). En estudios realizados (Gayoso A & Guerra C, 2005), ha existido una clara tendencia a utilizar funciones logarítmicas y exponenciales cuando los datos son muy dispersos obteniendo estructuras de error más homogéneas sin alterar la forma del modelo.

Para la construcción de los modelos alométricos se debe seguir un proceso desde la selección del sitio y las especies, estimación del tamaño de la muestra, seleccionar los individuos para muestrear, medición de las variables, ajuste de los modelos genéricos y la selección del modelo que mejor se ajuste (Lerma & Orjuela, 2014).

2.3.5.1 Estimación de volumen mediante modelos alométricos

El volumen es la forma de expresión de la cantidad de madera contenido en los rodales, la suma de los volúmenes de los árboles individuales en pie se puede considerar el volumen total de madera comprendido en un rodal (Álvarez, 2008). La dificultad en la determinación directa del volumen mediante la cubicación de secciones hace conveniente la utilización de modelos matemáticos capaces de estimar el volumen de madera por árbol a partir de mediciones objetivas y simples de variables independientes como diámetro y altura (Prodan, Peters, Cox, & Real, 1997).

2.3.5.2 Estimación de biomasa y/o carbono mediante modelos alométricos

Para la estimación no destructiva de biomasa, se debe contar con modelos matemáticos que estimen la biomasa total aérea en base a dimensiones del árbol basados en relaciones alométricas que ocurren entre los órganos de un individuo (S Brown et al., 1998). Las variables más utilizadas para su generación son: diámetro a la altura del pecho, altura total, diámetro de copa,

altura comercial y combinación entre ellas, lo que le da una alta aplicabilidad dentro del campo forestal gracias a su flexibilidad en su uso (Gayoso A & Guerra C, 2005).

2.3.5.3 Evaluación de los modelos alométricos

La evaluación de modelos alométricos tiene como objetivo la selección de aquellos que presenten el mejor balance entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad (Jérôme Chave et al., 2014). Modelos con un mayor número de parámetros tienden a ajustar mejor una base de datos, no obstante, tienden a ser más inestables y a modelar la variabilidad de esos datos más que su tendencia (Posada, Rosero, & Zoot, 2007).

Para la selección del modelo es importante considerar criterios de decisión de estadística como la distancia de Cook (d-cook), el coeficiente de determinación (R^2), coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP), el Factor de inflación de varianza (VIF) (Posada et al., 2007). Además, se pueden utilizar criterios de bondad de ajuste de diferentes modelos como el criterio de Información Bayesiano (BIC) y el criterio de Información Akaike (AIC) para comparar modelos ajustados (González, 2008).

Coefficiente de determinación (R^2): Es la proporción de la variabilidad total en Y por la variación de la variable independiente o la variabilidad total en el modelo (Di Rienzo et al., 2008), se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT}$$

Dónde:

R^2 = Coeficiente de determinación.

SCR = Suma de cuadrados de regresión.

SCT = Suma de cuadrados total.

Coefficiente de determinación ajustado (R_{Aj}^2): Permite medir el porcentaje de variación de la variable dependiente considerando el número de variables presentes en el modelo (Di Rienzo et al., 2008), se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$R_{Aj}^2 = 1 - (1 - R^2) \left[\frac{n - 1}{n - p} \right]$$

Dónde:

R_{Aj}^2 = Coeficiente de determinación ajustado.

n = Es el número total de observaciones.

p = Es el número total de parámetros del modelo ajustado

Distancia de Cook (d-Cook): Este estadístico mide la distancia entre las dos variables de estimación, si d-Cook es mayor a 1 se considera que la observación es excesivamente influyente y se debe eliminar (Di Rienzo et al., 2008), se obtiene mediante la ecuación:

$$D_i = \frac{(Y - Y_{(i)})' (Y - Y_{(i)})}{ps^2}$$

Dónde:

D_i = distancia de Cook

Y = vector de valores predichos.

$Y_{(i)}$ = vector de valores predichos cuando el i-ésimo punto es eliminado.

S^2 = CM_{Error} estimado de la varianza $V(Y_i) = \sigma^2$

Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP): Los modelos que expresan el menor valor en este criterio son los que tienen mejor capacidad de ajuste para su selección (Di Rienzo et al., 2008), se determina a partir de la siguiente fórmula:

$$ECMP = \sum \frac{(CP - CE)^2}{N}$$

Dónde:

CP = Concentración predicha.

CE = Concentración experimental.

N = El número total de determinaciones.

Factor de inflación de varianza (VIF): Mide en un análisis de regresión la intensidad de la multicolinealidad, proporciona un índice que mide hasta qué punto la varianza de un coeficiente de regresión se incrementa a causa de la colinealidad, si el valor de VIF es mayor a 10 existe multicolinealidad alta (Di Rienzo et al., 2008), se utiliza la siguiente ecuación para su estimación:

$$FIV = \frac{1}{1 - R_i^2}$$

Donde R_i^2 es el coeficiente de determinación de la regresión.

Criterio de Información Bayesiano (AIC): Permite la selección de modelos entre un conjunto finito de modelos, se basa en la función de probabilidad y está estrechamente relacionado con el criterio de Akaike (Di Rienzo et al., 2008), se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$AIC = n * LN \left(\sum_{i=1}^n (\text{observado} - \text{predicho})^2 \right) * 2p$$

Dónde:

n = Valor observado para cada árbol.

p = Número de parámetros del modelo.

Criterio de Información Akaike (BIC): Se utiliza para penalizar un exceso de parámetros ajustados (Di Rienzo et al., 2008), se estima con la siguiente ecuación:

$$BIC = n \text{Log}(1 - R_k^2) + p_k \text{Log}$$

Dónde:

n = Número de observaciones.

R^2_k = Coeficiente de determinación

p_k = Número de regresoras presentes en el modelo.

AIC y BIC son criterios que sirven para elegir los mejores modelos entre un conjunto finito de modelos, los mejores modelos son los que tienen valores de AIC y BIC menores (FAO, 2008; Picard, 2012).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1 Ubicación política

La presente investigación en su fase de campo se realizó dentro de las áreas de explotación de Petroamazonas EP, en las provincias de Orellana (Campos Sacha y Auca) y Sucumbíos (Campos Lago Agrio, Shushufindi, Libertador y Cuyabeno). La fase de laboratorio se realizó en los laboratorios de Suelos y Silvicultura de la Carrera de Ingeniería Agropecuaria de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.



Figura 1. Ubicación del proyecto de investigación.

La provincia de Orellana tiene una superficie de 20 733 km², posee un clima cálido húmedo con temperaturas que varían entre 20-40°C, con una flora característica de la zona donde predominan los guarumos, balsa y palmito; la actividad más importante dentro de la zona es la

explotación petrolera (Ecured, 2016a). La provincia de Sucumbíos tiene una superficie de 17 947 km², posee una diversidad de clima desde de paramo hasta un clima tropical húmedo muy caluroso teniendo una temperatura promedio de 28°C; su flora característica son arboles como el ceibo, cedro, guarumo; actividades como ganadería y la comercialización de petróleo son las que se desarrollan en esta provincia (Ecured, 2016b; Sistema de Información Público Agropecuaria, 2017)

3.2 Ubicación geográfica

Las coordenadas de las parcelas experimentales se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1

Ubicación geográfica de las parcelas experimentales

PROVINCIA	NOMBRE DEL SITIO	COORDENADAS	
Orellana	Auca 02_D	18N 290207.58	E9913411.72
Sucumbíos	CGP Lago 19	18N 294566.39	E14133.20
	Cuyabeno 20	18N 357691.92	E2162.51
	Sansahuari 02	18N 356039.88	E9233.51
	Shushufindi Est _40	18N 313647.51	E9981368.34
	Secoya 26	18N 322368.75	E4001.09
	Secoya 2-3	18N 323355.63	E1429.15
	Los Ribereños	18N 300491	E4661.21

3.3 Métodos

3.3.1 Selección de especies arbóreas

Las especies arbóreas seleccionadas en este estudio fueron *Platymiscium pinnatum* (Caoba), *Zigia longifolia* (Chíparo), *Piptadenia pteroclada* (Guarango Espinado) que mostraron mejor desempeño de sobrevivencia y crecimiento durante los primeros seis años desde su establecimiento (Espinoza, 2018; Villacís, Casanoves, et al., 2016).

3.3.2 Selección de sitios de muestreo y obtención de la muestra

Los sitios seleccionados corresponden a los suelos afectados por los procesos de extracción de petróleo (suelos contaminados, plataformas que circunscriben a los pozos petroleros y celdas de

lodos y rípios) y potreros. En cada sitio se encuentran implementadas parcelas rectangulares de 24 x 84 m, en donde se encuentran cinco individuos de 20 especies forestales plantados a una distancia 4 x 4 m, dando una densidad de 625 árboles/ha. La disposición de los individuos de las tres especies arbóreas sobre las parcelas se muestra en la Figura 2.



Figura 2. Parcela experimental

3.3.3 Variables Medidas

En cada individuo de las tres especies seleccionadas se midieron un total de 5 variables: diámetro a la altura del pecho (DAP), altura total (h_t), diámetro de copa (m), densidad de madera (DM) y producción de biomasa (BM).

El diámetro a la altura de pecho (DAP) se midió a 1,3 metros desde la base del árbol, utilizando un calibrador de error ± 1 o una cinta diamétrica dependiendo del diámetro del árbol, para este último se transformaron los valores de circunferencia a diámetro mediante la siguiente ecuación (Segura & Andrade, 2008):

$$DAP = \frac{\text{circunferencia}}{\pi}$$

Se midió la altura total (h_t) desde la base del árbol hasta el ápice del tallo mas alto, utilizando un hipsómetro laser. El diámetro de copa (m) se estimó con una cinta métrica promediando dos

mediciones perpendiculares que son los puntos más sobresalientes de la copa en dos direcciones norte a sur y este a oeste. El área de copa (A_C) se determinó como el área de un círculo mediante la siguiente ecuación (Segura & Andrade, 2008):

$$A_C = \pi * \frac{D^2}{4}$$

Dónde D es el diámetro promedio de la copa.

Se determinó la densidad de madera (DM) colectando muestras cilíndricas de madera de aproximadamente 11 cm de longitud a una altura de 1,3 m del fuste con un barrenador tipo pressler de 6,2 mm.

Las muestras se colocaron en pajillas plásticas, selladas en ambos extremos y etiquetadas. Se midió el diámetro en tres puntos diferentes (extremos y centro) con la ayuda de un calibrador digital para la estimación de su volumen. Las muestras fueron sometidas a secado en estufa a 100°C durante 24 horas y finalmente para valorar la masa se pesó con una balanza analítica de precisión 0,01 g. Para calcular la (DM) se dividió la masa para el volumen del cilindro.

La biomasa de los diferentes componentes sobre el suelo (fuste, copa y follaje) se determinó a través de la siguiente ecuación:

$$BT = BF + BC + BH$$

Dónde:

BT: Biomasa total (Mg).

BF: Biomasa del fuste (Mg).

BC: Biomasa de la copa (Mg).

BH: Biomasa del follaje (Mg).

La Biomasa del fuste (BF) se calculó con la siguiente ecuación:

$$BF = VF * DM$$

Dónde:

BF: Biomasa de fuste (Mg)

VF: Volumen de fuste (m^3)

DM: Densidad de madera (Mg/m^3)

Para el volumen de fuste (VF) se utilizó la siguiente ecuación:

$$VF(m^3) = \text{área basal } (m^2) * \text{factor de forma} * \text{altura de fuste}(m)$$

La Biomasa de copa (BC), se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$BC = VC * DM$$

Dónde:

BC: Biomasa de copa (Mg).

VC: Volumen de copa (m^3).

DM: Densidad de madera (Mg/m^3).

El volumen de copa se calculó a partir de la siguiente ecuación:

$$VF(m^3) = \text{área de de copa } (m^2) * \text{altura de copa}(m)$$

Para determinar la biomasa de follaje en cada parcela se colocaron dos trampas rectangulares debajo de las copas de dos individuos de cada especie de interés: *Platymiscium pinnatum*, *Zygia longifolia*, *Piptadenia pteroclada* (total 6 trampas).

En total se establecieron 48 trampas en las 8 parcelas permanentes de muestreo (Figura 3). En cada una de las trampas se colectaron la hojarasca acumulada cada 15 días durante 12 meses (total 24 evaluaciones). Las muestras fueron colocadas en fundas plásticas, etiquetadas y luego llevadas al laboratorio.

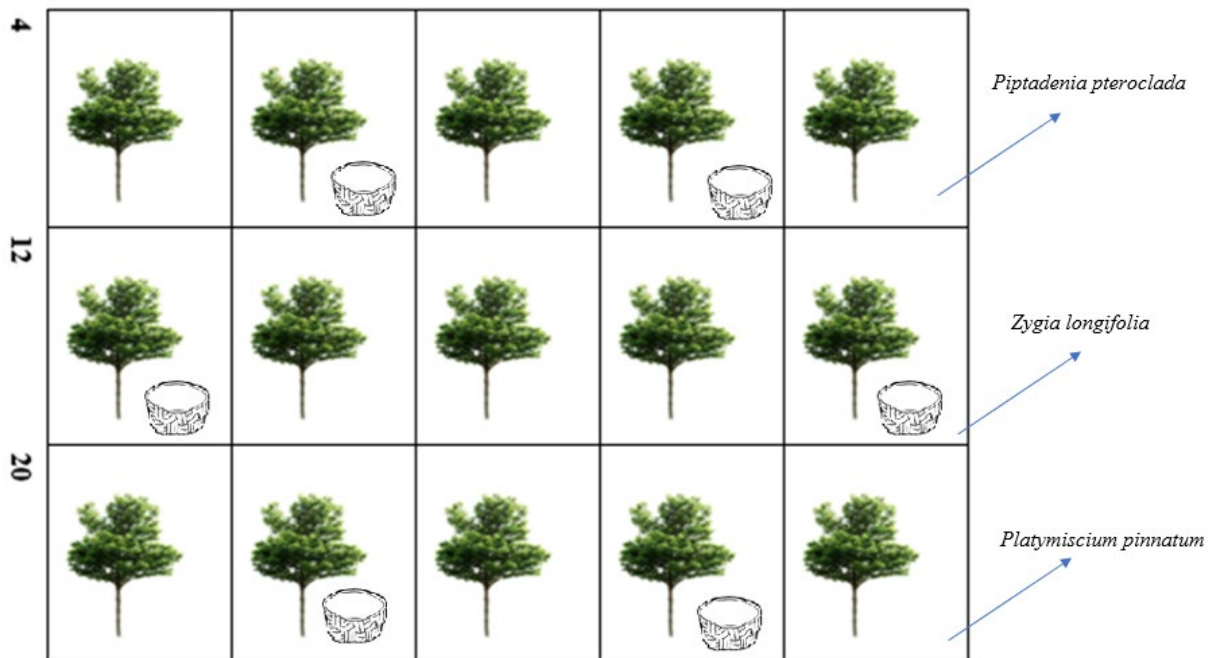


Figura 3. Disposición de trampas para la recolección de hojarasca en las parcelas

En el laboratorio las muestras se clasificaron por especies y se sometió al secado en una estufa a 100°C para posteriormente ser pesadas obteniendo la biomasa total por trampa.

El carbono (C) se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$C = BT * FC$$

Dónde:

C: Carbono

BT: Biomasa total

FC: Fracción de carbono

3.3.4 Modelos alométricos a evaluar

Con los datos obtenidos de las variables medidas se ensayaron modelos para la estimación de Biomasa total, Volumen y Carbono; observando la tendencia de los datos y definiendo los

modelos de regresión a utilizar (lineales y no lineales), estos datos cumplieron los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas.

Se evaluaron modelos alométricos lineales y no lineales para la estimación de biomasa total recomendados para este tipo de especies arbóreas (Tabla 2) (Watzlawick, Sanquetta, de Mello, & Arce, 2001).

Tabla 2

*Ecuaciones alométricos para la estimación de biomasa total según:
Watzlawick, Sanquetta, De Mello, & Arce*

Ecuación	Autor
$BT = \beta_0 + \beta_1 * h + \beta_2 * DAP$	
$BT = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_1 * DAP^2$	
$BT = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_3 (DAP^2 + h)$	(Watzlawick, Sanquetta, de Mello, & Arce, 2001)
$BT = \beta_1 + \beta_2 * DAP + \beta_3 * DAP^2 + \beta_4 (DAP^2 * h)$	
$BT = \beta_0 + \beta_1 * DAP^2 + \beta_2 (DAP^2 * h)$	
$BT = \beta_0 + \beta_1 * DAP + \beta_1 * h$	

Fuente: (Watzlawick, Sanquetta, de Mello, & Arce, 2001)

Dónde

BT = Biomasa total

β_i = i-ésimo parámetro de regresión del modelo

DAP = diámetro a la altura del pecho

h = altura del árbol

Adicionalmente se evaluaron modelos con una variable (dap, h_t y área de copa) y dos o tres variables (dap- h_t , dap-área de copa, h_t -área de copa) se hicieron transformaciones de logaritmo natural (Ln) como se observa en la Tabla 3. El análisis estadístico se realizó en el programa InfoStat.

Tabla 3*Ecuaciones alométricas para estimación de volumen, biomasa y carbono*

Ecuación Genérica	Nombre
$\ln VBC = a + b * \ln dap + c * \ln h$	Schumacher – Hall
$VBC = \text{EXP} (a + b*dap)$	
$VBC = \text{EXP} (a + b*\ln (dap))$	Fonseca
$\ln VBC = a + b * h + c * dap + d * dap^2$	
$VBC = a * \text{EXP} (-b * \text{EXP} (-c * dap))$	Gayoso et al
$VBC = a / (1 + b*\text{EXP} (-b + dap))$	
$VBC = a + b*dap + c*dap^2 + d*h_t + e*h_t^2$	
$VBC = a + b*dap + c*dap^2 + d*\ln h_t + e* \ln h_t^2$	Álvarez et al
$VBC = a + b*dap + c*dap^2 + d*h_t + e*h_t^2$	
$VBC = a + b*\ln (dap) + c*\ln (h)$	Montero y Montagini
$\ln(V) = a + b*\ln(dap) + c*\ln(dap^2) + d*h_t + e*h_t^2$	Jáuregui

Dónde:

VBC = volumen (m³ árbol⁻¹), biomasa (kg árbol⁻¹) o carbono (kg árbol⁻¹);

dap =diámetro a la altura de pecho (o a otra altura de referencia; cm);

h = altura total o comercial (m);

a, b, c, d, e = parámetros del modelo;

ln= logaritmo base e.

3.3.5 Criterios de evaluación

Para la selección de los mejores modelos se consideró la correlación entre las variables (coeficiente de determinación de Pearson), un coeficiente de correlación no significativo causó la no inclusión de la variable en el modelo, se evaluó la distancia de Cook que permitió indicar datos influyentes en la amplitud de la distribución.

Se evaluaron cerca de 100 modelos para volumen y 300 modelos para biomasa y/o carbono, se seleccionaron los modelos que cumplieron con los siguientes criterios de evaluación: el coeficiente de determinación (R^2), el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado), el Error Cuadrático Medio de Predicción (ECMP), factor de inflación de varianza (VIF), el Criterio de

Información Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y el Criterio de Información Bayesiano (BIC, por siglas en inglés).

Los AIC y BIC, se utilizaron para la selección de los mejores modelos entre un conjunto de modelos que cumplieron los criterios, un modelo es mejor que otro si tiene un valor de AIC Y BIC menor (FAO, 2008).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados y Discusión

En la Tabla 4 se presentan los valores promedios de las variables dasométricas de los árboles de tres especies de seis años, para determinar los modelos alométricos de volumen, biomasa y carbono.

Tabla 4

Valores promedios de las variables dasométricas para Piptadenia pteroclada, Zygia longifolia y Platymiscium pinnatum a los seis años

ESPECIE	DAP (cm)	h _t (m)	A _c (m ²)	Biomasa Mg/año	Volumen (m ³)	Densidad
<i>Piptadenia pteroclada</i>	14,12±1,28	10,19±0,89	57,55±7,2	0,12±0,02	0,30±0,07	0,38±0,01
<i>Zygia longifolia</i>	11,28±0,90	6,73±0,54	48,50±6,3	0,12±0,04	0,10±0,02	0,59±0,02
<i>Platymiscium pinnatum</i>	7,32±0,69	5,37±0,52	7,85±2,03	0,05±0,01	0,04±0,01	0,50±0,01

DAP= promedio del diámetro a la altura del pecho (cm); h_t= promedio de la altura total (m); A_c= promedio del área de copa (m²)

4.2 Modelos alométricos para árboles de *Piptadenia pteroclada*

Se encontraron cuatro modelos lineales de volumen para los árboles de *Piptadenia pteroclada*. Todos los modelos presentaron coeficientes de determinación superior al 75% y todos los parámetros fueron significativos a un nivel de significación del 5%. Los cuatro modelos resultaron de la combinación de las variables independientes DAP y h_t, transformadas en Ln (modelo 3 y 4) y no transformadas (modelo 1 y 2). De los modelos no transformados, el modelo 1 fue el que presentó el mayor coeficiente de determinación ajustado y el menor nivel de significancia (r²ajustado= 0,96; p<0,0001); mientras que de los modelos transformados, el modelo 3 fue el que mejor ajuste presentó (r²ajustado=0,88; p=0,0001) (Tabla 5).

Álvarez, (2008), coincide que la elección de los mejores modelos para la determinación del volumen de especies arbóreas es resultado de combinaciones de dos variables independientes DAP y h, ya que son fáciles de medir y/o calcular. Por otro lado, Moret y Ruiz (1998), señalan

que el coeficiente de determinación ajustado aumenta en modelos con variables transformadas en LN, lo cual difiere de los resultados obtenidos en este estudio, en donde el valor del r^2 ajustado disminuyó en los modelos con las variables transformadas.

Tabla 5

Modelos alométricos lineales y estadísticos obtenidos para estimar el volumen en arboles de Piptadenia pteroclada

Modelo	R^2_{AJ}	ECPM	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=0,02+0,01*h_t - 0,0024*DAP+ 0,00017*DAP^2$	0,96	0,0013	<0,0001	-1033,77	-1016,03
2. $V=0,01+0,0016*DAP -0,04* h_t+ 0,0034*h_t^2$	0,94	0,0016	0,0204	-952,55	-934,81
3. $V=-0,07+0,04*\ln DAP -0,03* h_t+0,0037 *h_t^2$	0,88	0,003	0,0001	-772,73	-754,98
4. $V=-0,06+0,0022*DAP-0,11*\ln h_t+ 0,05*\ln h_t^2$	0,75	0,01	<0,0001	-588,53	-570,78

V= volumen ($m^3 \text{ arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); $R^2_{ajustado}$ = coeficiente de determinación ajustado; ECPM= Error cuadrático medio de predicción; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Con los modelos generados se graficó la dispersión de los residuos parciales contra los valores predichos del volumen. En el modelo 1 se observa la relación positiva del volumen con h_t y dap^2 , y una relación negativa entre el volumen y DAP (Figura 4). Mientras que en el modelo 3 se observa la relación positiva del volumen con LN dap y la h_t^2 , y una relación negativa entre el volumen y la h_t (Figura 5).

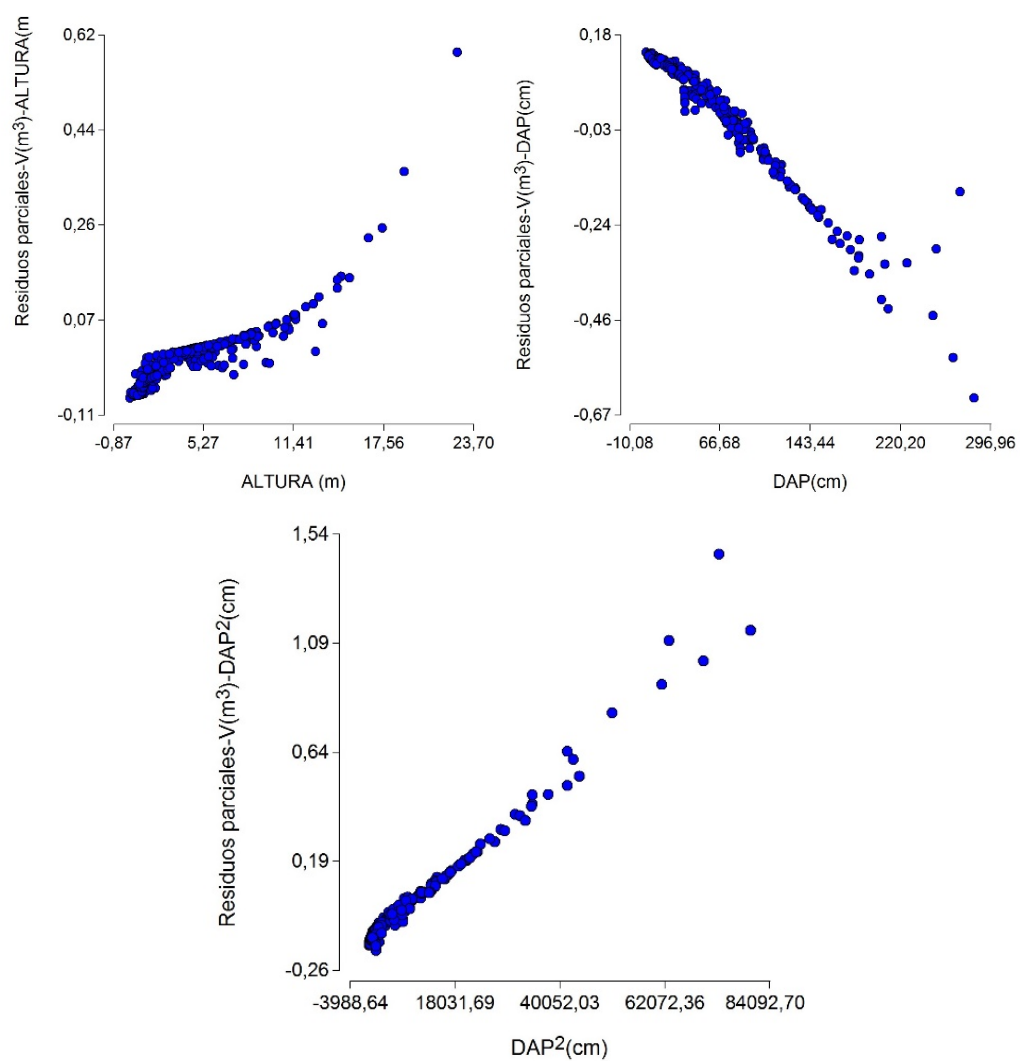


Figura 4. Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y altura modelo 1

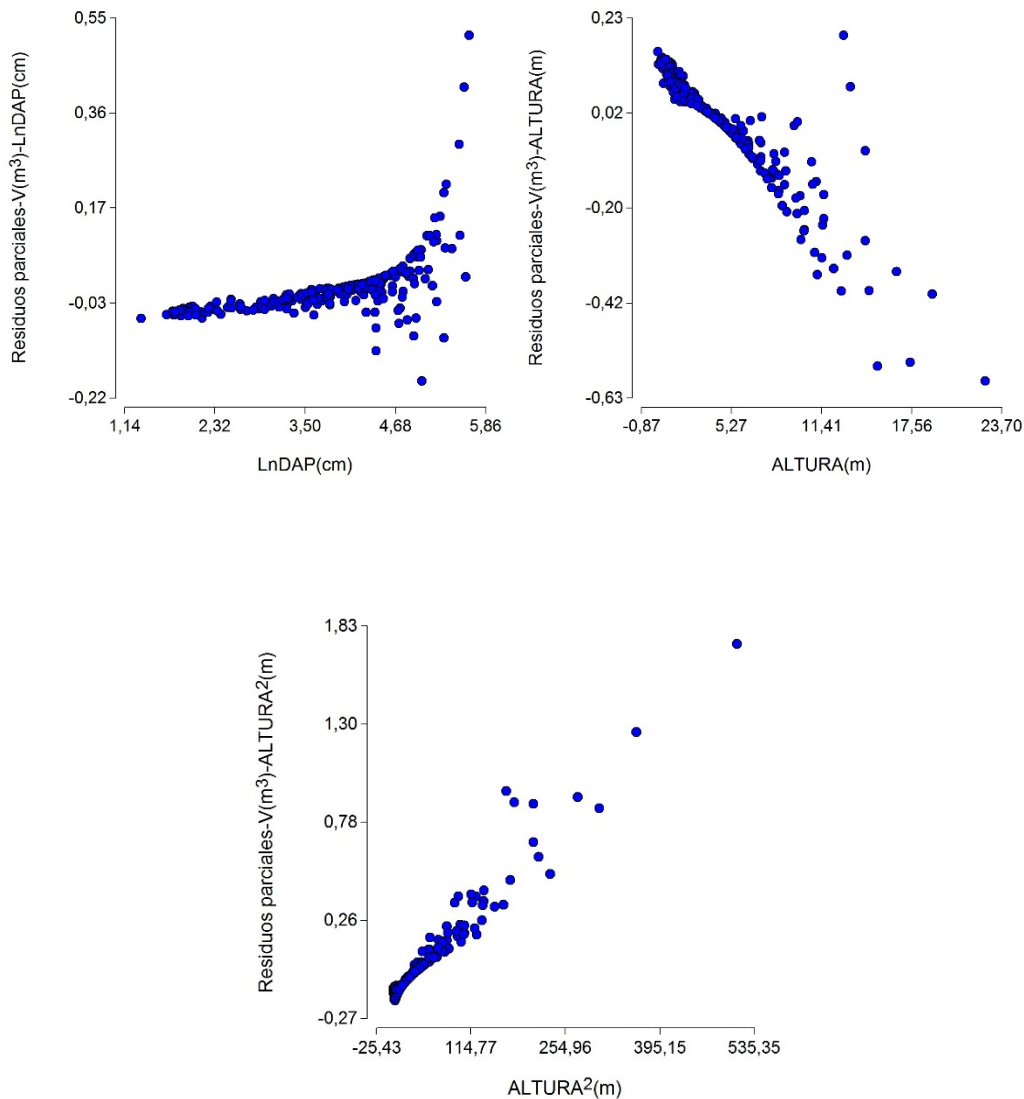


Figura 5. Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln DAP y altura para el modelo 3

Además, se encontraron cuatro modelos no lineales para la estimación del volumen de los árboles de *Piptadenia pteroclada*, que fueron estadísticamente significativos a un nivel de significancia del 5%. Tres modelos resultaron de una variable independiente DAP, y un modelo con la variable independiente h_t (Tabla 6). Los modelos no lineales de Gompertz que relacionaron

el volumen con el DAP y la altura (modelos 1 y 4, respectivamente) fueron los que presentaron menores valores de AIC y BIC y por tanto presentaron mejor ajuste (Figura 6).

Tabla 6

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de volumen obtenidos para Piptadenia pteroclada

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=0,66*\exp(-0,43*\exp(-0,00075*DAP))$	0,0015	0,04	<0,0001	-939,48	-925,48
2. $V=1,06/(1+1055,45*\exp(-0,03*DAP))$	0,0001	0,04	<0,0001	-905,40	-891,20
3. $V=0,01*\exp(0,02*DAP)$	0,0024	0,05	<0,0001	-819,64	-808,99
4. $V=2,65*\exp(-7,73*\exp(-0,1*h_t))$	0,0031	0,06	<0,0001	-747,05	-732,86

V= volumen ($m^3 \text{ arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano

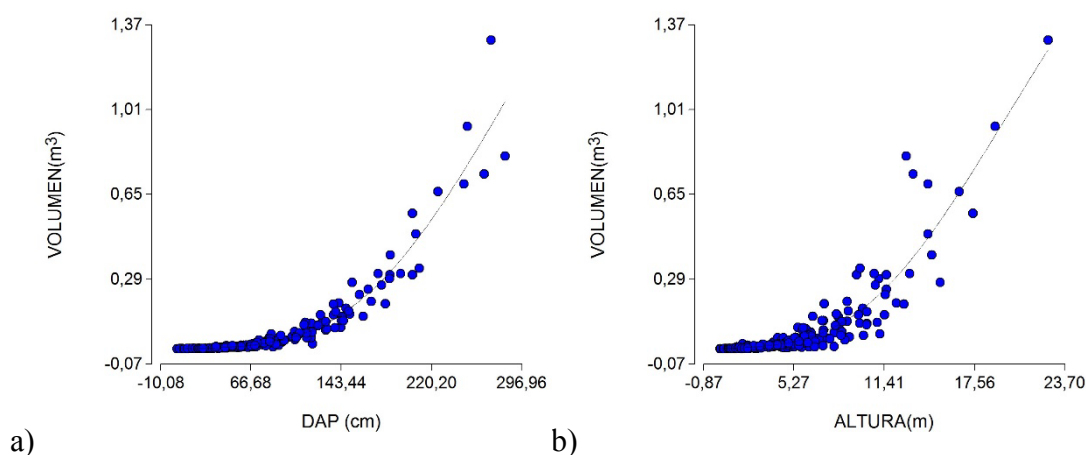


Figura 6. Modelos no lineales de Gompertz para estimar el volumen de *Piptadenia pteroclada*: a) Modelo 1; b) Modelo 4

Para la estimación de la biomasa se encontraron cuatro modelos no lineales de Biomasa para los árboles de *Piptadenia pteroclada*, que fueron estadísticamente significativos a un nivel de significancia del 5%; dos modelos resultaron de una variable independiente DAP y dos modelos con la variable independiente h_t transformada y no transformada (Tabla 7).

Tabla 7

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de biomasa obtenidos para Piptadenia pteroclada

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $BM=0,01*\exp(0,00063*DAP)$	0,013	0,04	<0,0001	-56,67	-54,35
2. $BM=0,08*\exp(0,06*h_t)$	0,0016	0,04	<0,0001	-54,07	-51,75
3. $BM=1-\exp\left(-\left(\frac{DAP}{450,36}\right)^{0,14}\right)$	0,0016	0,04	0,0140	-53,96	-51,64
4. $BM=0,03*\exp(0,13*\ln h_t)$	0,0016	0,04	0,013	-53,58	-51,28

BM=Biomasa ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Los modelos no lineales exponenciales que relacionaron la biomasa con el DAP y la altura (modelos 1 y 2) fueron los que mejor ajuste presentaron (Figura 7). Estos resultados coinciden con los reportados por Álvarez (2008); Fonseca et al. (2013) y Regina (2000) en zonas tropicales y por Chave et al. (2001) en zonas templadas, en donde se señala que los modelos alométricos para la estimación de la biomasa de un árbol incluyen el DAP. Esta variable tiene ventaja sobre el resto de las variables dasométricas ya que es objetiva de fácil medición y se obtiene en la mayoría de los estudios relacionados con el manejo de plantaciones forestales.

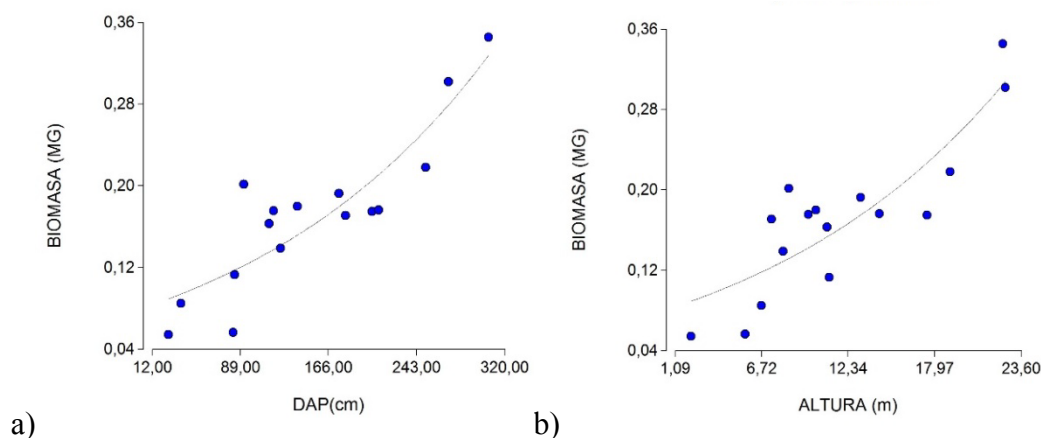


Figura 7. Modelos no lineales exponenciales para estimar la biomasa de *Piptadenia pteroclada*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

Finalmente, se encontraron dos modelos no lineales exponenciales para la estimación del carbono para los árboles de *Piptadenia pteroclada*, que fueron significativos a un nivel del 5%.

Un modelo resulto de una variable independiente DAP mientras que otro modelo con la variable independiente h_t (Tabla 8). Los modelos no lineales exponenciales que relacionaron la biomasa con el DAP y la altura (modelos 1 y 2) fueron los que presentaron los valores más bajos de los criterios AIC y BIC (Figura 8).

Tabla 8

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de carbono obtenidos para Piptadenia pteroclada

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $C=0,04*\exp(0,0045*DAP)$	0,00033	0,02	<0,0001	-78,75	-76,53
2. $C=0,04*\exp(0,06*h_t)$	0,0039	0,02	<0,0001	-76,25	-73,93

C= Carbono ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

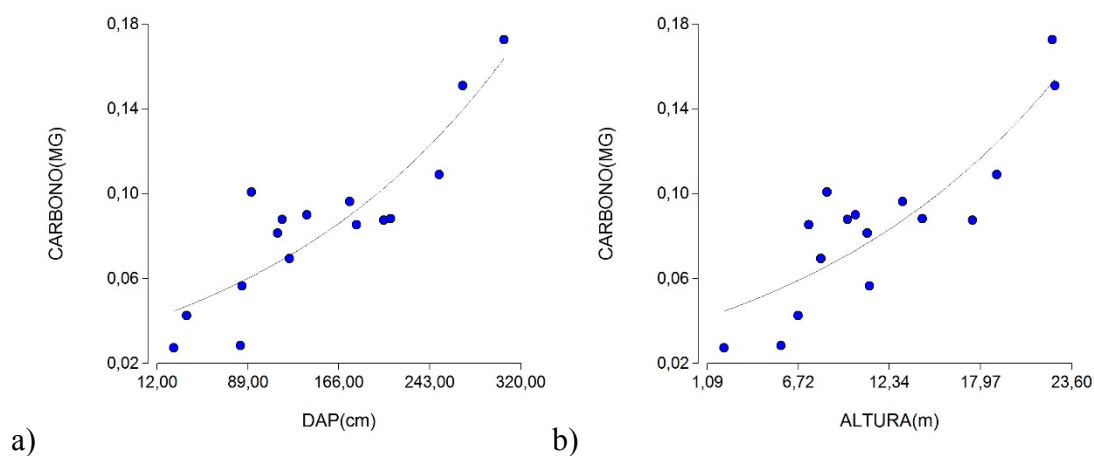


Figura 8. Modelos no lineales exponenciales para estimar la cantidad de carbono secuestrada por *Piptadenia pteroclada*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

4.3. Modelos alométricos para árboles de *Platimiscium pinnatum*

Se encontraron cuatro modelos lineales de volumen para arboles de *Platimiscium pinnatum*. Todos modelos presentaron coeficiente de determinación superiores al 90 % y sus parámetros fueron significativos con un nivel de confianza del 5% (Tabla 9). Los cuatro modelos resultaron de la combinación de sus variables independientes DAP y h_t , transformadas en Ln (modelos 2 y

4) y no transformadas (modelos 1 y 3). De los modelos no transformados, el modelo 1 fue el que presento el mayor coeficiente de determinación y menor nivel de significancia ($r^2_{ajustado}=0,96$; $p<0,0001$); mientras que, para los modelos transformados, el modelo 2 fue el que presento el mejor ajuste ($r^2_{ajustado}=0,95$; $p<0,0001$).

Tabla 9

*Modelos lineales alométricos y estadísticos de Volumen obtenidos para *Plastimiscium pinnatum**

Modelo	$R^2_{AJ.}$	ECPM	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=0,01+0,0043*h_t - 0,00099*DAP+ 0,000013*DAP^2$	0,96	0,000052	<0,0001	-1725,42	-1708,16
2. $V=-0,02+0,01*\ln h_t -0,0014*DAP+0,000015*DAP^2$	0,95	0,000044	<0,0001	-1718,42	-1701,07
3. $V=0,0032+0,00053*DAP -0,01*h_t+ 0,002*h_t^2$	0,90	0,00012	0,0009	-1535,88	-1517,12
4. $\ln V=-13,87+1,06*\ln h_t+ 1,94*\ln DAP$	1	0,01	<0,0001	-169,25	-1538,92

V= volumen ($m^3 \text{ arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); $R^2_{ajustado}$ = coeficiente de determinación ajustado; ECPM= Error cuadrático medio; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

El ajuste logrado en los modelos para la estimación del volumen de *Plastimiscium pinnatum* son similares a los obtenidos Álvarez (2008); por para los arboles de *Schizolobium parahyba* de misma Familia Fabaceae, reportando un coeficiente de determinación superior al 95 %. En otro estudio, Jáuregui (2016), menciona que usar las dos variables independientes DAP y altura en conjunto para la construcción de modelos alométricos para la estimación del volumen aumenta el ajuste, debido a que se aumenta el número de variables explicativas para la predicción.

La Figura 9 muestra la distribución de los residuos parciales del volumen en función de las variables independientes del modelo 1, en donde se aprecia una relación positiva entre el volumen y la h_t y el DAP^2 , y una relación negativa entre el volumen y el dap. En el modelo 2 se observa una relación positiva del volumen con $\ln h_t$ y DAP^2 , y una relación negativa entre el volumen y DAP (figura 10).

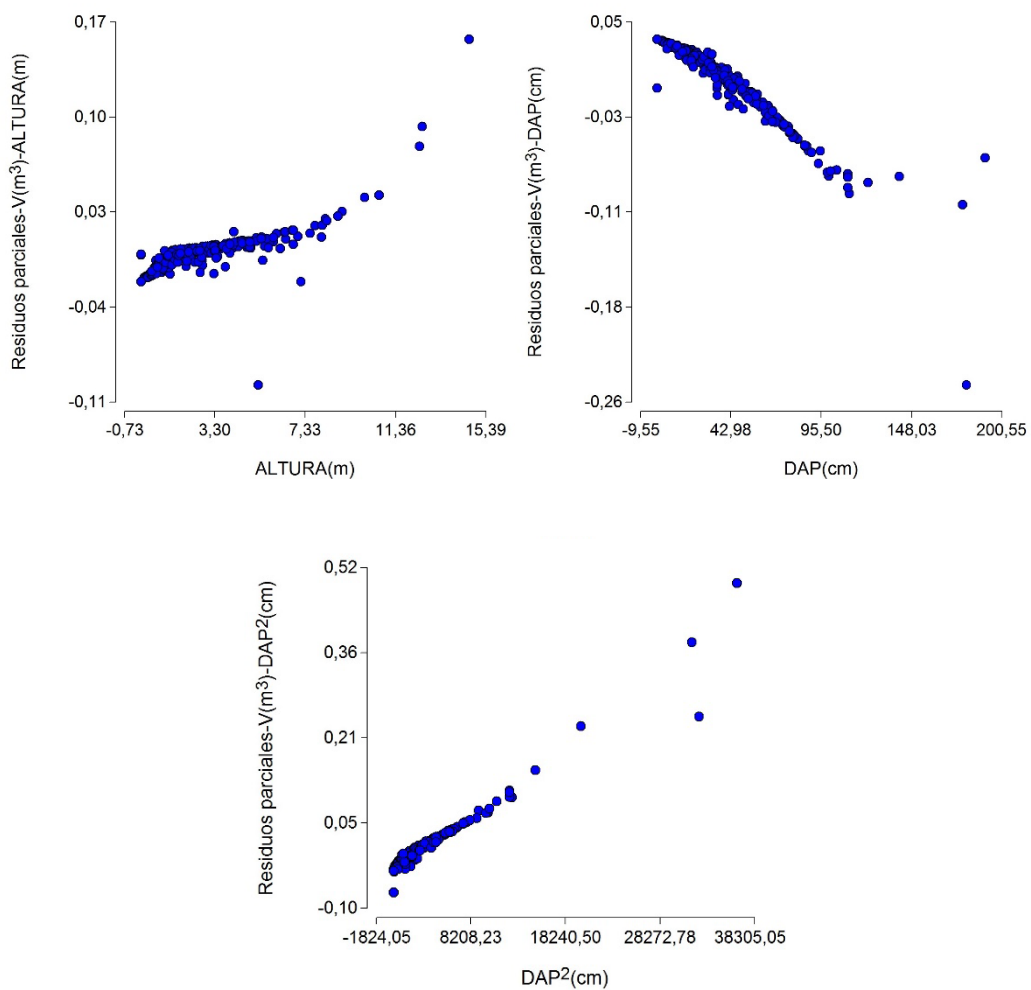
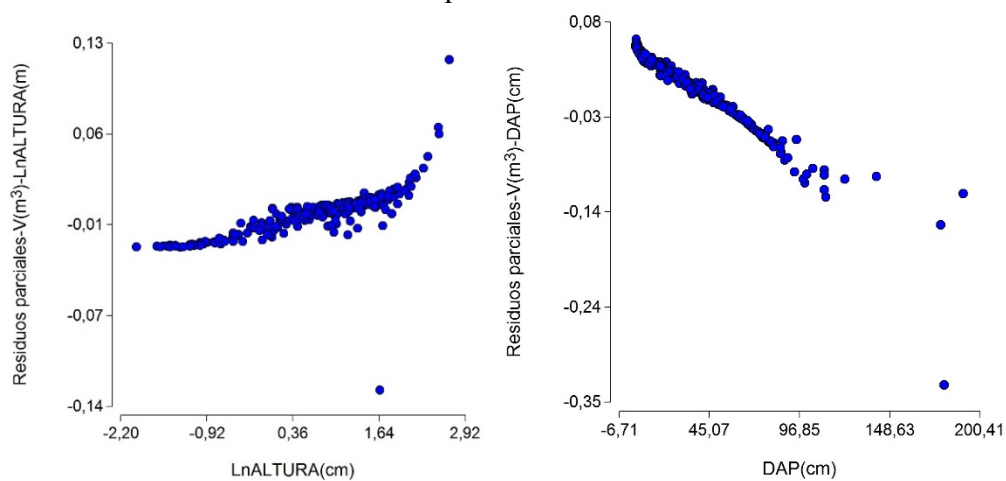


Figura 9. Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y altura para el modelo 1



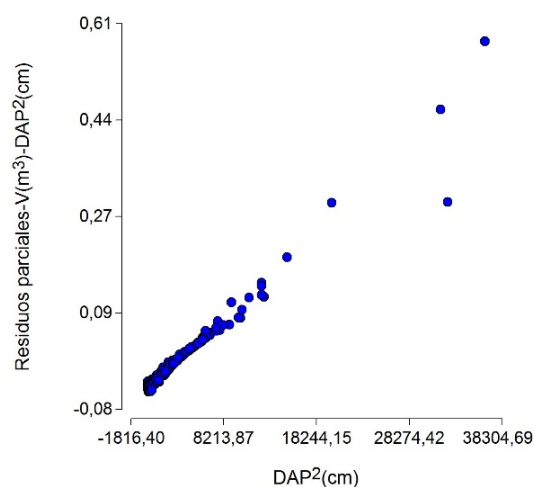


Figura 10. Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln altura y DAP para el modelo 3

Se encontraron tres modelos no lineales para el cálculo del volumen de árboles de *Plastimiscium pinnatum*, que fueron estadísticamente significativos ($\alpha=0.05$). Todos los modelos significativos incluyeron a la variable independiente DAP (Tabla 10). Los modelos no lineales Logístico y Gompertz (modelos 1 y 2, respectivamente) fueron los que mejor se ajustaron (AIC=-1722,76; BIC=-1708,96) (Figura 11).

Tabla 10

*Modelos alométricos no lineales y estadísticos de volumen obtenidos para *Plastimiscium pinnatum**

Modelo	CMEror	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=0,35/(1+160,16*\exp(-0,0015*DAP))$	0,000035	0,01	<0,0001	-1722,76	-1708,96
2. $V=0,19*\exp(-0,28*\exp(-0,0008*DAP))$	0,000035	0,01	<0,0001	-1721,43	-1707,62
3. $V=0,0028*\exp(0,03*DAP)$	0,000075	0,01	<0,0001	-1549,27	-1538,92

V= volumen (m^3 árbol⁻¹ año⁻¹); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total (m); CMEror= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

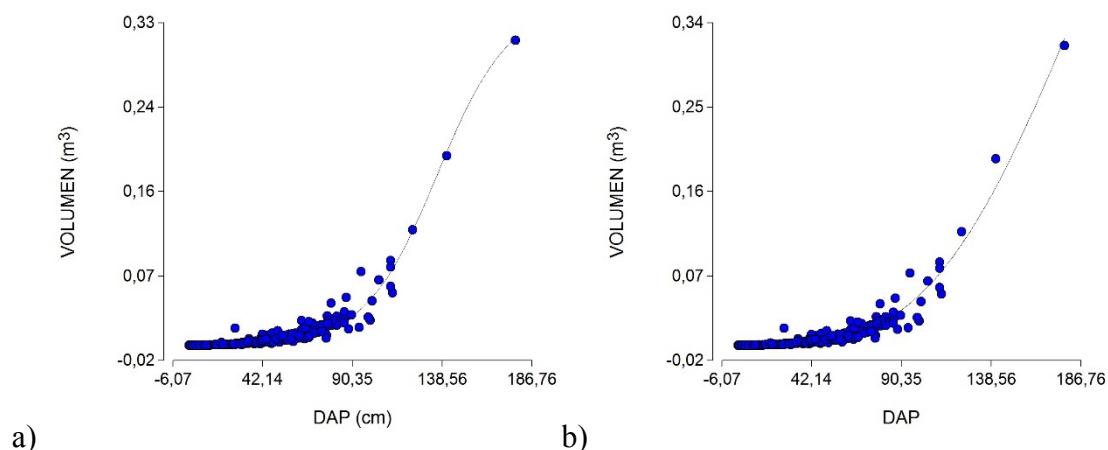


Figura 11. Modelos no lineales logístico y Gompertz para estimar el volumen de *Plastimiscium pinnatum*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

Para la estimación de biomasa se encontraron dos modelos no lineales para árboles de *Plastimiscium pinnatum*, los mismos que fueron altamente significativos (Tabla 11). Los dos modelos se construyeron con la variable independiente área de copa transformada (modelo 2) y no transformada (modelo 1), los modelos no lineales exponencial e hiperbólico (modelo 1 y 2, respectivamente) tuvieron valores de ajuste similares (Figura 12).

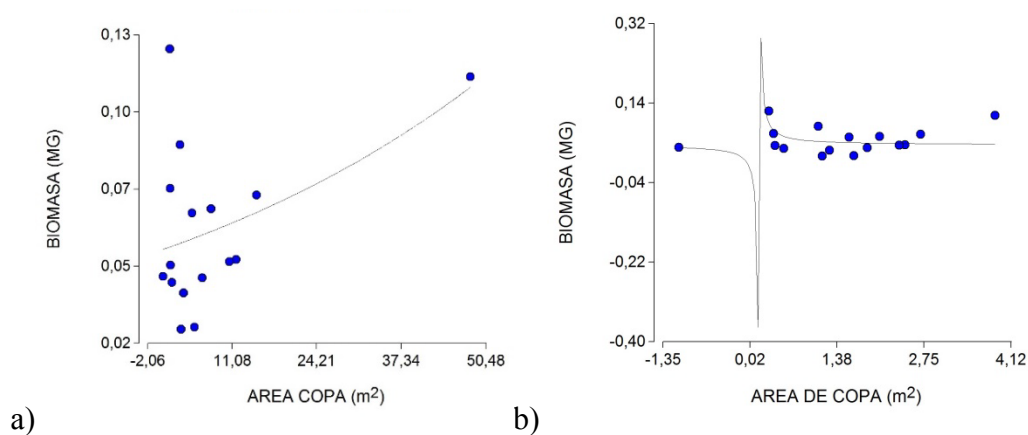


Figura 12. Modelos no lineales exponencial e hiperbólico para estimar la cantidad de biomasa por *Plastimiscium pinnatum* a) Modelo 1; b) Modelo 2

En la literatura no se encuentra información en la que se hayan realizado modelos de biomasa con la variable independiente área de copa. Estudios en zonas tropicales (Álvarez, 2008; Fonseca

et al, 2013; Regina, 2000; Solano et al, 2014) y en zonas templadas (Chave et al, 2001), reportan modelos alométricos con las variables dasométricas DAP y altura.

Tabla 11

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para *Platymiscium pinnatum*

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $BM=0,05*\exp(0,002*A_c)$	0,00076	0,03	<0,0001	-65,67	-63,36
2. $BM=\frac{0,05 - \ln A_c}{-0,16 - \ln A_c}$	0,00081	0,03	<0,0001	-64,65	-51,75

BM=Biomasa ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); A_c = Área de copa (m^2); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Por último, para la estimación de la cantidad de carbono que secuestran los árboles de *Platymiscium pinnatum*, se encontraron dos modelos no lineales significativos (Tabla 12). El primer modelo significativo que incluye a la variable independiente área de copa transformada (modelo 2) corresponde a un modelo hiperbólico; mientras que el segundo modelo que incluye al área de copa no transformada corresponde a un modelo exponencial (modelo 1). Ambos modelos presentaron valores bajos de todos los criterios de evaluación (Figura 13).

Tabla 12

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para *Platymiscium pinnatum*

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $C=0,03*\exp(0,02*A_c)$	0,00019	0,01	<0,0001	-87,86	-85,54
2. $C=\frac{0,02 - \ln A_c}{-0,16 - \ln A_c}$	0,0002	0,01	<0,0001	-86,83	-84,51

C= Carbono ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); A_c = área de copa (m^2); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

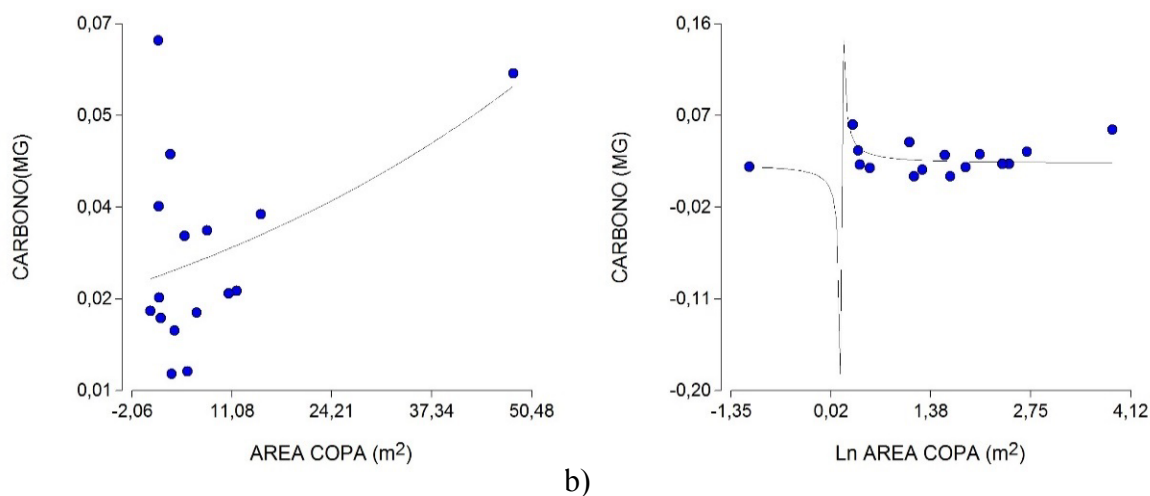


Figura 13. Modelos no lineales exponencial e hiperbólico para estimar la cantidad de carbono secuestrada por *Plastimiscium pinnatum*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

4.4 Modelos alométricos para árboles de *Zygia Longifolia*

En la Tabla 13 se presentan cuatro modelos lineales de volumen para arboles de *Zygia longifolia*, los cuales presentaron sus parámetros significativos para todos los criterios de evaluación. Los cuatro modelos resultaron de la combinación de las variables independientes DAP y h_t no transformadas y transformadas a Ln. Los modelos 1 y 2 fueron los que presentaron mejor ajuste, ya que presentaron los coeficientes determinación más altos y los valores más bajos de los criterios de AIC y BIC.

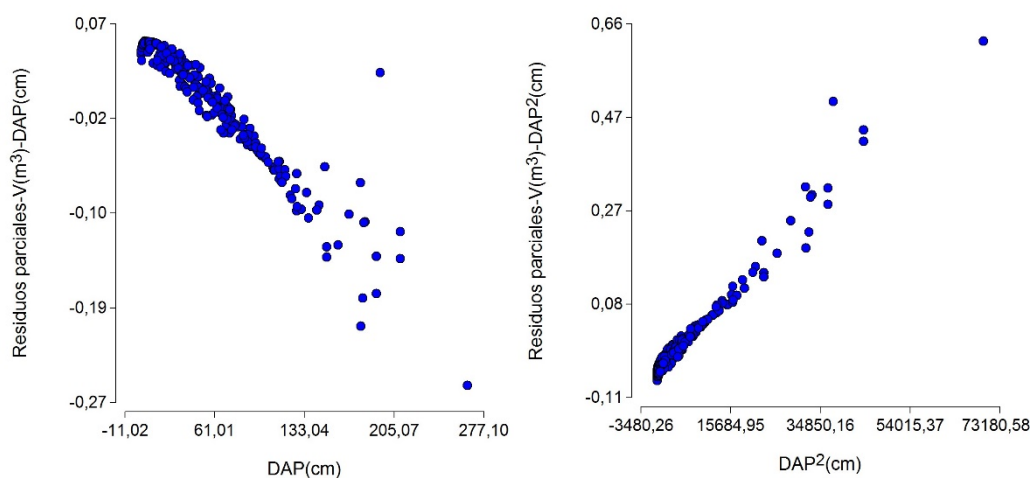
Tabla 13

Modelos alométricos lineales y estadísticos de Volumen obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	R^2_{AJ}	ECPM	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=0,01 - 0,00095 \cdot DAP + 0,0000099 \cdot DAP^2 + 0,01 \ln h_t + 0,01 \ln h_t^2$	0,96	0,00016	0,0001	-1538,84	-1517,53
2. $V=0,01 + 0,01 \cdot \ln h_t - 0,00099 \cdot DAP + 0,000011 \cdot DAP^2$	0,97	0,00022	<0,0001	-1461,09	-1061,66
3. $V=-0,04 + 0,0011 \cdot DAP - 0,03 \cdot \ln h_t + 0,02 \cdot \ln h_t^2$	0,76	0,00096	<0,0001	-1316,49	-1302,28
4. $V=-0,03 - 0,02 \cdot \ln h_t + 0,0013 \cdot DAP$	0,71	0,0012	<0,0001	-1022,66	-1008,44

V= volumen ($m^3 \text{ arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total; $R^2_{ajustado}$ = coeficiente de determinación ajustado; ECPM= Error cuadrático medio; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Estos resultados concuerdan con los señalados por Moret y Ruiz (1998), quienes señalan los modelos más idóneos para la estimación del volumen de madera se obtienen a partir de la inclusión de dos variables independientes (DAP y h_t) y la transformación a Ln de dichas variables. En la Figura 14 se muestran los gráficos de dispersión entre los residuos parciales del volumen y las variables independientes del modelo 1. En estos gráficos, se aprecia una relación positiva entre el volumen con el DAP^2 , LN h_t y LN h_t^2 , y una relación negativa entre el volumen y DAP.



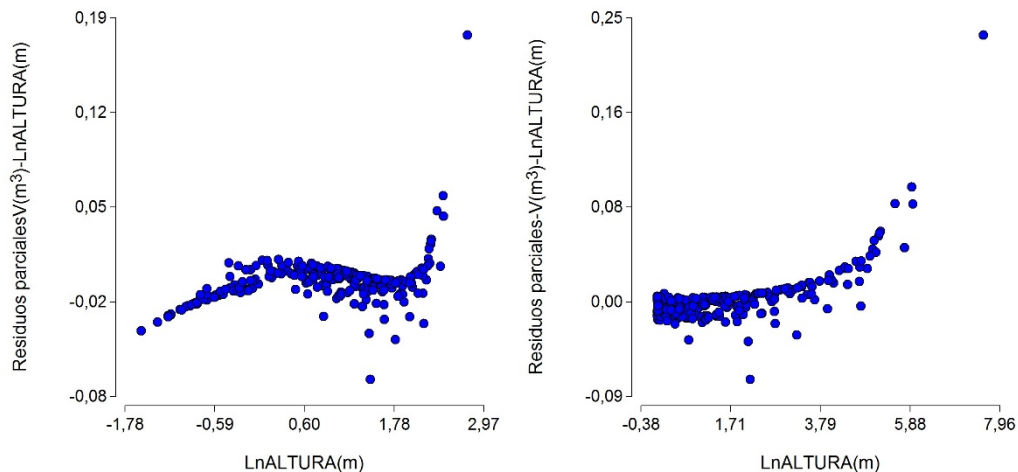
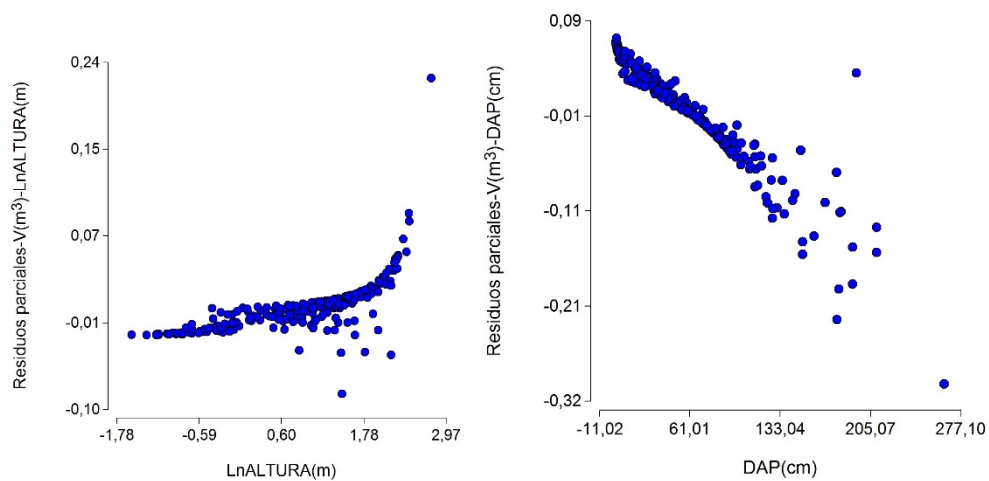


Figura 14. Dispersión residuos parciales de volumen en función del DAP y Ln altura para el modelo 1

En la Figura 15 se presentan los gráficos de dispersión entre los residuos parciales del volumen y las variables independientes del modelo 2; se aprecia una relación positiva del volumen con el LN h_t y el DAP², y una relación negativa entre el volumen y el DAP.



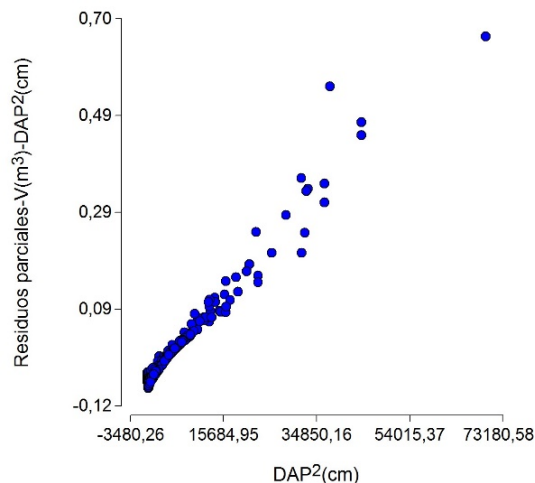


Figura 15. Dispersión residuos parciales de volumen en función del Ln altura y dap para el modelo 2

Además, se obtuvieron tres modelos alométricos no lineales significados, construidos a partir de la variable independiente dap (Tabla 14). Los modelos no lineales Gompertz (Modelo 1; Figura 16 a) y Logístico (Modelo 2; Figura 16 b) que relacionan el volumen con dap fueron los que mejor ajuste presentaron de acuerdo con los criterios de evaluación p-valor, AIC y BIC (Figura 16).

Tabla 14

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Volumen obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $V=1,06*\exp(-7,98*\exp(-0,01*DAP))$	0,00024	0,02	<0,0001	-1413,82	-1399,60
2. $V=0,48/(1+879,52*\exp(-0,04*DAP))$	0,00035	0,02	<0,0001	-1316,49	-1302,28
3. $V=0,01*\exp(0,02*DAP)$	0,00056	0,02	<0,0001	-1195,06	-1184,40

V= volumen (m^3 árbol⁻¹ año⁻¹); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

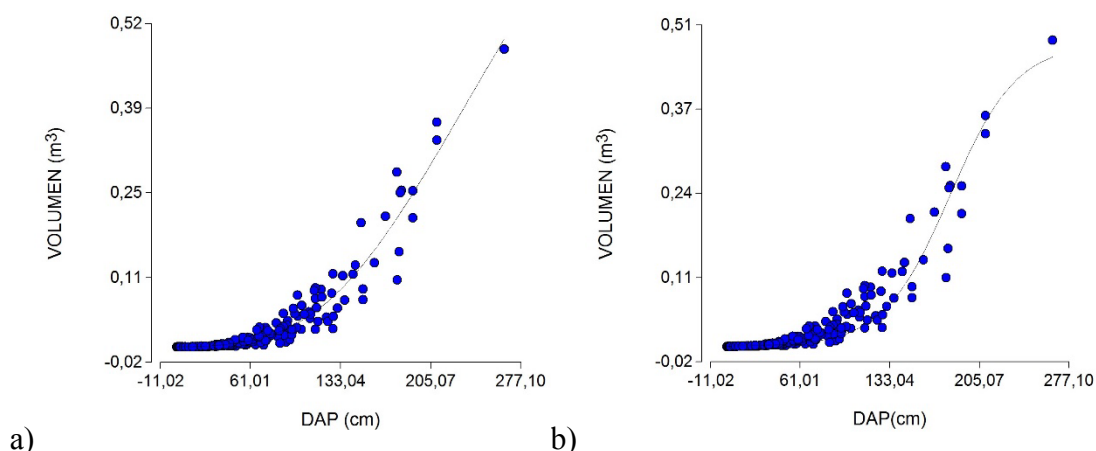


Figura 16. Modelos no lineales Logístico y Gompertz para estimar el volumen para *Zygia longifolia*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

Para la estimación de la biomasa producida por los árboles de *Zygia longifolia* se encontraron modelos lineales y no lineales significativos. Los modelos lineales resultaron de la combinación de dos o tres variables independientes (DAP, h_t y A_c) transformadas en Ln. El Modelo 1 compuesto por las variables independientes h_t y A_c fue el que mejor se ajustó (Tabla 15).

Tabla 15

Modelos alométricos lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	R^2 AJ.	ECPM	p-Valor	AIC	BIC
1. $BM=0,35+0,07*h_t-0,0047*h_t^2-0,62*\ln A_c+0,06*\ln A_c^2$	0,83	0,0033	0,0187	-57,80	-52,80
2. $\ln BM = -21,38 + 0,46 * h_t - 0,03 * h_t^2 + 9,14 \ln DAP - 0,98 * \ln DAP^2 - 2,41 * \ln A_c + 0,41 * \ln A_c^2$	0,83	0,17	0,0006	5,22	11,89

BM= Biomasa ($Mg \text{ arbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); h_t = altura total; A_c =Área de copa (m^2) R^2 ajustado= coeficiente de determinación ajustado; ECPM= Error cuadrático medio; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Los modelos generados para estimar biomasa se asemejan a los encontrados en otros estudios que utilizaron las variables independientes DAP y h_t transformadas y no transformadas en Ln. Por ejemplo, Jáuregui (2016), construyó modelos alométricos significativos para estimar la biomasa de especímenes de *Enterolobium cyclocarpum*, de la misma Familia botánica. En otro estudio realizado en Ecuador, Solano, Eras, Vega, & Cueva, (2014) obtuvo modelos alométricos para estimar la biomasa de árboles de *Eriotheca ruizii*, de la familia Malvaceae.

Los gráficos de dispersión entre de los residuos parciales de la biomasa y los valores de las variables independientes biomasa para el modelo 1, muestran una relación positiva entre la biomasa con la h_t y el $\text{Ln } A_c^2$, y una relación negativa entre la biomasa y la h_t^2 y el $\text{Ln } A_c$ (Figura 17).

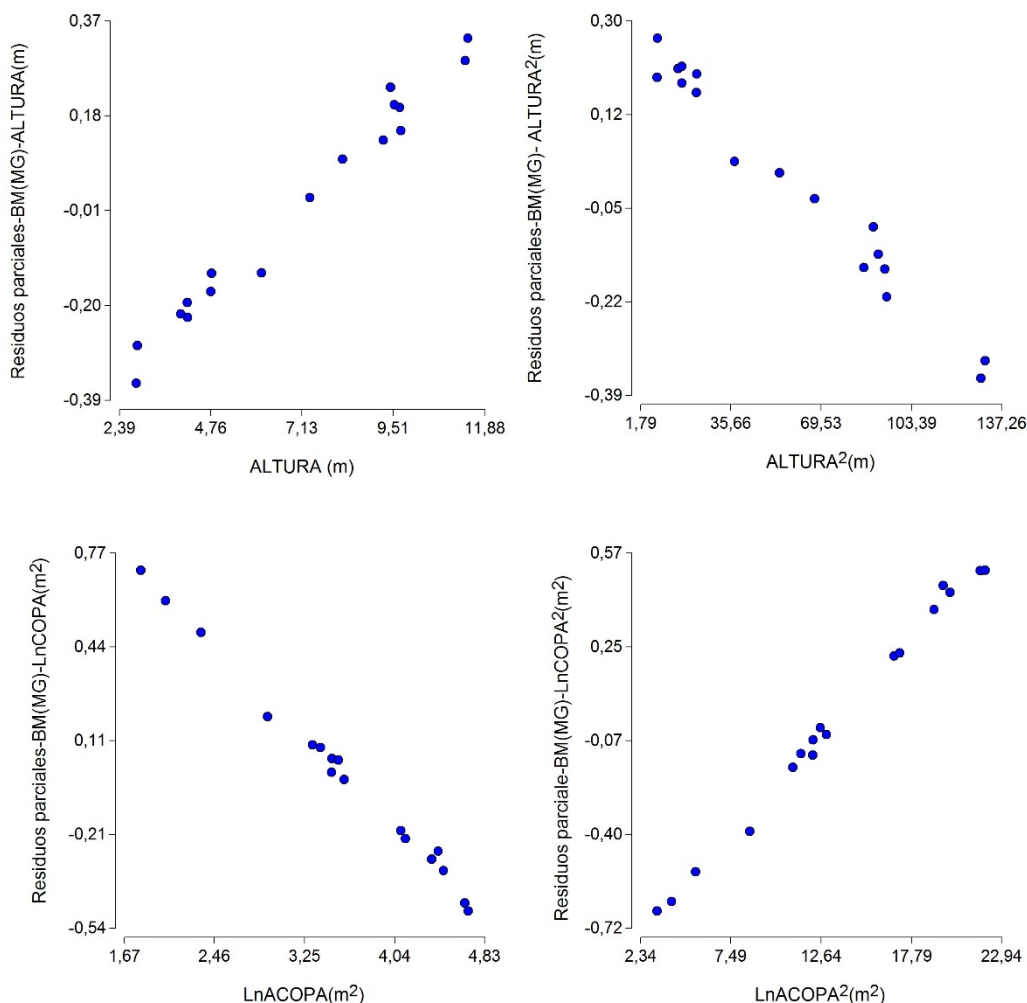


Figura 17. Dispersión residuos parciales de Biomasa en función de la altura y Ln área de copa para el modelo 1

Adicionalmente, se encontraron tres modelos no lineales significativos para el cálculo de la Biomasa de los árboles de *Zygia longifolia*. Un modelo incluyó a la variable independiente A_c y dos modelos a la variable independiente DAP transformadas y no transformadas (Tabla 16). Los

modelos no lineales exponenciales que relacionaron la biomasa con el A_c y el dap (modelos 1 y 2, respectivamente) fueron los que mejor ajuste presentaron (Figura 18).

Tabla 16

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Biomasa obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	CMError	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $BM=0,12*\exp(0,01*A_c)$	0,0028	0,05	<0,0001	-47,68	-45,18
2. $BM=0,08*\exp(0,01*DAP)$	0,0032	0,06	0,0004	-45,64	-43,04
3. $BM=1-\exp(-\left(\frac{DAP}{6,48}\right)^{4,81})$	0,0033	0,06	<0,0001	-45,23	-42,73

BM= Biomasa ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); A_c =Área de copa (m^2); CMError= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

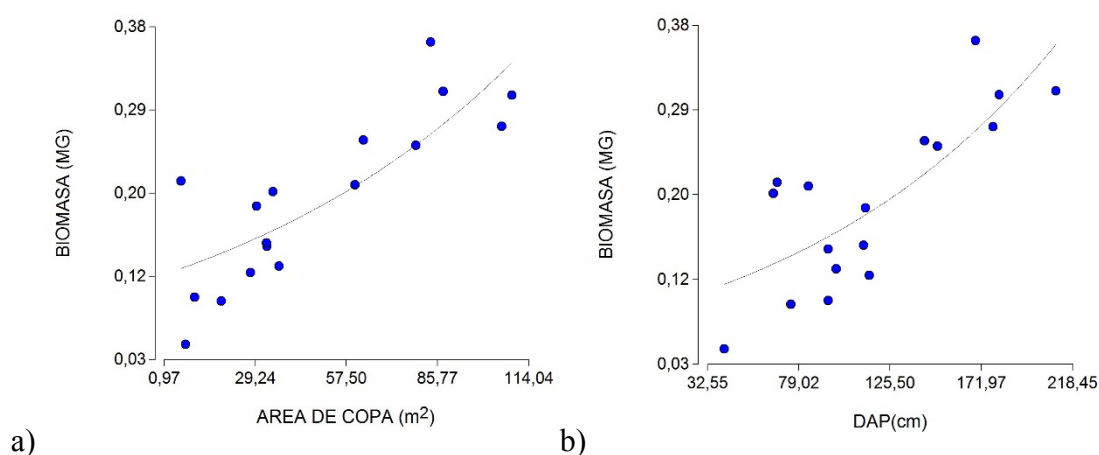


Figura 18. Modelos no lineales exponenciales para estimar la cantidad de biomasa secuestrada por *Zygia longifolia*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

Para estimar la cantidad de carbono que secuestran los árboles de *Zygia longifolia*, se encontraron también modelos lineales y no lineales. Los modelos lineales resultaron de la combinación de dos o tres variables independientes (DAP, h_t y A_c) transformadas en Ln (Tabla 17). El modelo 1 fue el que mejor se ajustó, presentando los valores más bajos de los criterios de AIC y BIC.

Tabla 17

Modelos alométricos lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	R ² AJ.	ECPM	p-Valor	AIC	BIC
1. $C=0,187+0,04*h_t-0,0024*h_t^2-0,17*\ln A_c+0,3*\ln A_c^2$	0,83	0,00083	0,0187	-81,36	-76,36

C= Carbono (Mg); h_t= altura total (m); A_c=Área de copa (m²) R²ajustado= coeficiente de determinación ajustado; ECPM= Error cuadrático medio; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

Los gráficos de dispersión de los residuos parciales contra los valores predichos de carbono para el modelo 1, mostró una relación positiva entre la biomasa con la h_t y el Ln A_c², y una relación negativa entre la biomasa y la h_t² y el Ln A_c.

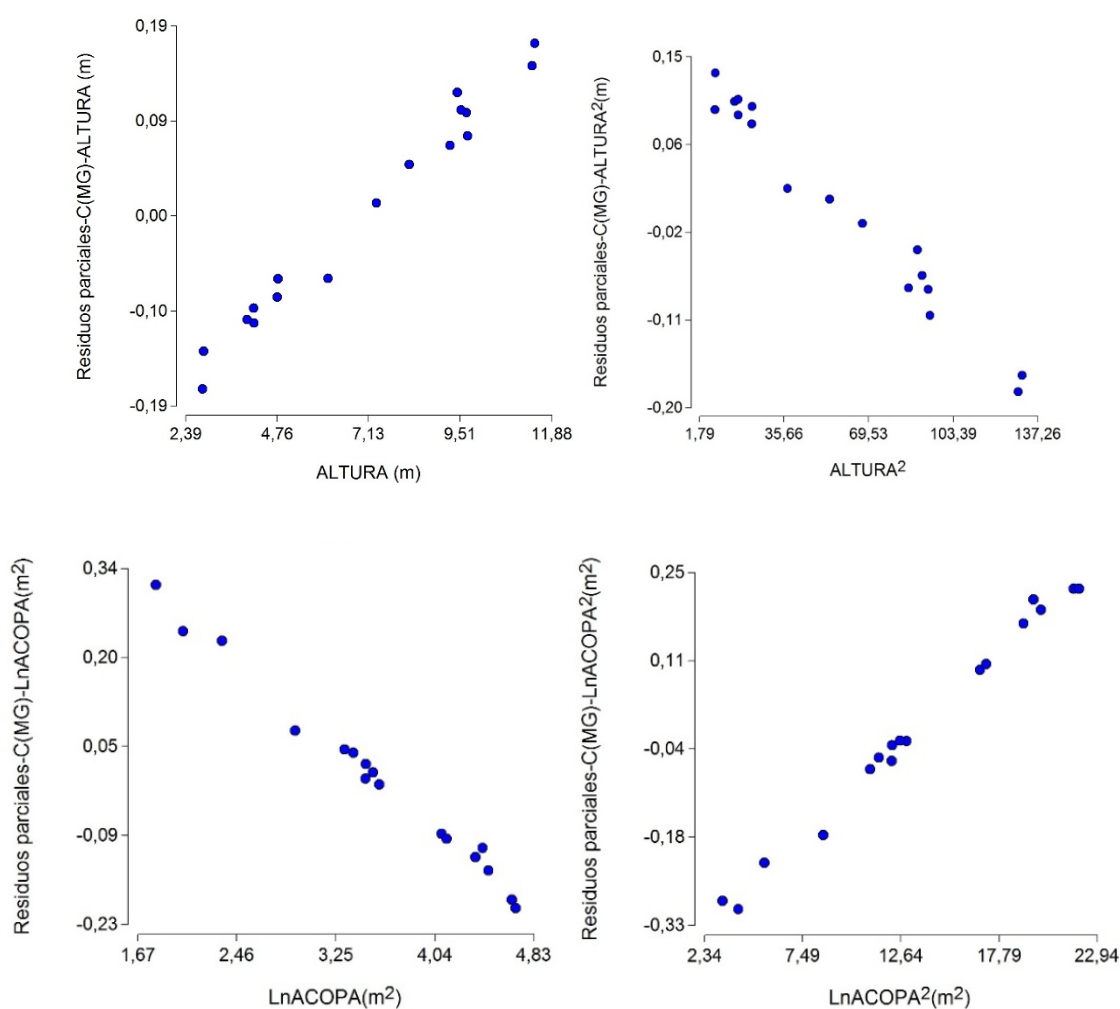


Figura 19. Dispersión residuos parciales de Carbono en función de la altura y Ln área de copa para el modelo 1

Los modelos no lineales encontrados para la estimación de la cantidad de carbono para los árboles de *Zygia longifolia*, incluyeron a una variable independiente A_c no transformada y a una variable independiente DAP no transformada (Tabla 18). Los modelos no lineales exponenciales que relacionaron la biomasa con el A_c y el DAP fueron exponenciales (modelos 1 y 2, respectivamente) y presentaron los valores más bajos de AIC y BIC (Figura 20).

Tabla 18

Modelos alométricos no lineales y estadísticos de Carbono obtenidos para Zygia longifolia

Modelo	CMErrror	Sigma	p-Valor	AIC	BIC
1. $C=0,06*\exp(0,01*A_c)$	0,00071	0,03	<0,0001	-71,25	-68,25
2. $C=0,04*\exp(0,01*DAP)$	0,0008	0,03	0,0004	-69,11	-66,61

C= Carbono ($Mg\ arbol^{-1}\ año^{-1}$); DAP= diámetro a la altura del pecho (cm); A_c =Área de copa (m^2); CMErrror= cuadrado medio del error; AIC= Criterio de información Akaike; BIC= Criterio de información Bayesiano.

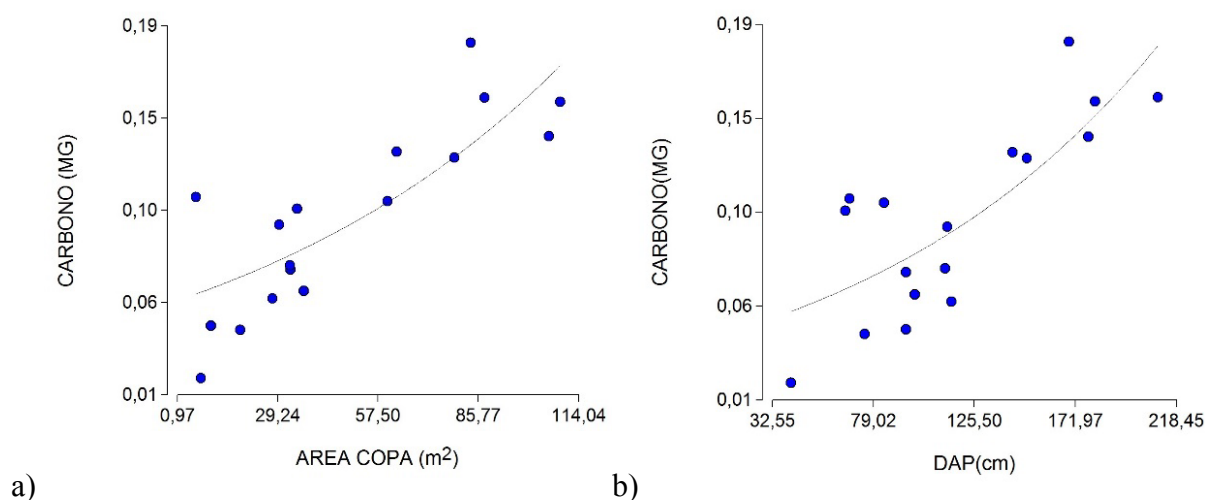


Figura 20. Modelos no lineales exponenciales para estimar la cantidad de carbono secuestrada por *Zygia longifolia*. a) Modelo 1; b) Modelo 2

4.5 Estimación de la cantidad de carbono secuestrada por las especies forestales

Para el cálculo de la cantidad de carbono secuestrada por los árboles de las tres especies evaluadas se consideraron los valores promedios del DAP, altura y área de copa obtenidos para los árboles de cada especie a los seis años de edad. Posteriormente se reemplazaron estos valores

en cada una de las ecuaciones alométricas el DAP promedio en cm, altura promedio en m y el área de copa en m² y se obtuvo la cantidad de carbono secuestrada por los individuos de cada especie en Mg árbol⁻¹ año⁻¹ (Tabla 19).

Tabla 19

Cantidad de carbono secuestrada por los árboles de las tres especies Piptadenia pteroclada, Zygia longifolia y Plastimiscium pinnatum

No	MODELO	ESPECIE	CANTIDAD CARBONO Mg árbol ⁻¹ año ⁻¹
1	$C=0,187+0,04*h_t-0,0024*h_t^2-0,17*\ln A_c+0,3*\ln A_c^2$	<i>Zygia longifolia</i>	0,85
2	$C=0,06*\exp(0,01*A_c)$	<i>Zygia longifolia</i>	0,25
3	$C=0,04*\exp(0,01*DAP)$	<i>Zygia longifolia</i>	0,70
4	$C=0,04*\exp(0,0045*DAP)$	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,82
5	$C=0,04*\exp(0,06*h_t)$	<i>Piptadenia pteroclada</i>	0,14
6	$C=0,03*\exp(0,02*A_c)$	<i>Plastimiscium pinnatum</i>	0,58
7	$C=\frac{0,02-\ln A_c}{-0,16-\ln A_c}$	<i>Plastimiscium pinnatum</i>	0,92

C= Carbono (Mg. árbol⁻¹. año⁻¹); DAP= promedio del diámetro a la altura del pecho (cm); A_c= promedio del área de copa (m²); h_tpromedio de la altura total (m).

La cantidad de carbono secuestrada por los árboles de *Piptadenia pteroclada*, *Zygia longifolia* y *Plastimiscium pinnatum*, según las ecuaciones que tuvieron mejor ajuste (ecuación 3, 4 y 6) fue de 0,82; 0,70; y 0,58 Mg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente. Estos valores son mayores de los encontrados por González (2008), quien reportó que en bosques secundarios montañosos, los árboles de *Pinnus occarpa* con diámetros ≤ 30 cm almacenaron 0,29 Mg árbol⁻¹ año⁻¹. En otro estudio realizado en bosques de galería de *Alnus acuminata* se encontraron valores promedios de 0,2 Mg árbol⁻¹año⁻¹ para árboles con diámetro ≤ 30 cm, 0,87 Mg árbol⁻¹ año⁻¹ para arboles con diámetro entre 30 y 60 cm y 1,96 Mg árbol⁻¹ año⁻¹ para árboles con diámetros entre 60 y 100 cm (Díaz Ríos, y otros, 2016), lo que indica que el contenido de carbono en el fuste aumenta al aumentar su DAP. Por otro lado, Rodríguez, Reyes, & Mercadet, (2010), reportaron que los árboles de *Acacia mangium* y *Acacia auriculiformis*, plantados sobre fincas forestales tropicales de Cuba secuestraron 0,82 y 0,58 Mg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente; estos valores fueron

similares a los reportados en la presente investigación. Orrego, Del Valle A, & Moreno (2003), señalan que la cantidad de carbono secuestrada por las especies de un bosque primario ($1,6 \text{ Mg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$), fue superior a la cantidad secuestrada por las especies de un bosque secundario ($0,8 \text{ Mg árbol}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

La densidad de siembra es un factor importante para la fijación de carbono por árbol. En un estudio realizado por Montero & Kanninen (2001), para *Terminalia amazonia* de 10 años, se reportó que a una densidad de $2 \times 2 \text{ m}$ se secuestraron $47,8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y a una densidad de $2,5 \times 2,5 \text{ m}$ se almacenaron $49,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; esto sugiere que a menores densidades de plantación los árboles tienen mayor espacio para crecer, interceptan mayor luminosidad y producen mayor biomasa y por ende mayor cantidad de Carbono en todas sus estructuras (González, 2008).

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se desarrollaron modelos alométricos lineales y no lineales a través de métodos no destructivos para estimar el volumen, la biomasa total y la cantidad de carbono en las tres especies forestales de seis años, construidos en función de las variables DAP, altura total y área de copa.
- Los modelos no lineales fueron las que mejor ajuste tuvieron para la estimación de volumen del árbol, biomasa total y cantidad de carbono almacenado en las tres especies arbóreas, ya que tuvieron valores de AIC Y BIC bajos, a un nivel de significancia menor del 5%.
- Los modelos que mejor ajuste presentaron para estimar la cantidad de volumen fueron $V=0,66*\exp(-0,43*\exp(-0,00075*DAP))$ para *Piptadenia pteroclada*, $V=0,35/(1+160.16*\exp(-0,0015*DAP))$ para *Platymiscium pinnatum* y $V=1,06*\exp(-7,98*\exp(-0,01*DAP))$ para *Zygia longifolia*.
- Las ecuaciones que mejor se ajustaron para estimar la biomasa total de los individuos de *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* fueron $BM=0,01*\exp(0,00063*DAP)$; $BM=0,05*\exp(0,002*A_c)$ y $BM=0,08*\exp(0,01*DAP)$, respectivamente.
- Los modelos más idóneos para estimar la cantidad de carbono almacenada por los árboles de las especies *Piptadenia pteroclada*, *Platymiscium pinnatum* y *Zygia longifolia* fueron

$C=0,04*\exp(0,0045*DAP)$; $C=0,003*\exp(0,02*A_c)$ y $C=0,064*\exp(0,01DAP)$, respectivamente.

- La cantidad de carbono secuestrada por los árboles de 6 años de edad de las especies *Piptadenia pteroclada*, *Zygia longifolia* y *Platimiscium pinnatum* fue 0,82, 0,70 y 0,58 Mg árbol⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

5.2 Recomendaciones

- Utilizar los modelos alométricos encontrados, en plantaciones con condiciones ambientales similares a las de esta investigación.
- Incluir en futuras investigaciones la biomasa de raíces, ya que este componente secuestra grandes cantidades de carbono.
- Continuar evaluando las variables dasométricas en los árboles de las plantaciones establecidas, hasta obtener una curva de crecimiento más estable.
- Utilizar el método no destructivo para el cálculo de la cantidad de carbono almacenada, ya que los resultados fueron similares a los realizados con métodos destructivos.

5.3 Bibliografía

- Álvarez, G. (2008). Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia (*Tesis sometida para optar el título de Magister forestal*). Centro Agronómico Tropical de investigación y enseñanza, Turrialba, Costa Rica.
- Ballesteros, C., & Tapia, D. (2007). *Evaluación de Diferentes Sistemas para el Tratamiento de Residuos de Perforación en el Campo Tarapoa operado por la empresa Andes Petroleum S.A.* 10.
- Bravo, E. (2007). Impactos de la explotación petrolera. 61.
- Broad, L. (1998). Allometry and Growth. *Forest Science*, 44(33), 458-464.
- Brown, S, Gillespe, A., & Lugo, A. (1998). Biomass estimation for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*, 4(35), 881-902.
- Brown, Sandra, & Iverson, L. R. (1992). Biomass estimates for tropical forests. *World Resource Review*, 4(3), 19.
- Caballero, M., & Lozano, S. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 11.
- Cerdán, C. (2007). Conocimiento local sobre servicios ecosistémicos de cafeticultores del Corredor Biológico Volcánica Central Talamanca, Costa Rica (*Tesis sometida para optar el título de Magister Scientie en Agricultura Ecológica*). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Chave, J, Riéra, B., & Dubois, M. (2001). Estimation of biomass in a neotropical forest of French Guiana: spatial and temporal variability. *Journal of Tropical Ecology*, 17, 79-96.
- Chave, Jérôme, Réjou-Méchain, M., Búrquez, A., Chidumayo, E., Colgan, M. S., Delitti, W. B. C., ... Vieilledent, G. (2014). Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. *Global Change Biology*, 20(10), 3177-3190.
- Di Rienzo, J., Casanoves, F., Balzarini, M., Gonzalez, L., M, T., & Robledo, C. (2008). InfoStat Versión 2011. Argentina.
- Díaz-Ríos, M. de J., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Vélez, A. S., & Bueno, A. L. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo* Allometric equations for estimating biomass and

- carbon alder obtained by a nondestructive method. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (16), 3235-3249.
- Ecured. (2016a). *Provincia de Orellana (Ecuador)* - EcuRed. Recuperado 20 de junio de 2019, de [https://www.ecured.cu/Provincia_de_Orellana_\(Ecuador\)#Clima](https://www.ecured.cu/Provincia_de_Orellana_(Ecuador)#Clima)
- Ecured. (2016b). *Provincia de Sucumbíos (Ecuador)*. Recuperado 20 de junio de 2019, de [https://www.ecured.cu/Provincia_de_Sucumb%C3%ADos_\(Ecuador\)#Caracter.C3.ADsticas](https://www.ecured.cu/Provincia_de_Sucumb%C3%ADos_(Ecuador)#Caracter.C3.ADsticas)
- Espinoza, E. (2018). Relaciones entre las características edafológicas y las variables dasométricas de tres especies arbóreas plantadas en suelos perturbados por la actividad petrolera. Universidad de las fuerzas armadas, Sangolquí.
- FAO. (2008). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. Washington: FAO.
- Fonseca G, W., Alice G, F., & Rey B, J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque (Valdivia)*, 30(1), 36-47.
- Fonseca, W., Rey Benayas, J. M., & Alice, F. E. (2011). Carbon accumulation in the biomass and soil of different aged secondary forests in the humid tropics of Costa Rica. *Forest Ecology and Management*, 262(8), 1400-1408.
- Fonseca, W., Ruíz, L., Rojas, M., & Alice, F. (2013). Modelos alométricos para la estimación de biomasa y carbono en *Alnus acuminata*. *Revista de Ciencias Ambientales*, 46-2.4
- Forman, R. T. T., & Deblinger, R. D. (2000). The Ecological Road-Effect Zone of a Massachusetts (U.S.A.) Suburban Highway. *Conservation Biology*, 14(1), 36-46.
- Gayoso A, J., & Guerra C, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33-38.
- Gómez, M., & Toro, J. (2011). Manejo de las semillas y la propagación de diez especies forestales del Bosque Seco Tropical by Corantioquia. Recuperado 20 de junio de 2019, de https://issuu.com/corantioquia/docs/boletin_semillas_bosque_secotropical__1_
- González, M. (2008). Estimación de la biomasa aérea y la captura de carbono en regeneración natural a *Pinus maximinoi* H.E. Moore, *Pinus oocarpa* var. *ochoterenai* Mtz y *Quercus* sp.

- en el norte de Estado de Chiapas, Mexico (Tesis sometida para optar el título de ingeniero forestal). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Guaranda, W. (2014). Apuntes sobre la explotación petrolera en el Ecuador. Recuperado 3 de septiembre de 2018, de <https://www.inredh.org/index.php/archivo/boletines-ambientales/153-apuntes-sobre-la-explotacion-petrolera-en-el-ecuador>
- Hernández, H., Gagnon, D., & Davidson, R. (2015). Crecimiento y producción inicial de 15 especies de árboles tropicales de la Amazonía ecuatoriana de estados sucesionales diferentes. *Siembra*, 2(1), 69-75.
- Ibáñez, A., Blanquer, G., Manu, J., & Moreno, R. (2011). Inceptisoles. (Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural), 8.
- IGM. (2010). Cartografía Republica del Ecuador. Recuperado de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/geoinformacion/>
- Jandl, R. (2011). Secuestro de carbono en bosques – El papel del suelo. *Revista Forestal Iberoamericana*, 1(1), 57-62.
- Jaramillo, A. M. (2014). Modelos Alométricos para estimar Biomasa aérea del Frailejón (*Espeletia hartwegiana Cuatrecasas*) del páramo de anaime, Cajamarca, Tomila, Colombia. (Trabajo de grado como requisito parcial para optar al título de Biólogo). Universidad de Tolima, IBAGUÉ.
- Jáuregui, M. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar volumen y biomasa aérea de *Enterolobium cyclocarpum* y *Ceiba pentandra* en la Escuela Agrícola Panamericano Zamorano, Honduras (Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo). Escuela Agrícola Panamerica Zamorano, Honduras.
- Jimenez, M. (2009). Resiliencia de los ecosistemas naturales terrestres de Costa Rica al cambio climático (Tesis sometida para optar el título de ingeniero forestal). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Ketterings, Q. M., Coe, R., van Noordwijk, M., Ambagau', Y., & Palm, C. A. (2001). Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 146(1-3), 199-209.

- Lerma, M., & Orjuela, E. (2014). Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea total en el páramo de anaimé, departamento del Tolima, Colombia (Trabajo de tesis presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero Forestal). Universidad de Tolima, IBAGUÉ.
- López A, Víctor, Calles L, Juan, Espíndola, V., & Ulloa, J. (2013). Amazonía Ecuatoriana: Bajo presión (EcoCiencia). Quito.
- Meli, P. (2003). Restauración ecológica de bosques tropicales. Veinte años de investigación académica. *Interciencia*, 28(10), 581-589.
- Montero, M., & Kanninen, M. (2001). Biomasa y Carbono en plantaciones de Terminalia Amazonia en la Zona Sur de Costa Rica. *Revista Forestal Centroamericana*, 1(1), 51-55.
- Moragas, F. (2008). Amazonas: Resultados de la búsqueda de suelos. Recuperado 3 de septiembre de 2018, de <https://flor-amazonas.blogspot.com/search?q=suelos>
- Moret A, A., & Ruiz, P. (1998). Determinación de ecuaciones de volumen para Mureillo (*Erismia uncinatum*) en la unidad C4 de la Reserva forestal Imataca, Bolívar - Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(2), 41-50.
- Muñoz, M. (2012). Estudio del comportamiento vegetativo y rendimiento de café robusta (*Coffea canephora*), asociado con tres leguminosas forestales guaba de bejuco (*Inga edulis*), guarango (*Parkia balslevii*), dormilon espinudo (*Piptadenia pteroclada*), establecido en el campo lago agrio de petroproduccion. (tesis presentada como requisito parcial para obtener el título de ingeniero agrónomo). Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba.
- Norambuena, H., & Orellana, D. (2012). Determinants of deforestation in the Amazon. *Revista Interamericana de Ambiente y Turismo*, 8(1), 17-25.
- Orrego, S., Del Valle A, J., & Moreno, F. (2003). Medición de la captura de carbono en ecosistemas forestales tropicales de Colombia: contribuciones para la mitigación del cambio climático. Medellín.
- Overman, J., Witte, H. J. L., & Saldarriaga, J. (1994, mayo 1). Evaluation of regression models for above-ground biomass determination in Amazon rainforest. *Journal of Tropical Ecology*, 10(02), 207-218.

- Phillips, O. L. (1998). Changes in the Carbon Balance of Tropical Forests: Evidence from Long-Term Plots. *Science*, 282(5388), 439-442.
- Picard, N. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles.
- Posada, S., Rosero, R., & Zoot. (2007). Comparision of mathematical models: an application for evaluation of animal food. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, (20), 141-148.
- Prodan, M., Peters, R., Cox, R., & Real, P. (1997). Mensura Forestal. *Serie Investigación y Educación en Desarrollo sostenible*, 567.
- Regina, S. (2000). Biomass estimation and nutrient polls in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata, Salamanca, Spain. *Forest Ecology Management*, 132, 127-141.
- Rodríguez, L. (2008). Evaluación de dos sustratos en la Técnica LANDFARMING para el tratamiento de suelos contaminados con Hidrocarburos (Evaluación de dos sustratos en la Técnica LANDFARMING para el tratamiento de suelos contaminados con Hidrocarburos). Escuela superior politécnica de chimborazo, Riobamba.
- Rodríguez, Y., Reyes, J., & Mercadet, A. (2010). Retención de carbono por especies forestales y frutales en la finca «Los Mangos», Bahía Honda, Pinar del Río. *Agricultura Organica*, 34-36.
- Santos, F. (2013). Memoria técnica de los Mapas de Deforestación de la Cuenca Amazónica Ecuatoriana e Integración con el Mapa de Deforestación de la Cuenca Panamazónica sobre Áreas Protegidas (EcoCiencia). Quito.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, 13.
- Segura, M., & Andrade, H. J. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería en las Américas*, (46), 89-96.
- Sistema de Información Público Agropecuaria. (2017). PROVINCIA DE SUCUMBOS. Recuperado 20 de junio de 2019, de <http://www1.gsp.edu.ec/ecuador/provincias/sucumbios.html>

- Solano, D., Eras, V., Vega, C., & Cueva, K. (2014). Generation of models allometric to determine aerial biomass as the species level, by destructive method of low intensity for the layer of forest dry Pluviestacional of Ecuador. *Cedamaz*, 4(1), 32-44.
- Sprugel, D. G. (1983). Correcting for Bias in Log-Transformed Allometric Equations. *Ecology*, 64(1), 209-210.
- Verma, A., Kaushal, R., Alam, N. M., Mehta, H., Chaturvedi, O. P., Mandal, D., ... Singh, C. (2014). Predictive models for biomass and carbon stocks estimation in *Grewia optiva* on degraded lands in western Himalaya. *Agroforestry Systems*, 88(5), 895-905.
- Villacís, J. (2016). Evaluación de las técnicas de remediación vegetal utilizadas en plataformas petroleras mediante estudios del desempeño de especies y análisis de diversidad funcional (Para optar al Grado Académico de Doctor en Ciencias Agropecuarias). Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba.
- Villacís, J., Armas, C., Hang, S., & Casanoves, F. (2016). Selection of Adequate Species for Degraded Areas by Oil-Exploitation Industry as a Key Factor for Recovery Forest in the Ecuadorian Amazon. *Land Degradation & Development*, 27(7), 1771-1780.
- Villacís, J., Casanoves, F., Hang, S., Keesstra, S., & Armas, C. (2016). Selection of forest species for the rehabilitation of disturbed soils in oil fields in the Ecuadorian Amazon. *Science of The Total Environment*, 566-567, 761-770.
- Zamora, A., & Ramos, J. (2010). Las actividades de la industria petrolera y el marco ambiental legal en Venezuela. Una visión crítica de su efectividad. *Revista Geográfica Venezolana*, 51(1), 115-144.
- Zappi, D., Brako, L., & Zarucchi, J. (1994). Catalogue of the Flowering Plants and Gymnosperms of Peru. (Vol. 49).