



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES**  
**CARRERA INGENIERÍA FORESTAL**

**MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA  
SOBRE EL SUELO DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus saligna* Sm  
EN ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO, CHIMBORAZO -  
ECUADOR**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO FORESTAL**

**AUTOR:**

**PEDRO SEGUNDO PANAMÁ PERUGACHI**

Riobamba – Ecuador

2023



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES**  
**CARRERA INGENIERÍA FORESTAL**

**MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA  
SOBRE EL SUELO DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus saligna* Sm  
EN ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO, CHIMBORAZO -  
ECUADOR**

**Trabajo de Integración Curricular**

**Tipo:** Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO FORESTAL**

**AUTOR:** PEDRO SEGUNDO PANAMÁ PERUGACHI

**DIRECTOR:** Ing. RAÚL ARMANDO RAMOS VEINTIMILLA, MSc.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Pedro Segundo Panamá Perugachi

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Pedro Segundo Panamá Perugachi, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 01 de junio de 2023

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a final flourish that resembles the number '3'.

---

**Pedro Segundo Panamá Perugachi**

**100424324-0**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE RECURSOS NATURALES**  
**CARRERA INGENIERÍA FORESTAL**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; tipo: Proyecto de Investigación, **MODELOS ALOMÉTRICOS PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA SOBRE EL SUELO DE PLANTACIONES DE *Eucalyptus saligna* Sm EN ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO, CHIMBORAZO -ECUADOR**, realizado por el señor: **PEDRO SEGUNDO PANAMÁ PERUGACHI**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

**FIRMA**

**FECHA**

Ing. Eduardo Patricio Salazar Castañeda, MSc.  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



2023-06-01

Ing. Raúl Armando Ramos Veintimilla, MSc.  
**DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2023-06-01

Ing. Miguel Ángel Guallpa Calva, MSc.  
**ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR**



2023-06-01

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo investigativo a las personas más importantes en mi vida: mis padres, Segundo y Rosa. Su dedicación y sacrificio incansable han sido el motor que me ha impulsado a alcanzar mis metas y aspiraciones, son un ejemplo de nobleza, entrega y amor en nuestra familia, y espero algún día poder transmitir esos valores a mis propios hijos. Además, quiero agradecer a mis hermanos: Fausto, Gustavo, Mikey, Kevin, y hermanas Martha, Verónica, Gladys, Janeth; por su apoyo incondicional. Sus palabras de aliento y ánimo me han dado fuerzas en los momentos más difíciles y han sido un recordatorio constante de la importancia de la unión familiar en la búsqueda de la superación personal y profesional. Este trabajo es un testimonio de todo lo que he aprendido de ustedes y de la influencia que han tenido en mi vida, espero que se sientan orgullosos de los resultados de mi esfuerzo y que esta dedicación sea una pequeña muestra de mi gratitud y amor hacia ustedes.

Pedro

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por brindarme la oportunidad de recibir una formación profesional y por todas las facilidades de estudio que me han brindado, su dedicación y compromiso con la educación han sido fundamentales en mi desarrollo académico y profesional. Además, quiero agradecer a mis tutores por su apoyo profesional en el desarrollo de este trabajo investigativo, sus ideas y sabiduría han sido invaluable para mí y sus expectativas sobre la importancia de la investigación aplicada han sido un gran motivador para mí. También quiero expresar mi agradecimiento a mi familia, quienes siempre han estado atentos a mi bienestar y han sido un gran apoyo en cada momento de mi vida. A mis padres, hermanos y hermanas: gracias por su paciencia, amor y apoyo incondicional. Por último, quiero agradecer a mis amigos por su amistad, consejos y por todos los momentos compartidos, su presencia ha sido una bendición en mi vida y estoy agradecido por cada uno de ustedes. Este logro no hubiera sido posible sin el apoyo y contribución de todas estas personas, estoy profundamente agradecido por todo lo que han hecho por mí y espero poder corresponder de la mejor manera posible en el futuro. Con gratitud,

Pedro

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	3
1.1. Planteamiento del Problema.....	3
1.2. Objetivos.....	3
1.2.1. <i>Objetivo General</i> .....	3
1.2.2. <i>Objetivos Específicos</i> .....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Hipótesis.....	4
1.4.1. <i>Hipótesis nula</i> .....	4
1.4.2. <i>Hipótesis alterna</i> .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Calentamiento global.....	5
2.2. Cambio climático.....	6
2.3. Efecto invernadero.....	7
2.4. Ecuador y el cambio climático.....	8
2.4.1. <i>Plan de acción REDD+</i> .....	9
2.4.2. <i>Pagos e incentivos para mitigar el cambio climático</i> .....	9
2.4.3. <i>Plantaciones forestales en el Ecuador</i> .....	10
2.5. Servicios ecosistémicos.....	11
2.6. Descripción de la especie en estudio.....	12
2.6.1. <i>Clasificación taxonómica</i> .....	12
2.6.2. <i>Descripción botánica</i> .....	13
2.6.3. <i>Origen</i> .....	13

2.6.4.	<i>Usos</i> .....	14
2.7.	<b>Modelos alométricos</b> .....	14
2.8.	<b>Evaluación de modelos alométricos</b> .....	16
2.8.1.	<i>Coefficiente de determinación (<math>R^2</math>)</i> .....	17
2.8.2.	<i>Coefficiente de determinación ajustado (<math>R^2</math>–ajustado)</i> .....	18
2.8.3.	<i>Criterio de Información de Akaike (AIC)</i> .....	19
2.8.4.	<i>Criterio Bayesiano de Información (BIC)</i> .....	20
2.8.5.	<i>Error Cuadrático Medio</i> .....	22
2.8.6.	<i>Significancia estadística</i> .....	22
2.8.7.	<i>Lógica biológica de un modelo alométrico</i> .....	22
2.8.8.	<i>Homocedasticidad</i> .....	23
2.9.	<b>Carbono y biomasa</b> .....	24
2.10.	<b>Zona de vida: estepa espinosa Montano Bajo (eeMB)</b> .....	26

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b> .....	27
3.1.	<b>Enfoque de investigación</b> .....	27
3.2.	<b>Alcance</b> .....	27
3.3.	<b>Tipo de estudio</b> .....	27
3.4.	<b>Características del lugar experimental</b> .....	27
3.4.1.	<i>Ubicación Geográfica</i> .....	27
3.4.2.	<i>Características climáticas</i> .....	28
3.4.3.	<i>Clasificación ecológica</i> .....	28
3.4.4.	<i>Características edáficas</i> .....	28
3.4.4.1.	<i>Taxonomía</i> .....	28
3.4.4.2.	<i>Textura</i> .....	28
3.4.4.3.	<i>Características nutricionales del suelo</i> .....	29
3.5.	<b>Materiales</b> .....	29
3.5.1.	<i>Materiales de oficina</i> .....	29
3.5.2.	<i>Software</i> .....	29
3.6.	<b>Metodología para determinar la biomasa aérea</b> .....	29
3.6.1.	<i>Determinación del tamaño de la muestra</i> .....	29
3.6.2.	<i>Medición, corte y cuantificación de biomasa por árbol</i> .....	30
3.6.2.1.	<i>Método destructivo</i> .....	30
3.6.2.2.	<i>Cálculo para la obtención de materia seca</i> .....	30

3.6.2.3.	<i>Cálculo para la obtención de biomasa en cada uno de los componentes del árbol.....</i>	31
3.6.2.4.	<i>Cálculo para la obtención de la biomasa total en el árbol .....</i>	31
3.6.2.5.	<i>Cálculo para la obtención del factor de expansión de biomasa (FEB).....</i>	31
3.7.	<b>Organización de los datos y correlación de variables.....</b>	32
3.8.	<b>Selección de mejores modelos alométricos .....</b>	32
3.8.1.	<i>Definición de las variables y prueba de supuestos estadísticos.....</i>	32
3.8.2.	<i>Estimación de parámetros del modelo .....</i>	32
3.8.3.	<i>Selección del modelo de mejor ajuste.....</i>	33
3.8.4.	<i>Comparación de observaciones reales versus las estimaciones de los mejores modelos .....</i>	34
3.8.5.	<i>Lógica biológica de los modelos .....</i>	34

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS .....</b>	35
4.1.	<b>Análisis del muestreo destructivo de <i>Eucalyptus saligna</i> (Base de datos).....</b>	35
4.1.1.	<b><i>Porcentaje de Materia Seca</i> .....</b>	37
4.1.1.1.	<i>Biomasa de árboles .....</i>	38
4.1.2.	<b><i>Factor de expansión de biomasa (FEB)</i> .....</b>	39
4.2.	<b>Definición y selección de las variables .....</b>	39
4.3.	<b>Estimación de parámetros del modelo.....</b>	40
4.4.	<b>Estadígrafos para la evaluación del mejor modelo.....</b>	42
4.5.	<b>Ranking para la selección del mejor modelo alométrico.....</b>	43
4.6.	<b>Mejor modelo alométrico.....</b>	45
4.7.	<b>Comparación de modelos generados por otro autor .....</b>	45
4.8.	<b>Discusión.....</b>	47
4.8.1.	<i>Diámetro a la altura del pecho (DAP) .....</i>	47
4.8.2.	<i>Altura total .....</i>	47
4.8.3.	<i>Porcentaje de materia seca .....</i>	47
4.8.4.	<i>Biomasa total por componentes .....</i>	48
4.8.5.	<i>Factor de expansión de biomasa .....</i>	48
4.8.6.	<i>Coficiente de correlación de Pearson.....</i>	48

## **CAPÍTULO V**

<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>50</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>51</b>

## **BIBLIOGRAFÍA**

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Nro. de hectáreas en plantaciones forestales del Ecuador .....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Clasificación taxonómica .....	12
<b>Tabla 3-2:</b> Variables más utilizadas en modelos alométricos .....	15
<b>Tabla 4-2:</b> Ecuaciones genéricas de modelos alométricos .....	16
<b>Tabla 1-3:</b> Organización de datos para el desarrollo de modelos alométricos .....	32
<b>Tabla 1-4:</b> Rango y promedio de DAP y altura total de <i>E. saligna</i> al quinto año de plantación en la Estación Experimental Tunshi-ESPOCH.....	35
<b>Tabla 2-4:</b> Tabla de datos agrupados sobre las clases diamétricas de 40 individuos de <i>E. saligna</i>	36
<b>Tabla 3-4:</b> Fracción de materia seca de cada uno de los componentes analizados .....	37
<b>Tabla 4-4:</b> Biomasa promedio por componente, de <i>E. saligna</i> en la Estación Experimental Tunshi-ESPOCH .....	38
<b>Tabla 5-4:</b> Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables independientes (dap, At, Apr,) y la dependiente (Bt) en 40 árboles muestreados de la especie <i>E. saligna</i> ...	39
<b>Tabla 6-4:</b> Estimación de parámetros de 16 modelos de biomasa sobre el suelo con base en DAP y altura total.....	41
<b>Tabla 7-4:</b> Indicadores para la validación del mejor modelo para estimación de biomasa.....	42
<b>Tabla 8-4:</b> Método para seleccionar el mejor modelo de biomasa sobre el suelo considerando cinco estadígrafos .....	43
<b>Tabla 9-4:</b> Mejor modelo alométrico seleccionado para cinco estadígrafos .....	45

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b> Dinámica de la temperatura y las emisiones durante los últimos 170 años .....	7
<b>Ilustración 2-2:</b> Área geográfica de distribución natural .....	13
<b>Ilustración 3-2:</b> Ejemplo de una distribución $R^2$ .....	18
<b>Ilustración 4-2:</b> Ciclo del dióxido de carbono.....	24
<b>Ilustración 5-2:</b> Sumideros de carbono presente en un sistema forestal .....	25
<b>Ilustración 1-4:</b> Distribución de las clases diamétricas de <i>E. saligna</i> .....	37
<b>Ilustración 2-4:</b> Porcentajes de biomasa promedio de cada componente por árbol, de <i>E. saligna</i> en la Estación Experimental Tunshi- ESPOCH .....	38
<b>Ilustración 3-4:</b> Relación entre la biomasa aérea total por árbol y el DAP/dbh, altura total (ht), y altura hasta la primera rama (hb). <i>E. saligna</i> , en Tunshi-ESPOCH .....	40
<b>Ilustración 4-4:</b> Relación entre el DAP y biomasa sobre el suelo total modelo siete, de <i>E. saligna</i> en Tusnhi - ESPOCH .....	45
<b>Ilustración 5-4:</b> Simulaciones de biomasa total sobre el suelo real y estimada con el modelo generado en esta investigación y otros estudios para <i>E. saligna</i> .....	46

## RESUMEN

Los modelos alométricos usados en el proceso de cuantificación de biomasa son muy específicos para determinadas zonas, dependiendo de diversos factores propios de la localidad. No existen modelos alométricos apropiados que estimen con mayor confiabilidad la biomasa que se encuentra en las plantaciones de *Eucalyptus saligna* en áreas como la estepa espinosa Montano Bajo de la provincia de Chimborazo; consecuentemente, se tuvo como objetivo evaluar el ajuste de un conjunto de ecuaciones para la estimación de biomasa en una plantación de *E. saligna* en estepa espinosa Montano Bajo. Se utilizó una metodología mixta; cualitativa y cuantitativa, con un diseño no experimental de tipo correlacional, se evaluó el grado de relación entre variables tomadas durante cinco años. Se cuantificó la biomasa mediante el método destructivo. Con los datos resultantes se evaluaron modelos genéricos que relacionen la biomasa sobre el suelo con el DAP y la altura total. La selección del mejor modelo se realizó con base en parámetros estadísticos como: coeficiente de determinación, coeficiente de determinación ajustado, raíz del cuadrado medio del error, criterio de información de Akaike y criterio de información Bayesiano. Se seleccionó como mejor modelo a la ecuación  $\ln(B) = -0,952 + 1,97 \cdot \ln(\text{dbh})$ , debido a que presenta estimaciones de mayor confiabilidad con las variables estudiadas. Este modelo encontró que *E. saligna* almacenó 2,62 t de biomasa total; teniendo que, en una densidad de plantación de 2x3 la cantidad de biomasa aumenta a 109,19 t ha<sup>-1</sup> y en un sistema de 4x4 sería de 40,94 t ha<sup>-1</sup>. El modelo alométrico generado es una herramienta práctica para estimar la acumulación de biomasa en plantaciones de *E. saligna* en la zona estepa espinosa Montano Bajo. En caso de no existir modelos específicos se puede utilizar como referencia para especies arbóreas con características similares a las de este estudio.

**Palabras clave:** <EUCALIPTO (*Eucalyptus saligna* Sm)>, <MODELO ALOMÉTRICO>, <BIOMASA>, <ESTIMACIÓN>, <ESTEPA ESPINOSA MONTANO BAJO (eeMB)>, <SECUESTRO DE CARBONO>.



## ABSTRACT

The allometric models used in the quantification process are particular biomass for certain areas, depending on various factors specific to the locality. There are no appropriate allometrics that more reliably estimate the biomass found in *Eucalyptus saligna* plantations in areas such as the Lower Montano thorny steppe of the Chimborazo province; Consequently, the objective was to evaluate the fit of a set of equations for the estimation of biomass in a plantation of *E. saligna* in the Lower Montane spiny steppe. A mixed methodology was obtained, qualitative and quantitative, with a non-experimental design of the correlational type, and the degree of relationship between variables taken during five years was evaluated. The biomass was quantified by the destructive method. With the resulting data, generic models that relate biomass above ground with DAP and total height were assessed. The best model was selected based on statistical parameters such as coefficient of determination, adjusted coefficient of determination, the root of the mean square of the error, Akaike information criterion, and Bayesian information criterion. The formula  $\ln(B) = -0.952 + 1.97 * \ln(\text{dbh})$  was the best model because it presents more reliable estimates with the variables studied. This model found that *E. saligna* stored 2.62 t of total biomass, bearing that, in a 2x3 planting density, the number of biomass increases to 109.19 t ha<sup>-1</sup>, and in a 4x4 system, it would be 40.94 t ha<sup>-1</sup>. The generated allometric model is a practical tool to estimate biomass accumulation in *E. saligna* plantations in the Lower Montane spiny steppe zone. If there are no specific models, it can be used as a reference for tree species with characteristics like this study.

**Keywords:** <EUCALYPTUS (*Eucalyptus saligna* Sm)>, <ALLOMETRIC MODEL>, <ESTIMATION>, <LOWER MOUNTAIN THORNY STEPPE (eeMB)>, <CARBON SEQUESTRATION>, <CHIMBORAZO (PROVINCE)>.

Riobamba, June 19th, 2023



PhD. Dennys Tenelanda López

ID number: 0603342189

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático una comparación de las temperaturas medias entre el período anterior a 1850-1900 y el actual 2006-2015 muestra que, en este último período, la temperatura media es 0,87 °C más alta que en el pasado, de continuar el ritmo de vida actual, se proyecta que esta diferencia de temperatura podría llegar a 1,5 °C entre 2030 y 2052. Adicionalmente, se estima que el 23% de las emisiones antropógenas de 2007-2016 provienen de los cambios de usos del suelo principalmente forestal y agrícola con aproximadamente 6 Gt CO<sub>2</sub> eq/año, emitidos en 2016, el IPCC también estima que para 2030, las emisiones de gases de efecto invernadero contribuirán con 52-58 Gt CO<sub>2</sub> eq/año (IPCC, 2019, pp. 4-18).

La cantidad de carbono almacenado en plantas y bosques es importante en relación con el cambio climático, ya que juegan un papel en el secuestro de CO<sub>2</sub> y la reducción del exceso de gases de efecto invernadero en la atmósfera, la gestión forestal adecuada también puede ser una inversión rentable. La medición del carbono en biomasa en el suelo es crucial cuando se trabaja en proyectos para combatir el calentamiento global, ya que los bosques y plantaciones absorben CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis y lo almacenan en sus estructuras vivas y biomasa (Brown, 1997, párr. 4).

Las plantaciones forestales se utilizan actualmente como una forma de combatir el calentamiento global mediante el almacenamiento de dióxido de carbono a través de la fotosíntesis, según la FAO (2020, pp. 5-6), el 3% del área forestal mundial total, o 131 millones de hectáreas, se utiliza para fines comerciales de plantación. Utilizar las plantaciones forestales como estrategia para aumentar las reservas de biomasa y carbono, mediante el uso de modelos alométricos para su cuantificación y así a través de un manejo silvícola adecuado, poder mitigar los efectos del calentamiento global (FAO, 2014, p. 15).

Los modelos alométricos, que se utilizan para estimar la cantidad de biomasa y carbono en bosques y plantaciones, son cada vez más importantes en el contexto del cambio climático (Brown, 1997, párr. 6). Esto está respaldado por acuerdos internacionales como el Protocolo de Kyoto, que introdujo el concepto de "créditos de carbono" como una forma de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> y disminuir los gases de efecto invernadero la precisión de estos modelos es crucial para la gestión eficaz de los proyectos "verdes", si las ecuaciones utilizadas en estos modelos no son confiables, puede generar información inexacta e imprecisa (Segura y Andrade, 2008, pp. 89-96).

Los modelos alométricos o ecuaciones, se utilizan para estimar la cantidad de biomasa o carbono en diferentes sistemas forestales son herramientas que apoyan una gestión silvícola eficiente y son un método no destructivo para la estimación de biomasa, conocidos por su eficiencia y precisión (Segura y Andrade, 2008, pp. 89-96). Estos modelos generalmente requieren información recopilada en el campo, como la altura total y comercial, el diámetro y la densidad. Sin embargo, el inconveniente es que estas ecuaciones son específicas para ciertas regiones, climas y especies (Solano et al., 2014, pp. 32-44).

Hay muchos estudios que demuestran que los modelos alométricos son específicos para las especies y el clima de la región bajo estudio, como lo reportó Porras et al. (2022, pp. 6-13). Las investigaciones sobre cuantificación de carbono en diferentes sistemas agroforestales también resaltan la importancia de comprender la mayor cantidad de variables presentes en un bosque natural en comparación con una plantación forestal (Hernández et al., 2017, pp. 922-936). La falta de modelos alométricos precisos puede tener un impacto significativo en la toma de decisiones para planes, programas y proyectos ambientales esto puede conducir a una gestión deficiente de las áreas forestales, particularmente en los países en desarrollo donde las "inversiones verdes" pueden tener un impacto positivo en el desarrollo sostenible de las poblaciones locales como lo dice la FAO y el Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2021, párr. 2).

El Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP) y la Secretaría Nacional de Educación, Ciencia y Tecnología (SENESCYT) en el año 2014 ejecutaron un proyecto de investigación forestal donde pretendían evaluar el comportamiento de clones de especies del género *Pawlonia* en varios pisos altitudinales del callejón interandino y litoral ecuatoriano: Uno de los ensayos fue instalado en la Estación Experimental Tunshi de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), donde *Eucalyptus saligna*, fue la especie de rápido crecimiento definida como testigo y se plantaron alrededor de 300 arbolitos.

## CAPÍTULO I

### 1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Planteamiento del Problema

El problema principal identificado y que motivó el desarrollo de la investigación fue la inexistencia de modelos alométricos para la estimación confiable de biomasa sobre el suelo en plantaciones de *E. saligna* Sm, en estepa espinosa Montano Bajo de la provincia de Chimborazo.

Los modelos alométricos usados en el proceso de cuantificación de biomasa son muy específicos con características poco replicables en otros escenarios, es decir dependen de diversos factores como los edafoclimáticos, la especie de interés, edad de la especie, etc. Se los puede usar en aquellas que comparten variables similares al de la presente investigación, entendiendo que la estimación siempre conlleva un error y el replicarlo en otros escenarios con diferentes variables solo aumentaría el sesgo en las estimaciones que se pretendan realizar.

#### 1.2. Objetivos

##### 1.2.1. *Objetivo General*

Evaluar el ajuste de un conjunto de ecuaciones que permitan estimar de una forma fácil y confiable la biomasa de plantaciones de *E. saligna* Sm en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.

##### 1.2.2. *Objetivos Específicos*

- Analizar la base de datos del muestreo destructivo generado por la ESPOCH, para cuantificar la biomasa de *E. saligna* Sm sobre el suelo al quinto año de plantación, en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.
- Probar ecuaciones genéricas en función del diámetro (DAP) y altura (h) utilizadas en la literatura para estimación de biomasa de *E. saligna* Sm al quinto año de plantación, en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.
- Seleccionar modelos alométricos que posean parámetros significativos al menos con un  $p < 0.05$ , para estimar la biomasa sobre el suelo de *E. saligna* Sm al quinto año de plantación, en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.

### 1.3. Justificación

El presente proyecto de investigación aporta con información a los proyectos “REDD+”, que promueven la reducción de la deforestación mundial y disminuir la liberación de gases nocivos como el dióxido de carbono a la atmósfera, mediante el secuestro de carbono en la biomasa arbórea, a través de los procesos fotosintéticos propio de las plantas que fijan el carbono en sus tejidos vivos (raíz, hoja, tallo), y su capacidad de retención por mucho tiempo, principalmente en el fuste del árbol (tejido leñoso) (ONU, 1998, p. 4).

La investigación aporta con conocimiento sobre la generación de modelos alométricos específicos para la estimación de biomasa aérea en plantaciones de *E. saligna* en estepa espinosa Montano Bajo, obteniendo así una cuantificación confiable, mismo que servirá para su uso por parte de productores forestales en los mercados de carbono, enmarcadas en las estrategias de transacciones del servicio ambiental (captura de carbono) que ofrecen las plantaciones forestales para la mitigación del cambio climático.

La confiabilidad de la estimación permitirá al productor forestal la toma adecuada de decisiones en el pago por servicios ambientales, y el ingreso al mercado de carbono en donde los países más industrializados generan incentivos económicos y proyectos “verdes” en los países en vías de desarrollo para mitigar su huella ecológica (Brown, 1997, párr. 8).

### 1.4. Hipótesis

#### 1.4.1. Hipótesis nula

**H<sub>0</sub>:** Las ecuaciones genéricas, en función del diámetro (DAP) y la altura (h), utilizadas en la literatura no presentan un buen ajuste para estimación de biomasa de *E. saligna* Sm en plantaciones en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.

#### 1.4.2. Hipótesis alterna

**H<sub>1</sub>:** Al menos una de las ecuaciones genéricas, en función del diámetro (DAP) y la altura (h), utilizadas en la literatura presenta un buen ajuste para estimación de biomasa de *E. saligna* Sm en plantaciones en estepa espinosa Montano Bajo, Chimborazo-Ecuador.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Calentamiento global

Desde el comienzo de la revolución industrial en 1770 hasta su apogeo en 1990, las actividades humanas han contribuido significativamente al calentamiento global a través de la rápida acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera; dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonados (PFC), hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>) siendo una de las principales causas la deforestación global (Calduch, 2006, pp. 36-37; ONU, 1998, p. 29).

El IPCC (2019, p. 4), manifiesta que entre el año 2000 y 2007 la temperatura global ha incrementado 0,65°C y entre el 2006 y 2015 su incremento ha sido 0,87°C, este fenómeno es el resultado de las actividades humanas que han provocado un aumento de la cantidad de gases de efecto invernadero, como el dióxido de carbono en la atmósfera terrestre.

Los efectos del cambio climático son más pronunciados en países en desarrollo como África, América Latina, el sudeste y el sur de Asia, mientras que países desarrollados como EE. UU. y China continúan emitiendo grandes cantidades de GEI, pero se ven menos afectados por estos efectos (Vargas, 2009, p. 3). Además, la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, 2023, párr. 3) informó que los 10 años más cálidos registrados ocurrieron entre 2014 y 2022, lo que destaca aún más el aumento continuo de la temperatura promedio global.

En el mismo sentido Caballero et al. (2007, pp. 5-6) manifiesta que los datos recogidos por las estaciones meteorológicas han revelado que la temperatura media de la Tierra ha pasado de 0,5°C entre 1960 y 1990 a casi 1°C respecto a mediados del siglo XIX (1850-1900), el aumento de los gases de efecto invernadero es la principal causa del calentamiento global, responsabilizando a las actividades humanas, como la deforestación y la quema de combustibles fósiles, como los principales contribuyentes, y se estima que estos procesos liberan anualmente 7500 millones de toneladas de carbono a la atmósfera, siendo una cifra mucho más alta que la cantidad emitida por fenómenos naturales como el vulcanismo, que es de solo 100 millones de toneladas de carbono por año (Caballero et al., 2007, pp. 7-8).

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2020, p. 8) ilustra el impacto del calentamiento global comparando dos modelos climáticos, uno actual y otro con un aumento de temperatura de 1,5 °C. La comparación muestra diferencias significativas que tendrían consecuencias catastróficas, como el aumento de las temperaturas en los ecosistemas terrestres y marinos, eventos de calor extremo más frecuentes, cambios en los niveles de precipitación en todo el mundo y sequías severas que alterarían la estabilidad actual.

El calentamiento global es una preocupación importante en la actualidad, ya que la actividad humana altera el equilibrio natural y tiene impactos negativos en el planeta y sus habitantes. Organizaciones internacionales como el IPCC sugieren que tomar medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero puede ayudar a mitigar los riesgos futuros asociados con el cambio climático. Si las tendencias actuales continúan, se prevé que la temperatura global promedio aumente 1,5 °C en los próximos 20 años, lo que generará graves consecuencias como el aumento del nivel del mar, impactos en la salud, pérdida de biodiversidad y más (IPCC, 2022, pp. 1-3).

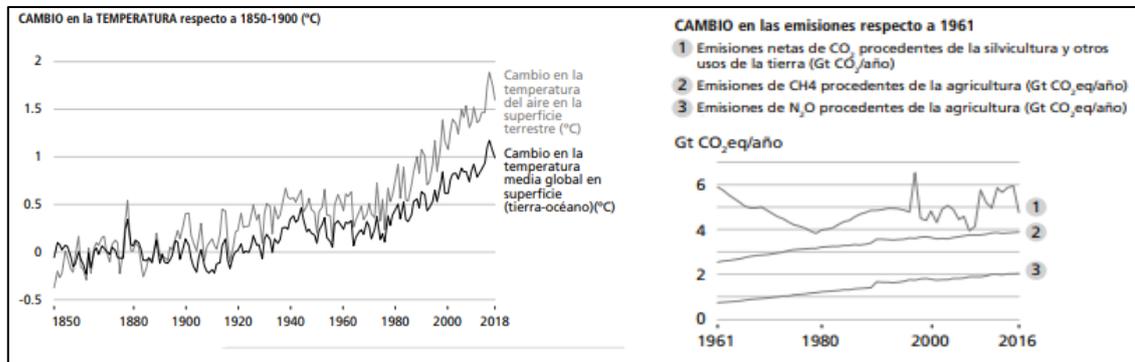
## **2.2. Cambio climático**

La ONU (1992, pp. 3-4) la define como la alteración de la composición atmosférica provocada por el hombre, incluida la variabilidad natural del clima; por su parte el IPCC (2013, pp. 187-188) lo describe como un cambio en el estado del clima debido a cambios en los valores promedio y la variabilidad de sus propiedades; así como también Díaz (2007, p. 229) indica que el término “cambio climático” se refiere a las variaciones en cualquier aspecto del clima de la Tierra, como la precipitación y la intensidad de las tormentas.

El Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en 2008 predijo un aumento significativo en las temperaturas globales, que oscilaron entre 1,4 y 5,8°C entre 1990 y 2100, basándose en modelos climáticos. El sistema actual de hipótesis sugiere que los principales contribuyentes a las emisiones contaminantes serán el crecimiento de la población y el avance tecnológico, pero el aspecto político presenta desafíos importantes para la implementación y la reducción de emisiones (Díaz, 2012, p. 229).

En la ilustración reportadas por el IPCC se puede apreciar una tendencia directamente proporcional en el cambio de la temperatura media global en la superficie y cambio en la temperatura del aire, en donde todo esto se ve influenciado por las emisiones de GEI, y por otro lado se observa las emisiones: 5 Gt CO<sub>2</sub> eq/año, provenientes de actividades como la silvicultura

y usos del suelo, y 4 Gt CH<sub>4</sub> eq/año y 2 Gt eq/año N<sub>2</sub>O provenientes de la agricultura (IPCC, 2020, p. 8).



**Ilustración 1-2:** Dinámica de la temperatura y las emisiones durante los últimos 170 años

Fuente: IPCC, 2020, p. 8.

La temperatura media de la superficie terrestre ha ido aumentando desde la época preindustrial, y este cambio climático, junto con el aumento de la intensidad y frecuencia de los desastres naturales, tiene un impacto negativo en la seguridad alimentaria y altera el equilibrio de los ecosistemas, lo que lleva a la degradación de la tierra y la desertificación. Adicionalmente, las actividades relacionadas con el uso del suelo y cambios en la cobertura vegetal contribuyen con el 13% de las emisiones de CO<sub>2</sub> (IPCC, 2019, pp. 9-11).

### 2.3. Efecto invernadero

Para comprender el concepto del efecto invernadero, es importante comprender primero el papel de la atmósfera terrestre en el mantenimiento de la vida en el planeta. La atmósfera está compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno, con una pequeña cantidad de CO<sub>2</sub> (0,03 %) también presente los gases presentes no pueden absorber la luz solar (ondas de longitud corta) presentes en la luz visible y ultravioleta, por lo que permite el paso a la superficie terrestre (Caballero et al. 2007, pp. 3-5), explica el proceso de absorción y reflectancia de la luz solar:

*Del total (100%) de la luz solar que nos llega al planeta, el 30% es reflejado como espejo hacia el espacio(albedo), la atmósfera retiene solo un 20% de la energía solar y el 50% restante llega hasta la superficie terrestre, calentándola. Al calentarse la superficie de la Tierra transforma la luz solar (de alta energía) en radiación de energía baja (ondas de longitud amplias o infrarrojo), que se reflejan nuevamente a la atmósfera. Esta energía infrarroja si puede ser absorbida principalmente por el CO<sub>2</sub>, siendo este 1% de la*

*composición total de los gases atmosféricos, el responsable de la fuente de calor para la atmósfera; a esto se lo conoce como efecto invernadero.*

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2019, p. 3) define el calentamiento global como la dinámica de los gases de efecto invernadero y su capacidad para absorber la radiación infrarroja, lo que hace que el calor quede atrapado en la atmósfera debido a las emisiones de gases causa de las actividades h.

Aunque el CO<sub>2</sub> constituye solo el 0,03 % de la atmósfera terrestre, desempeña un papel crucial en el mantenimiento del equilibrio del efecto invernadero y permite una temperatura global agradable de 15 °C que sustenta la vida en la Tierra. La composición de los gases en la atmósfera afecta los procesos bioclimáticos y un aumento en la concentración de gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O y vapor de agua conducirá a una temperatura media global más alta y viceversa (Caballero et al., 2007, pp. 3-5; IPCC, 2019, p. 3).

Las actividades humanas, como la quema de combustibles fósiles, los cambios en el uso del suelo de bosque a agricultura y ganadería, y la expansión de la agricultura y la ganadería, son fuentes importantes de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, estas acciones resultan en el declive de los ecosistemas naturales (Näslund et al., 2015, pp.18-19).

Greenpeace (2018, p. 32) afirma que la temperatura de la Tierra puede fluctuar en función de la cantidad de gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera, lo que puede conducir a un aumento de la aridez del suelo.

#### **2.4. Ecuador y el cambio climático**

Con el fin de abordar la pobreza rural y promover prácticas amigables con el medio ambiente, Ecuador creó una estrategia para enfrentar el cambio climático en 2012. Esta estrategia incluye el desarrollo de mecanismos de gobernanza social y ambiental, involucrando a las comunidades vulnerables y fortaleciendo las instituciones. El país también se enfoca en la gestión de los recursos hídricos y las cuencas hidrográficas, la protección del ecosistema andino y la implementación del plan REDD+ para reducir las emisiones (MAE, 2012, p. 22).

El MAATE como actual autoridad nacional ambiental es responsable de la gestión del cambio climático, y su Subsecretaría de Cambio Climático (SCC) se enfoca en el desarrollo de capacidades y generación de conocimiento en materia ambiental. El MAATE promueve prácticas

sustentables basadas en el Sumak Kawsay. Organizaciones como la SENESCYT y la Red Ecuatoriana de Cambio Climático (RECC) promueven la colaboración académica interinstitucional con enfoques basados en la investigación. El proceso comienza con la conformación de la red, que coordina acciones con el MAATE, actuando como intermediarios la SCC y la SENESCYT (MAE, 2012, p. 22).

#### ***2.4.1. Plan de acción REDD+***

En 2012, Ecuador inició el proceso de implementación del mecanismo REDD+, que tuvo como objetivo promover el uso responsable de los recursos naturales, proteger la biodiversidad y desarrollar estrategias para la adaptación y mitigación contra los efectos del cambio climático, todas las partes involucradas (sector público/ privado, entidades nacionales e internacionales) acordaron trabajar para lograr estos objetivos (MAE, 2016, pp. 33-34).

Ecuador comenzó a prepararse para la implementación del mecanismo REDD+, que tiene como objetivo promover el uso sostenible de los recursos naturales, la conservación de la biodiversidad y el desarrollo de estrategias para la adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático. El Ministerio del Ambiente de Ecuador emitió el Plan de Acción “Bosques para el Buen Vivir” 2016-2025, que sirve como herramienta de gestión para combatir la deforestación y enfrentar el cambio climático. Los objetivos principales de este plan incluyen apoyar la formación de personal para desarrollar la planificación territorial, promover sistemas productivos sostenibles y trabajar con iniciativas sostenibles en línea con el Plan Nacional de Desarrollo (MAE, 2016, p. 104).

Para lograr una gestión sostenible de los bosques y aumentar el almacenamiento de carbono, es necesario conocer adecuadamente las metodologías para medir el contenido de carbono en estos ecosistemas, tal como lo establece el Ministerio del Medio Ambiente (MAE, 2016, pp. 82-84).

#### ***2.4.2. Pagos e incentivos para mitigar el cambio climático***

La Constitución ecuatoriana de 2008 fue la primera en la región en reconocer los derechos de la naturaleza, marcando un paso significativo para abordar el cambio climático. El país implementó el programa "Socio Bosque", que brindó incentivos económicos para que los propietarios de bosques conservaran sus tierras en su estado natural sin ninguna intervención humana (MAE, 2012, p. 10).

En 2014, a través del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP), se implementó un programa denominado “Incentivos a la reforestación con fines comerciales”. Este programa brinda incentivos económicos durante la fase de establecimiento y mantenimiento de plantaciones forestales (primeros cuatro años) con el objetivo de aumentar los sumideros de carbono y reducir el uso ilegal de los bosques nativos (MAGAP, 2014, párr. 4).

### 2.4.3. Plantaciones forestales en el Ecuador

Una plantación forestal es un área deliberada de árboles, con una adecuada planificación silvícola para obtener beneficios y productos forestales de calidad, ahorrando tiempo y recursos. Hoy en día, la plantación forestal juega un papel vital en la reducción del efecto del cambio climático por su capacidad de almacenar carbono en su biomasa (OMC, 2009, p. 33). A nivel nacional se trabaja con el Programa: Incentivos para la Reforestación con Fines Comerciales, donde el estado ecuatoriano, mediante dicho programa:

*...entregará incentivos económicos a personas naturales y jurídicas, de hasta el 75% del costo de establecimiento y hasta el 75% del costo de mantenimiento de la plantación durante los primeros cuatro años; y a las asociaciones, cooperativas productivas y comunas hasta el 100% del incentivo (MAGAP, 2014, párr. 3).*

Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2019, párr. 2) indica que, entre 2013-2018 *Eucalyptus saligna* Sm cubrió una superficie de unas 22 ha, representa menos del 1% (0,09%) del área total plantada con las especies leñosas promovidas, en comparación con la Teca (*Tectona grandis*) que cubre el 40% y tiene la mayor superficie sembrada.

**Tabla 1-2:** Nro. de hectáreas en plantaciones forestales del Ecuador

Especie	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
<i>Alnus acuminata</i> (Aliso)	33,05	0,13
<i>Cedrelinga catenaeformis</i> (Chuncho)	225,71	0,92
<i>Cordia alliodora</i> (Laurel)	52,40	0,21
<i>Eucalyptus globulus</i> (Eucalipto)	600,31	2,44
<i>Eucalyptus saligna</i> (Eucalipto)	21,96	0,09
<i>Eucalyptus urograndis</i> (Eucalipto)	90,20	0,37
<i>Gmelina arborea</i> (Melina)	6224,24	25,26
<i>Hevea brasiliensis</i> (Caucho)	199,29	0,81
<i>Jacaranda copaia</i> (Jacarandá)	135,47	0,55

<i>Ochroma pyramidale</i> (Balsa)	4540,42	18,43
<i>Persea americana</i> (Aguacate)	167,94	0,68
<i>Pinus patula</i> (Pino)	1167,47	4,74
<i>Pinus radiata</i> (Pino)	1660,31	6,74
<i>Schizolobium parahybum</i> (Pachaco)	82,64	0,34
<i>Tectona grandis</i> (Teca)	9432,10	38,28
<i>Triplaris cumingiana</i> (Fernán Sánchez)	8,64	0,03
<b>TOTAL SUPERFICIE INCENTIVADA</b>	<b>24641,95</b>	<b>100,00</b>

Fuente: MAG, 2019.

## 2.5. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos se refieren a los beneficios que las sociedades humanas obtienen del entorno natural, como la regulación de inundaciones y enfermedades, la polinización de cultivos y el mantenimiento de la calidad del suelo y el aire. Nuestra investigación se centra en el servicio ecosistémico de regulación, que es proporcionado por los ecosistemas forestales que juegan un papel crucial en la regulación del clima global al absorber gases de efecto invernadero, particularmente CO<sub>2</sub>, a través del proceso de fotosíntesis. Esto ayuda a purificar el aire y promover el crecimiento y desarrollo de los árboles mismo en el que se debería trabajar en una adecuada gestión silvícola (TEEB, 2010, pp. 17-18; FAO, 2022, párr. 2).

El valor de los servicios ecosistémicos, calculado por la FAO (2022, párr. 4), superó los 125 000 millones de USD y se entiende que este valor cambia cada año. En 1997, los países industrializados se comprometieron a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través del "Protocolo de Kyoto", que entró en vigor en 2005 y al que se sumaron 192 partes. Uno de los mecanismos utilizados en este protocolo es el Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que se ocupa de la captura de carbono y se aplica a través de esfuerzos de forestación y reforestación. El papel de la silvicultura en este proceso es crucial para mantener un equilibrio en el clima global, tal como lo afirmó la UNFCCC (2021, párr. 2).

Los créditos de carbono, que son utilizados principalmente por los países industrializados, son un medio para que los países en desarrollo vendan carbono a través de un riguroso proceso de verificación y certificación. Estos créditos son adquiridos por los países industrializados para cumplir sus objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Sin embargo, actualmente existen varios desafíos y fallas en el sistema de créditos de carbono, incluida la falta de transparencia y problemas con la doble contabilización (PNUD, 2022, p. 26).

## 2.6. Descripción de la especie en estudio

En 1788 los franceses botánicos L'Héritier, describieron el género *Eucalyptus*, proviene de las palabras griegas 'Eu' (bien) y 'calyptos' (cubierta), haciendo referencia a las flores que están protegidas por un opérculo (Acosta, 2018, p. 5).

La superficie mundial de plantaciones de *Eucalyptus saligna* Sm supera las 500.000 hectáreas, sin incluir Australia. Brasil tiene la mayor superficie sembrada con 500.000 hectáreas, mientras que Angola tiene 50.000 hectáreas. En 1975, la superficie total de plantaciones en el país era de 17.716 hectáreas, siendo sólo 156 hectáreas de *E. saligna* Sm. La mayor parte del área total, más del 70%, era *E. globulus* (plántulas) (FAO, 1981, párr. 9). Un estudio generado por el MAE, indica que de 9 599 678.7 (34.7% de la superficie boscosa nacional), en donde las plantaciones no superan el 1.5% del porcentaje de bosques naturales que son equivalentes al 98.5% (INIAP, 2015, p. 11).

### 2.6.1. Clasificación taxonómica

En su investigación, Juela (2015, p. 4), menciona la clasificación taxonómica de la especie *Eucalyptus saligna* Sm, es la que se presenta en la Tabla 2-2.

**Tabla 2-2:** Clasificación taxonómica

<b>Reino</b>	Plantae
<b>División</b>	Magnoliophyta
<b>Clase</b>	Magnoliopsida
<b>Subclase</b>	Rosidae
<b>Orden</b>	Myrtales
<b>Familia</b>	Myrtaceae
<b>Subfamilia</b>	Myrtoideae
<b>Género</b>	<i>Eucalyptus</i>
<b>Especie</b>	<i>Eucalyptus saligna</i> Sm

Fuente: Juela, 2015.

Realizado por: Panamá, Pedro, 2023.

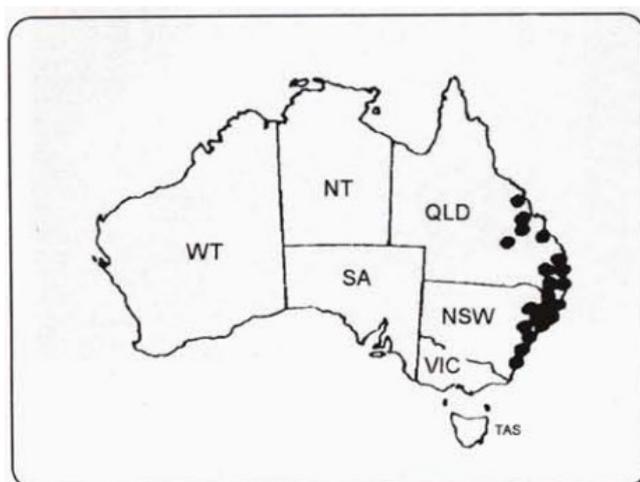
### 2.6.2. Descripción botánica

Sadame (2016, párr. 2-4) indica que *E. saligna* Sm es una especie de árbol de hoja perenne que puede alcanzar una altura de 20-30 metros, tiene una corteza lisa y descascarada de color grisáceo o blanco azulado. Sus hojas son alargadas, lanceoladas y simples, con un ligero olor a cineol, y sus nervaduras son amarillas. Sus frutos son cápsulas de forma cónica, de 5-8 mm de diámetro, con semillas pequeñas, oscuras y angulosas. La madera de esta especie es de buena calidad y tiene una densidad de 690 kg/m<sup>3</sup>, lo que la hace apta para acabados.

Según la INTA (1995, p. 46), *Eucalyptus saligna* Sm puede crecer hasta 55 metros de altura, con corteza lisa que se desprende y puede ser de color marrón, blanco o gris azulado. Sus hojas son ovaladas y cambian de color, con una longitud de 15-25 mm cuando están completamente desarrolladas. El árbol produce umbelas con 7-11 flores y tiene cogollos ovoides. El fruto tiene forma de campana y es cilíndrico, mide de 5 a 8 mm de largo y de 5 a 6 mm de ancho.

### 2.6.3. Origen

*Eucalyptus saligna* Sm, es originaria de Australia, concretamente de una región que se extiende a lo largo de 120 km desde Nueva Gales del Sur hasta Queensland. Prospera en elevaciones que van desde el nivel del mar hasta los 1100 m s.n.m. La especie prefiere suelos aluviales que sean de alta calidad y tengan una estructura areno-limosa. También puede adaptarse a suelos arcillosos y de origen volcánico. En Australia, los suelos en los que crece tienen buena retención de agua y están bien drenados. Las precipitaciones en esta región oscilan entre 900 y 1800 mm (INTA, 1995, p. 29).



**Ilustración 2-2:** Área geográfica de distribución natural

Fuente: Gobierno Australiano, 1988.

#### **2.6.4. Usos**

*E. saligna* Sm es una especie de crecimiento rápido que se utiliza para diversos fines, incluida la producción de papel para la industria de la pulpa y en la industria farmacéutica para tratamientos como antiséptico, antidiabético y antiinflamatorio. También contribuye a la producción de miel durante su época de floración, y es de uso común en plantaciones comerciales (Martínez et al., 2010, p. 820).

La FAO (1981) realizó una investigación que muestra a *E. saligna* Sm como una especie de rápido crecimiento, con un incremento promedio anual (IMA) de 42-50 m<sup>3</sup>. En América Latina, Brasil tiene el mayor número de plantaciones de esta especie, con una IMA de 18 m<sup>3</sup> para especies mixtas de eucalipto. Adicionalmente, en Ecuador se considera una madera valiosa en el mercado local y se utiliza por su corta rotación en comparación con otras especies forestales comerciales (Acosta, 2018, p. 7).

#### **2.7. Modelos alométricos**

Según Fonseca (2017, p. 98), la cantidad de materia orgánica presente en un ecosistema forestal puede determinarse mediante métodos directos o indirectos. El método directo implica la medición física de la biomasa, mientras que el método indirecto implica el uso de modelos matemáticos. Es importante señalar que cada modelo es específico para la especie o grupo de especies y el tipo de ecosistema que se estudia.

Los modelos alométricos utilizan ecuaciones que toman datos de variables fácilmente medibles, como el tamaño y la forma, para calcular el volumen, la biomasa o el contenido de carbono de árboles, arbustos y palmeras (Picard et al., 2012, p. 35). Para crear un modelo alométrico, se debe definir la especie y el ecosistema, determinar un tamaño de muestra y seleccionar individuos para medir y cortar. Luego se eligen los modelos que mejor se ajustan para estimar la biomasa y el contenido de carbono por árbol (Andrade y Segura, 2008, pp. 89-96).

Varios autores, entre ellos Fonseca (2017, p. 98); Segura y Andrade (2008, p. 90) indican que los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que se utilizan para describir la relación entre diferentes variables, como el volumen o la biomasa de las especies leñosas. Estos modelos se utilizan normalmente para estimar la cantidad de biomasa o carbono almacenado en un ecosistema forestal de forma no destructiva, y se han vuelto cada vez más importantes en el contexto del cambio climático (Snowdon et al, 2002, p. 5).

Los estudios de biomasa son cruciales para determinar la cantidad de carbono almacenado en un área determinada. La proporción de biomasa a carbono es típicamente 2:1 (Jumbo et al., 2018, p. 57). Los métodos no destructivos, como el análisis de regresión, requieren una muestra de al menos 30 individuos para proporcionar estimaciones precisas de la biomasa (Ramos et al., 2023, p. 82).

Hoy en día, es relativamente sencillo estimar la biomasa en un ecosistema forestal utilizando datos sobre el diámetro y la altura de los árboles, que se pueden obtener de una base de datos. La ecuación alométrica se puede utilizar para calcular la biomasa, que se puede aplicar en condiciones ecológicas y climáticas similares (Ramos et al., 2023, p. 84).

Para construir modelos alométricos, es necesario utilizar una o una combinación de ciertas variables (Solano et al., 2014, pp. 32-44). Las variables más utilizadas se enumeran a continuación en la Tabla 3-2:

**Tabla 3-2:** Variables más utilizadas en modelos alométricos

VARIABLES	AUTOR	ESPECIE	SITIO
DAP, HT, CH, HC	Alvarez	<i>Centrolobium tomentosum</i> , <i>Schizolobium parahyba</i>	Cochabamba - Bolivia
DAP, DB, HT, HC, AC	Segura & Andrade	Leñosas perennes	Turrialba -Costa Rica
DAP, HT	Bhandari & Nupane	<i>Alnus nepalensis</i>	Bhakarjun - Nepal
DAP, HT, HC, DC, DB, FF, CH, $\theta$ , IMA	FAO & CIRAD	Masas boscosas	Roma - Italia
DAP, HT, DB	Khila Nath & Gandhiv	<i>Alnus nepalensis</i>	Katmandú – Nepal
DAP, HT, HC, GE, IMA	Lerma & Orjuela	<i>Miconia</i> sp., <i>Winmania</i> <i>auriculata</i> , <i>Baccahris</i> sp.	Páramo de Anaime - Colombia
DAP, HT, DC	Muñoz, Ramos, Riofrío & Nieto	<i>Alnus acuminata</i>	Cutuglahua - Ecuador

*DAP: Diámetro a la altura del pecho; HT: Altura total; Altura comercial o largo útil; CH: Contenido de humedad; DC: Diámetro de copa; DB: Diámetro basal; FF: Factor de forma;  $\theta$ : Densidad de la población; IMA: Incremento medio anual.*

**Fuente:** España, 2016.

Además de usar variables específicas para generar una nueva ecuación alométrica, los modelos genéricos existentes también se pueden usar como base para desarrollar una nueva ecuación. Estos se los presentan en la Tabla 4-2 (Loetsch et al., 1973; citado por Segura y Andrade, 2008, p. 91):

**Tabla 4-2:** Ecuaciones genéricas de modelos alométricos

<b>Ecuación genérica</b>	<b>Autor</b>
$VBC = a + b \text{ DAP}$	Berkout
$VBC = a + b \text{ DAP}^2$	Kopezky
$VBC = a + b \text{ DAP} + c \text{ DAP}^2$	Hohenadl - Krenn
$\ln VBC = a + b \ln \text{ DAP}$	Husch
$VBC = a + b \text{ DAP}^2 H$	Spurr
$VBC = a + b \text{ DAP}^2 + c \text{ DAP}^2 H + d H$	Stoate
$VBC = a + b \text{ DAP}^2 + c \text{ DAP} H + d \text{ DAP}^2 H$	Meyer

*VBC = volumen (m<sup>3</sup> 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 = parámetros del modelo; ln = logaritmo base e.*

Fuente: Segura y Andrade, 2008.

La actual estimación del secuestro de carbono en la biomasa de las plantaciones de *Eucalyptus saligna* Sm es poco confiable, ya que generalmente se realiza utilizando fórmulas generales recomendadas por el IPCC o modelos alométricos desarrollados para otras especies o bajo diferentes condiciones climáticas. Estos modelos no son adecuados para plantaciones en la estepa espinosa montana baja, lo que genera incertidumbre en la estimación debido a la especificidad de los modelos alométricos, que solo son aplicables a un determinado tipo de ecosistema y especie forestal (Segura y Andrade, 2008, pp. 91-95).

## 2.8. Evaluación de modelos alométricos

Varios investigadores como Alvarez (2008, pp. 6-7) y Segura y Andrade (2008, p. 94), mencionan que el objetivo de la evaluación de modelos alométricos es seleccionar aquellos que presenten el mejor balance entre la capacidad de ajuste de los datos y su complejidad. Posada y Rosero (2007, p. 144) manifiestan que:

*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.*

Adicionalmente, el mayor número de parámetros implicará mediciones adicionales de una de las variables adicionadas al modelo para el cálculo del modelo (Ramos et al., 2023, p. 82).

### 2.8.1. Coeficiente de determinación ( $R^2$ )

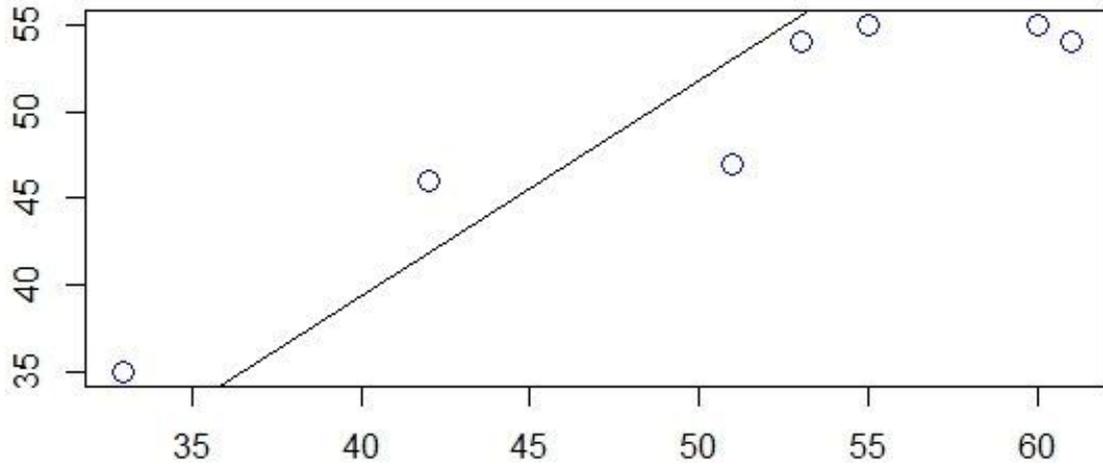
El coeficiente de determinación, también conocido como R-cuadrado, es una medida estadística que representa la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por la(s) variable(s) independiente(s) en un modelo de regresión. Va de 0 a 1, donde los valores más altos indican un mejor ajuste del modelo a los datos. Un valor de 0 sugiere que el modelo no explica nada de la varianza de la variable dependiente, mientras que un valor de 1 indica que el modelo explica perfectamente la varianza de la variable dependiente. El coeficiente de determinación se puede utilizar para evaluar la bondad de ajuste de un modelo y su capacidad para realizar predicciones precisas (Software DELSOL, 2020, párr. 1-2). Su fórmula es:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^T (\hat{Y}_t - \bar{Y})^2}{\sum_{t=1}^T (Y_t - \bar{Y})^2}$$

Analizando por partes, el numerador de la fracción corresponde a la expresión de la varianza, pero con dos diferencias fundamentales. La primera diferencia entre Y e Y-hat es que Y-hat es una estimación de Y a partir de un modelo. Representa el valor pronosticado de Y basado en las variables independientes del modelo, mientras que Y es el valor real de la variable dependiente. La segunda diferencia es que Y-hat se divide por T, donde T representa el número de observaciones en la muestra. Esta división se usa para ajustar la estimación de Y para el tamaño de la muestra y hacerla comparable entre diferentes conjuntos de datos. En algunos casos, T se anota como N, pero el denominador se elimina en ambas fórmulas para simplificar la expresión y facilitar el trabajo (López, 2017, párr. 4-6).

Mientras que, para el denominador de la fracción que conforma la fórmula del coeficiente de determinación., la única diferencia que existe respecto de la fórmula de la varianza es que no se aplica su denominador. Así, no hay una división entre N (número de observaciones) (Software DELSOL, 2020, párr. 4).

Para la interpretación se puede tomar como ejemplo la siguiente gráfica, que expresa los casos de ocurrencia de un evento (eje X) dependiendo de una variable (eje Y), donde el ajuste es de 0,835. Esto expresa que es un modelo cuyas estimaciones se ajustan bastante bien a la variable real. Aunque técnicamente no sería correcto, se puede decir que el modelo explica en un 83,5% a la variable real (López, 2017, párr. 7).



**Ilustración 3-2:** Ejemplo de una distribución  $R^2$

Fuente: López, 2017.

El coeficiente de determinación, o R-cuadrado, puede causar problemas en algunos casos. Un problema es que no penaliza la inclusión de variables explicativas no significativas. Por ejemplo, si un modelo incluye cinco variables explicativas que tienen poca relevancia o poca relación con la variable dependiente, el valor de R cuadrado puede aumentar aunque el modelo se esté desviando de la verdadera relación entre las variables (Software DELSOL, 2020, párr. 6-7).

Para abordar este problema, se desarrolló el coeficiente de determinación ajustado. Esta estadística es una versión modificada de R-cuadrado que se ajusta por el número de variables explicativas en el modelo. Se utiliza para corregir la tendencia de R-cuadrado a aumentar con el número de variables explicativas, incluso cuando esas variables no están realmente relacionadas con la variable dependiente (Software DELSOL, 2020, párr. 7).

### ***2.8.2. Coeficiente de determinación ajustado ( $R^2$ -ajustado)***

El coeficiente de determinación ajustado, también conocido como R-cuadrado ajustado, es una medida estadística que representa la proporción de la varianza en la variable dependiente que es explicada por la(s) variable(s) independiente(s) en un modelo de regresión. Es similar a la R-cuadrada pero penaliza la inclusión de variables no significativas. El valor R-cuadrado ajustado se corrige por la cantidad de variables explicativas en el modelo, por lo que brinda una imagen más precisa de la bondad del ajuste del modelo. Intenta resolver el problema de que R-cuadrado aumenta incluso si las variables incluidas no son relevantes y pueden conducir a un sobreajuste. El R-cuadrado ajustado ayuda a identificar las variables relevantes en un modelo, que son las que realmente explican la variación en la variable dependiente, y no solo las que están incluidas en el modelo, quedando (López, 2017, párr. 9):

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{N - 1}{N - k - 1} [1 - R^2]$$

Donde N es el tamaño de la muestra y k es el número de variables explicativas en el modelo. A medida que aumenta el número de variables explicativas (k), el R-cuadrado ajustado estará más alejado del R-cuadrado normal. Esto se debe a que, a medida que se agregan más variables al modelo, aumenta la probabilidad de incluir variables no significativas, y el R-cuadrado ajustado lo tiene en cuenta al penalizar la inclusión de variables no significativas. Por otro lado, a valores más bajos de k, la R-cuadrada ajustada estará más cerca de la R-cuadrada normal, porque cuantas menos variables tengamos, menos probable es que algunas de ellas sean no significativas, y la R-cuadrada ajustada no los penalizará tanto (López, 2017, párr. 10).

Es importante tener en cuenta que el R-cuadrado ajustado siempre será menor que el R-cuadrado normal porque tiene en cuenta la cantidad de variables en el modelo y, por lo tanto, siempre penaliza el modelo. En resumen, el R-cuadrado ajustado es una versión modificada del R-cuadrado que corrige el número de variables explicativas en el modelo y penaliza la inclusión de variables no significativas, lo que permite una imagen más precisa de la bondad de ajuste del modelo (Software DELSOL, 2020, párr. 8).

### 2.8.3. Criterio de Información de Akaike (AIC)

El AIC es una medida de la calidad relativa de un modelo, comparándolo con otros modelos con diferente número de parámetros. El AIC penaliza los modelos con más parámetros, convirtiéndolo en un compromiso entre la bondad de ajuste del modelo y su complejidad. Esto significa que a medida que aumenta el número de parámetros, también aumentará el valor de AIC. Por lo tanto, cuanto menor sea el valor de AIC, mejor se considera el modelo. Es una herramienta útil en la selección de modelos para seleccionar el modelo más parsimonioso, es decir, el modelo más simple que mejor representa los datos (KeepCoding, 2022, párr. 1-13):

Se calcula a partir del log-likelihood, el logaritmo del estimador de máxima verosimilitud:

$$AIC = 2 \cdot P - 2 \cdot \ln(\hat{L})$$

En el caso de una regresión lineal:

$$\ln(\hat{L}(\beta)) = -\frac{n}{2} \ln(2\pi\sigma^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i \cdot \beta)^2$$

Una vez que el modelo está entrenado, resulta que:

$$\sigma^2 = MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i \cdot \beta)^2 = n \cdot RSS$$

$$\ln(\hat{L}(\beta)) = -\frac{n}{2} \ln\left(2\pi \frac{RSS}{n}\right) - \frac{1}{2 \cdot RSS} \cdot RSS$$

Si sustituimos en la ecuación de criterio de información Akaike:

$$AIC = 2 \cdot P + 2 \cdot \frac{n}{2} \ln\left(2\pi \frac{RSS}{n}\right) - \frac{n}{2} = 2 \cdot P + n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) - \frac{n}{2} + n \cdot \ln(2\pi)$$

$$AIC = 2 \cdot P + n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right) + C$$

Como el valor del criterio de información Akaike realmente solo se utiliza para comparar un modelo con otro, el término constante C se puede ignorar, porque no cambia entre los modelos.

$$AIC = 2 \cdot P + n \cdot \ln\left(\frac{RSS}{n}\right)$$

En resumen, el criterio de información de Akaike (AIC) es una medida que evalúa la calidad relativa de un modelo teniendo en cuenta su complejidad. Penaliza los modelos complejos en favor de los simples para evitar el sobreajuste. El valor P representa el número de coeficientes en el modelo más uno. El AIC suele multiplicar P por 2, pero son posibles otros valores. Cuanto menor sea el valor de AIC, mejor será el modelo. AIC se puede utilizar en combinación con otros criterios de selección de modelos, como el criterio de información bayesiano (BIC), para elegir el mejor modelo. Es ampliamente utilizado en varios campos como econometría, estadística, física e ingeniería para seleccionar el mejor modelo (KeepCoding, 2022, párr. 14).

#### **2.8.4. Criterio Bayesiano de Información (BIC)**

El Criterio de Información Bayesiano o criterio de Schwarz es un método utilizado para determinar el número óptimo de periodos rezagados a incluir en un modelo de autorregresión. Minimiza la suma de los cuadrados de los residuos y ayuda a prevenir el sobreajuste al penalizar modelos complejos. Cuanto menor sea el valor de BIC, mejor será el ajuste del modelo. Se usa la fórmula (Rodó, 2020, párr. 1-2):

$$BIC(p) = \ln \left[ \frac{SCR(p)}{N} \right] + (p + 1) \cdot \frac{\ln(N)}{N}$$

Donde, los logaritmos en ambos factores de la fórmula representan el efecto marginal de incluir un período rezagado  $p$  más en la autorregresión.  $N$  es el número total de observaciones. Podemos dividir la fórmula en dos partes: parte izquierda y parte derecha, teniendo que:

$$\ln \left[ \frac{SCE(p)}{N} \right]$$

Representa la relación entre la suma de los cuadrados de los residuos de un modelo de autorregresión con un cierto número de períodos rezagados (SCE) y el número total de observaciones utilizadas en el modelo ( $N$ ). Los coeficientes del modelo se calculan utilizando OLS y, a medida que se incluyen más períodos rezagados, el SCE solo puede disminuir o permanecer igual. Entonces, el incremento de un período rezagado en la autorregresión provoca (Rodó, 2020, párr. 5-7):

- SCE( $p$ ): decrece o se mantiene constante.
- Coeficiente de determinación: incrementa.
- EFECTO TOTAL: un aumento de un período rezagado provoca una disminución en la parte izquierda de la fórmula.

Mientras que, la parte derecha:

$$(p + 1) \cdot \frac{\ln(N)}{N}$$

$(p+1)$  representa el número total de coeficientes en la autorregresión, es decir, los regresores con sus períodos rezagados ( $p$ ) y el intercepto (1). Entonces, el incremento de un período rezagado en la autorregresión provoca (Rodó, 2020, párr. 8-10):

- $(p+1)$ : aumenta porque incorporamos un período rezagado.
- EFECTO TOTAL: un aumento de un período rezagado provoca un aumento en la parte derecha de la fórmula.

### **2.8.5. Error Cuadrático Medio**

El RMSE mide la desviación promedio de los errores de pronóstico (residuales) de la línea de regresión. Representa la desviación estándar de estos residuos y proporciona una indicación de cuán estrechamente se agrupan los puntos de datos alrededor de la línea de mejor ajuste. Se puede utilizar como una medida de la precisión del modelo. Usa la fórmula (ORACLE, 2020, p. 260):

$$RMSE = \sqrt{(f - o)^2}$$

Donde

f = previsiones (valores esperados o resultados desconocidos) y

o = valores observados (resultados conocidos).

### **2.8.6. Significancia estadística**

La significancia estadística es una forma de evaluar si una relación entre variables en un análisis es real y no simplemente una casualidad. Se utiliza para determinar si un factor específico es la causa de la relación, y se mide matemáticamente para determinar la confiabilidad de una estadística en particular. La importancia de la significancia estadística radica en su capacidad para validar los hallazgos de un análisis, lo que a su vez otorga confiabilidad a las conclusiones obtenidas. Es esencial contar con información precisa y confiable para tomar decisiones, ya que de lo contrario se arriesga a malgastar recursos y perder oportunidades valiosas (Mixpanell, 2021, párr. 1-7).

La significancia estadística se determina mediante pruebas de hipótesis, que evalúan la posibilidad de que los resultados obtenidos se deban a la casualidad. Una "hipótesis" es una suposición o creencia sobre la relación entre conjuntos de datos. El objetivo de una prueba de hipótesis es determinar si esta suposición es válida o no. Una prueba de hipótesis estándar se basa en dos hipótesis: la hipótesis nula, que es la suposición predeterminada que se busca refutar, y la hipótesis alternativa, que es una teoría alternativa que contradice la hipótesis nula. La idea es determinar cuál de estas dos teorías está mejor respaldada por los datos (Mixpanell, 2021, párr. 8-11).

### **2.8.7. Lógica biológica de un modelo alométrico**

La lógica biológica de un modelo alométrico se refiere a cómo el modelo refleja las relaciones existentes entre las diferentes partes de un ecosistema o sistema biológico. Los modelos

alométricos se utilizan para analizar la relación entre la estructura y función de un ecosistema, y se basan en la idea de que la estructura de un ecosistema está determinada por la forma en que los organismos interactúan entre sí (Lerma y Orjuela, 2014, pp. 40-41).

En un modelo alométrico se establecen relaciones matemáticas entre diferentes parámetros biológicos, como el tamaño de las plantas o animales, la producción de biomasa, el uso del recurso, etc. Estas relaciones se basan en la teoría de que el tamaño de los organismos está relacionado con su función en el ecosistema, por ejemplo, un árbol grande tendría una función diferente a uno pequeño. La lógica biológica de un modelo alométrico se basa en la idea de que los organismos interactúan entre sí y las relaciones establecidas entre ellos permiten entender cómo funciona el ecosistema (Lerma y Orjuela, 2014, pp. 40-41).

### ***2.8.8. Homocedasticidad***

Es una propiedad estadística que se refiere a la igualdad en la varianza de una variable aleatoria en diferentes niveles de otra variable. Es decir, se refiere a la ausencia de variabilidad en la varianza de los datos. En una distribución homocedástica, la varianza de los datos es constante en todos los puntos de la muestra, es decir, los datos tienen una varianza constante a lo largo de todo el rango de la variable independiente. En una distribución homocedástica, los puntos de datos se encuentran alrededor de una línea central, y la variabilidad de los datos es similar en todas las áreas (Hernández y Mazo, 2020, p. 11).

La homocedasticidad es importante en algunas técnicas estadísticas, como el análisis de regresión, ya que se asume que la variable respuesta tiene una varianza constante en todos los puntos de la variable independiente. Si los datos no cumplen con esta suposición, los resultados del análisis pueden ser inexactos o engañosos. Hay varios métodos para comprobar si un conjunto de datos cumple con la propiedad de homocedasticidad. Algunos de los métodos más comunes son (Hernández y Mazo, 2020, p. 11):

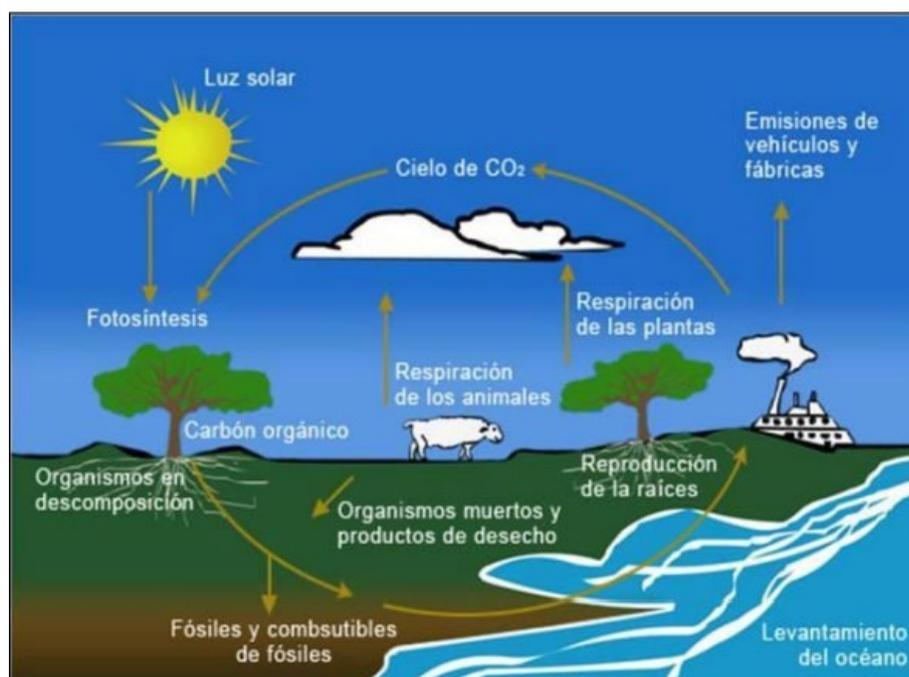
- **Gráfico de caja:** Un gráfico de caja se utiliza para comparar la distribución de los datos en diferentes grupos. Si los datos son homocedásticos, los gráficos de caja deberían tener una forma similar y un tamaño similar.
- **Prueba de Breusch-Pagan:** Esta prueba utiliza un modelo lineal para determinar si existe una relación entre la varianza residual y una o más variables independientes. Si la relación es significativa, entonces los datos no son homocedásticos.

- **Prueba de White:** Similar a la prueba de Breusch-Pagan, esta prueba utiliza un modelo lineal para determinar si existe una relación entre la varianza residual y una o más variables independientes. Sin embargo, se centra en la relación entre la varianza residual y los valores esperados de las variables independientes.
- **Prueba de Levene:** Es una prueba no paramétrica que se usa para comparar varianzas en más de dos grupos.

En general, el objetivo de estas pruebas es determinar si la varianza de los residuos es constante a lo largo de todo el rango de los datos, si no lo es, se concluye que los datos no son homocedásticos (Hernández y Mazo, 2020, p. 11).

## 2.9. Carbono y biomasa

El carbono almacenado en la biosfera se puede encontrar en tres lugares principales: los océanos, el suelo y los sistemas forestales. Los bosques juegan un papel importante en el ciclo global del carbono, ya que tienen la capacidad de almacenar grandes cantidades de carbono en el suelo a través de procesos metabólicos como la fotosíntesis y la respiración. El carbono se almacena en la estructura viva de los árboles y se libera a la atmósfera o al suelo a través de la descomposición de la materia orgánica o la quema de biomasa. Este proceso completa el ciclo del carbono (Barrionuevo, 2007, p. 19).

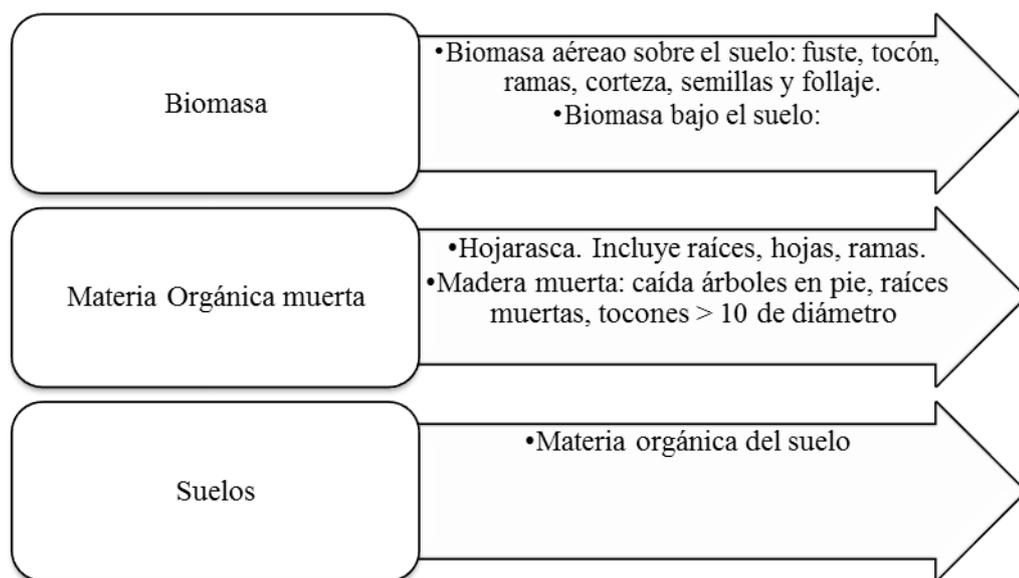


**Ilustración 4-2:** Ciclo del dióxido de carbono

Fuente: Barrionuevo, 2007.

Los bosques secundarios, las plantaciones y otros sistemas forestales tienen el potencial de ayudar a reducir el efecto invernadero, pero no de forma permanente. Estos proyectos forestales pueden ser utilizados como una alternativa para compensar emisiones a través de bonos de carbono y contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero, principalmente CO<sub>2</sub> (Arango y Camargo, 2010, p. 79). Otras alternativas que también actúan como sumideros de carbono incluyen la conservación de bosques primarios amenazados, la restauración de bosques secundarios y los proyectos de forestación y reforestación en áreas degradadas (Jumbo et al., 2018, p. 58).

En la investigación del IPCC (2013), se observa los sumideros de carbono presentes en un sistema forestal:



**Ilustración 5-2:** Sumideros de carbono presente en un sistema forestal

Fuente: IPCC, 2013.

A lo largo de la historia, la biomasa forestal se ha utilizado como fuente de combustible para la generación de calor, como la leña y el carbón vegetal. La biomasa es el combustible más duradero del mundo, pero gestionado con métodos modernos. Además, destaca que en los bosques se genera biomasa, pero estas pueden variar con el tiempo debido a los cambios en las especies forestales y el ecosistema circundante. Uno de los principales factores que inciden en esto hoy y en el futuro es el cambio climático, que provoca un aumento paulatino de la temperatura media global (Barrionuevo, 2007, p. 17).

La Directiva 2009/28 de la Unión Europea define la biomasa como la porción biodegradable de los desechos y residuos de origen biológico de las actividades agrícolas, forestales, pesqueras y

acuícolas, así como de los desechos industriales y municipales (Diario Oficial de la Unión Europea, 2009, p. 30).

## **2.10. Zona de vida: estepa espinosa Montano Bajo (eeMB)**

La zona de vida en mención se encuentra en el callejón interandino, formando lo que se conocen como llanuras, valles secos, grandes barrancos; suelos arcillosos que presentan valores inferiores al 30% (Donoso, 2012, p. 44). La formación vegetal se encuentra en el siguiente rango altitudinal 2000 a 2900 msnm, cabe recalcar que en las vertientes orientales existen una ligera variación de hasta 3000 metros. El rango referente a la temperatura circula entre los valores 12-18°C en donde se presenta una precipitación anual de 250 a 500mm. Esta zona de vida tiene periodos secos que van desde los 3 a 5 meses, en donde puede existir lloviznas leves.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

Para el trabajo de Integración Curricular, tipo proyecto de investigación ejecutado se siguió la metodología propuesta por Fonseca (2017, pp. 97-100) en donde trata la elaboración de modelos alométricos para biomasa enfocado en las especies forestales perennes.

#### 3.1. Enfoque de investigación

La investigación tiene un enfoque mixto (cuantitativa, cualitativa) debido a que existe una base de datos previa con información de variables cuantitativas levantadas en campo (altura, DAP, peso fresco del fuste, ramas gruesas, ramas delgadas y hojas), así como también se tomaron muestras de órganos para el análisis de materia seca en el laboratorio. Información que se analizó para alcanzar los objetivos propuestos en el presente trabajo de investigación.

#### 3.2. Alcance

El presente estudio es una útil herramienta predictiva que permitirá tomar la mejor decisión en la estimación de biomasa para proyectos bioenergéticos, mediante una ecuación matemática.

#### 3.3. Tipo de estudio

La investigación presente es tipo correlacional, en donde se evaluó el grado de relación existente o no entre la variable dependiente (biomasa) y variable independiente (DAP y altura), conociendo el comportamiento de una de las variables (DAP y altura).

#### 3.4. Características del lugar experimental

##### 3.4.1. Ubicación Geográfica

La investigación se realizó con datos generados de un muestreo destructivo de un experimento de evaluación del comportamiento dasométrico de la especie forestal *Eucalyptus saligna* Sm (leñosa de rápido crecimiento) de cinco años de edad plantado en la Estación Experimental Tunshi de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, ubicada en la parroquia Licto, del cantón Riobamba,

provincia de Chimborazo, la cual se encuentra en una altitud de 2780 m.s.n.m. Coordenadas Proyectadas UTM Zona 17S, Datum WGS84 764855 E & 9806720 N.

### **3.4.2. Características climáticas**

Las características climáticas del sitio de estudio proporcionadas por el INIAP (2015, p. 1), muestran los siguientes datos:

Precipitación media anual: 835,6mm

Temperatura media anual: 13,8 ° C

Evaporación promedio por día: 2,29mm

Humedad relativa media anual: 66%

Heliofanía anual: 1728,1 horas luz

### **3.4.3. Clasificación ecológica**

Según Donoso (2012, p. 44), indica que el lugar de la investigación se encuentra en estepa espinosa Montano Bajo (eeMB).

### **3.4.4. Características edáficas**

#### **3.4.4.1. Taxonomía**

De acuerdo con Soil Taxonomy, el sitio pertenece al orden Entisol, suborden fluvents (MAG, 2023, párr. 1).

#### **3.4.4.2. Textura**

Según el Laboratorio de Suelos y Agua de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP (2015, p. 3), el suelo del área de estudio presentó las siguientes características texturales:

Arena (%) = 34

Limo (%) = 54

Arcilla (%) = 8

### 3.4.4.3. Características nutricionales del suelo

Según el Laboratorio de Suelos y Agua de la Estación Experimental Santa Catalina del INIAP (2015, p. 5), el suelo del área de estudio presentó las siguientes características nutricionales:

pH =	7,75 LAI	(Ligeramente alcalino)
NH <sub>4</sub> (ppm) =	25,00 B	(Bajo)
P (ppm) =	30,00 A	(Alto)
S (ppm) =	33,00 A	(Alto)
K (Meq/100ml) =	0,52 A	(Alto)
Ca (Meq/100ml) =	9,00 A	(Alto)
Mg (Meq/100ml) =	4,20 A	(Alto)
Zn (ppm) =	0,60 B	(Bajo)
Cu (ppm) =	6,5 A	(Alto)
Fe (ppm) =	41,00 A	(Alto)
Mn (ppm) =	3,80 B	(Bajo)
Bo (ppm) =	0,70 B	(Bajo)
MO (%) =	1,10 B	(Bajo)

## 3.5. Materiales

### 3.5.1. Materiales de oficina

Laptop, calculadora, lápiz.

### 3.5.2. Software

Microsoft Excel, Estadístico Infostat.

## 3.6. Metodología para determinar la biomasa aérea

### 3.6.1. Determinación del tamaño de la muestra

La población de la especie *E. saligna* Sm, en el experimento fue de 291 individuos (árboles) que fueron parte del ensayo de investigación del Proyecto Pawlonia que duro seis años (edad de plantación), donde se trabajó con una muestra de 36 individuos. Según Dauber (1995; citado por

Alvarez, 2008, p. 113), la intensidad mínima de muestreo debe ser del 8%. Por otra parte, Segura y Andrade (2008, p. 92), Ramos et al. (2023, p. 82) mencionan que lo ideal es trabajar con al menos 30 árboles representativos de la población de interés.

### **3.6.2. Medición, corte y cuantificación de biomasa por árbol**

#### *3.6.2.1. Método destructivo*

De acuerdo con el protocolo de investigación propuesto por Ramos et al. (2023, p. 82), se indica cronológicamente el proceso de lo ejecutado:

0. Etiquetado/ identificación del árbol.
1. Medición del DAP (cm).
2. Cortar/apear el árbol a 10 cm del suelo.
7. Cortar y separar ramas delgadas (< 2 cm), ramas medias (2-8 cm) y ramas gruesas (>8 cm) y registrar su peso fresco por tipo de rama.
8. Tomar una muestra de alrededor a 500 g de discos de las ramas gruesas, medias y delgadas.
9. Separar las hojas y registrar su peso fresco y tomar una muestra representativa de 500 g.
10. Medir la longitud del fuste.
11. Dividir el fuste en trosas de 2.2 m.
12. Tomar discos de 3 cm de espesor en los extremos del tronco (10 cm), y cada 2,2 m. Los discos identificar de abajo hacia arriba, en cada árbol evaluado y el número de la posición del disco en el fuste.
13. Registrar el peso fresco del fuste

#### *3.6.2.2. Cálculo para la obtención de materia seca*

Las muestras de cada uno de los diferentes componentes se secaron al horno (estufa de aire forzado) durante 48 horas a 72 °C hasta llegar a su peso constante, para estimar su contenido de materia seca, y se obtuvo mediante el siguiente cálculo (Fonseca, 2017, p. 93):

$$\%MS = (P_{ss} / P_{sf}) * 100$$

Donde;

MS: Materia seca (%)

P<sub>ss</sub>: Peso de la submuestra seca (g)

$P_{sf}$ : Peso de la submuestra fresca (g)

### 3.6.2.3. Cálculo para la obtención de biomasa en cada uno de los componentes del árbol

Las muestras obtenidas de cada árbol se dividieron en tres componentes: fuste, ramas y hojas, con el fin de obtener la biomasa de cada tipo de órgano. A continuación, se detalla el procedimiento para la obtención la biomasa de cada uno de los componentes.

$$B_{(f-r-h)} = P_{(f-h-r)} * \% MS$$

Donde:

$B_f$ : Biomasa de fuste

$B_r$ : Biomasa de ramas

$B_h$ : Biomasa de hojas

P: Peso fresco de cada componente (fuste, ramas, hojas) (g)

MS: Materia seca (%)

### 3.6.2.4. Cálculo para la obtención de la biomasa total en el árbol

Para determinar la biomasa total ( $B_t$ ), se obtuvo mediante la sumatoria de la biomasa del fuste ( $B_f$ ), hojas ( $B_h$ ) y ramas ( $B_r$ ) a continuación, la formula siguiente:

$$B_t = B_f + B_r + B_h$$

### 3.6.2.5. Cálculo para la obtención del factor de expansión de biomasa (FEB)

Es el residuo entre la biomasa total y la del fuste, es un instrumento muy práctico a la hora de calcular la biomasa total del árbol, conociendo la biomasa del fuste. En el FEB influyen muchos factores como la especie, DAP, edad del árbol o plantación y varían entre 1.3 y 2.5 (Brown, 1997, párr. 8).

$$FEB = B_t/B_f$$

### 3.7. Organización de los datos y correlación de variables

La información generada en el muestreo destructivo se organizó en una tabla de datos Excel, con una fila por individuo muestreado, en las columnas se colocaron las variables independientes N° de árbol y dependientes unidimensionales (DAP, altura) y multidimensionales (Biomasa por componente), como se presenta en la tabla 1-3. Posteriormente se graficó para analizar la tendencia que presentan los datos y definición de que tipo de modelo de regresión aplicar.

**Tabla 1-3:** Organización de datos para el desarrollo de modelos alométricos

Nro. de árbol	DAP (cm)	h <sub>t</sub> (m)	Peso fresco por componente (kg)			P <sub>r</sub> árbol (kg)	Materia seca por componente (%)			Biomasa aérea total (kg)
			Fuste	Ramas	Hojas		Fuste	Ramas	Hojas	

Fuente: Segura y Andrade, 2008.

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

### 3.8. Selección de mejores modelos alométricos

#### 3.8.1. Definición de las variables y prueba de supuestos estadísticos

En el análisis de regresión, las variables que se indican a continuación se utilizan para la construcción de las ecuaciones de regresión para la estimación de biomasa.

Variable dependiente: “Y” (biomasa)

Variable independiente: “X” (DAP y altura)

Los datos de las variables antes referidas y utilizadas en el análisis de regresión cumplen con los supuestos de normalidad, independencia y homogeneidad de varianzas.

Se realizaron análisis de correlación de las variables dependientes e independientes, el cuál arroja un valor r denominado, coeficiente de correlación de Pearson, esta prueba además permite conocer la asociación entre las variables presentes en la investigación.

#### 3.8.2. Estimación de parámetros del modelo

Loetsch et al. (1973; citado por Segura y Andrade, 2008, p. 91), recomiendan usar algunos modelos alométricos genéricos para ser probados estadísticamente, con la finalidad de hallar el modelo que muestre un buen ajuste y permita un margen mínimo de error en la estimación a continuación,

se muestra los modelos lineales sin y con transformación logarítmica (Ln), que se usaron en la investigación:

1.  $B = a + b \cdot dbh$
2.  $B = a + b \cdot h$
3.  $B = a + b \cdot dbh + c \cdot h$
4.  $B = a + b \cdot dbh \cdot h$
5.  $B = a + b \cdot dbh^2$
6.  $B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2$
7.  $\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh)$
8.  $B = a + b \cdot h^2$
9.  $B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2 \cdot h$
10.  $B = a + b \cdot dbh + c \cdot h^2$
11.  $B = a + b \cdot dbh^2 \cdot h$
12.  $B = a + b \cdot \ln(dbh)$
13.  $B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh^2 \cdot h + d \cdot h$
14.  $B = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$
15.  $B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh \cdot h + d \cdot dbh^2 \cdot h$
16.  $\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$

Donde:

B: Biomasa; dbh: diámetro a la altura del pecho; h: altura; a, b, c, d: parámetros del modelo; Ln= logaritmo natural o base e.

### ***3.8.3. Selección del modelo de mejor ajuste***

Para la selección de los modelos de mejor ajuste se siguió la metodología de Fonseca (2017, pp. 97-100) donde considera cinco estadígrafos, para la validación de los modelos seleccionados, considerado como mejor modelo aquel que presente el mayor  $R^2$  ajustado (coeficiente de determinación ajustado), y los menores resultados en CME (cuadrado medio del error), PRESS (Suma de cuadrados de los residuos predichos), AIC (criterio de información Akaike) y BIC (Criterio Bayesiano de Información).

Para los 16 modelos propuestos para esta investigación se seleccionará aquel con mejor ajuste para la biomasa total aérea en base en los siguientes parámetros:

1. Mayor  $R^2$  y  $R^2$  ajustado
2. Menores AICE, BIC y RMSE
3. Significancia del modelo y los parámetros
4. Se verificó la lógica biológica del modelo seleccionado
5. Se verificó su homocedasticidad

#### ***3.8.4. Comparación de observaciones reales versus las estimaciones de los mejores modelos***

Se graficó los valores de biomasa de los individuos muestreados en el eje de las abscisas y la estimación del modelo en el eje de las ordenadas.

#### ***3.8.5. Lógica biológica de los modelos***

En este apartado se consideró la practicidad en el uso de los modelos, es decir se analizó la curva generada observando los extremos y los datos que se encontraban fuera de su rango, los modelos que presentaron cambios bruscos en la curvatura se descartaron, de acuerdo a lo propuesto por (Segura y Andrade, 2008, p. 38)

## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1. Análisis del muestreo destructivo de *Eucalyptus saligna* (Base de datos)

Al final del ensayo de adaptación de especies del género *Pawlonia*, se realizó un inventario de 40 individuos de *E. saligna* (testigo), a los cuáles se midió el DAP y su altura total (ht) principalmente para posteriormente continuar con la cuantificación de la biomasa por el método directo (muestreo destructivo),

En la Tabla 1-4, se presentan los rangos y promedio de las variables de crecimiento dasométrico (DAP y altura) de la especie forestal en estudio. El DAP en *E. saligna* oscilo entre 5,88 y 21,00 cm distribuidas en un rango de 15,12 cm. La altura total estuvo comprendida entre 5,40 y 14,80 m distribuidas en un rango de 9,40 m. La homogeneidad de los datos de las variables respuesta se debe particularmente al sistema forestal, la plantación presentó diferencias poco notables, esto se explica como una característica morfológica de la especie donde el DAP y altura total se ven influenciados por la ubicación en el ensayo, los nutrientes presentes en el suelo y la captación solar.

**Tabla 1-4:** Rango y promedio de DAP y altura total de *E. saligna* al quinto año de plantación en la Estación Experimental Tunshi-ESPOCH

Especie	DAP (cm)				Altura (m)			
	Min.	Max.	Rango	Promedio	Min.	Max.	Rango	Promedio
<i>E. saligna</i>	5,88	21,00	15,12	13,08	5,40	14,80	9,40	11,64

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

Para conocer el número de clases diamétricas con las que se va a trabajar, se la infirió basándose en la regla de Sturges, en donde se obtuvieron 6 clases diamétricas con una amplitud de 2.52, que se ve reflejada en la tabla 2-4 en la marca de clase.

#### Regla de Sturges

$$K = 1 + 3.3 \log_{10} (n)$$

Donde:

n: representa el número de datos

$$K = 1 + 3.3 \log_{10} (40) = 6.29 = 6$$

### Amplitud

$$A = R/K$$

Donde:

R: representa el rango de los datos del diámetro

K: es la Regla de Sturges.

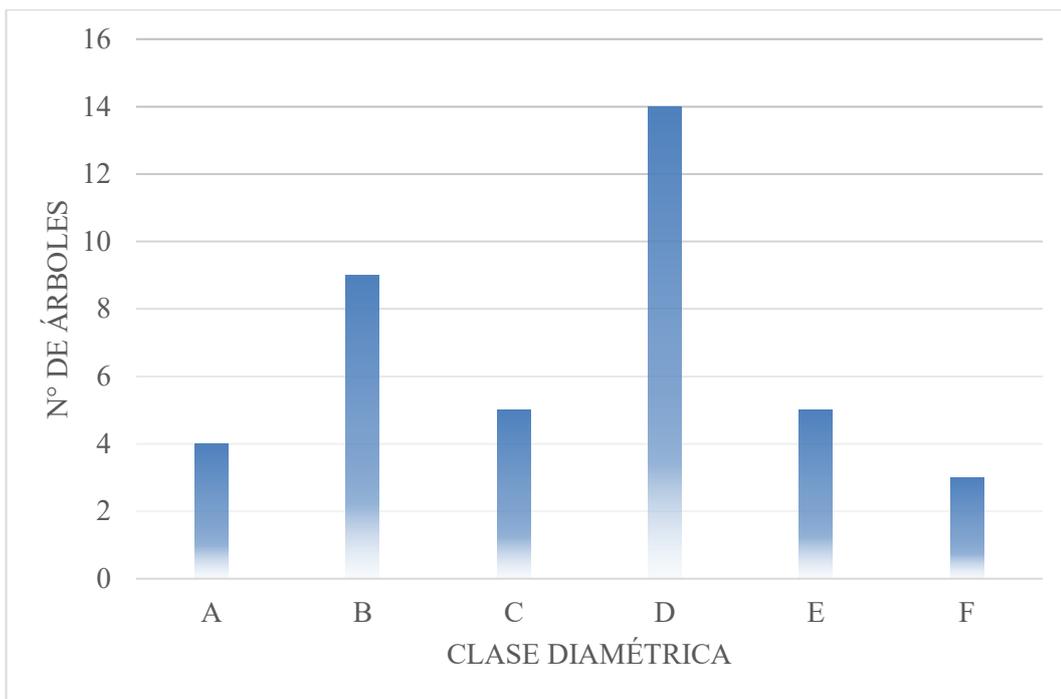
$$A = 15.12/6 = 2.52$$

**Tabla 2-4:** Tabla de datos agrupados sobre las clases diamétricas de 40 individuos de *E. saligna*

N° de clase	Límite inferior (Li)	Límite superior (Ls)	Marca de clase (Xi)	F. absoluta (fi/ni)	F. relativa (Ni)	Marca clase *F absoluta (Xi*fi/ni)	FR (%)
1	5,88	8,40	7,14	4	4	28,56	10,00
2	8,40	10,92	9,66	9	13	86,94	22,50
3	10,92	13,44	12,18	5	18	60,9	12,50
4	13,44	15,96	14,70	14	32	205,8	35,00
5	15,96	18,48	17,22	5	37	86,1	12,50
6	18,48	21,00	19,74	3	40	59,22	7,50
<b>Total</b>				40			100

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

A continuación, se presenta un gráfico de barras (Ilustración 1-4) indicando el número de individuos de *E. saligna* en cada una de las clases diamétricas. Donde: A = 5,88-8,40 cm; B = 8,40-10,92 cm; C = 10,92-13,44 cm; D = 13,44-15,96; E = 15,96-18,48; F = 18,48-21,00 cm.



**Ilustración 1-4:** Distribución de las clases diamétricas de *E. saligna*

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

De acuerdo con el rango de datos de la especie *E. saligna* la distribución de frecuencias de las clases tiende a que el mayor porcentaje (35%) de la población de estudio ( $n=14$ ), se encuentra en la clase diamétrica D (13,44-15,96), seguido de la clase diamétrica B con un 22,5%, las clases C y E con un mismo valor porcentual de 12,5 % ( $n=5$ ).

#### 4.1.1. Porcentaje de Materia Seca

El porcentaje promedio de materia seca encontrado en la especie leñosa fue 55,2% (tabla 3-4); el componente fuste presenta un 55,9%, el componente ramas < a 2cm es 56,5%, las ramas de 2 a 8 cm presentan un 55%, las ramas > a 8 cm y hojas presentan el mismo porcentaje de materia seca (54.4%).

**Tabla 3-4:** Fracción de materia seca de cada uno de los componentes analizados

Especie	Materia seca					
	Fuste	Ramas < a 2 cm	Ramas de 2 a 8 cm	Ramas > a 8 cm	Hojas	Promedio
<i>E. saligna</i>	0,559	0,565	0,550	0,544	0,544	0,552

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.1.1.1. Biomasa de árboles

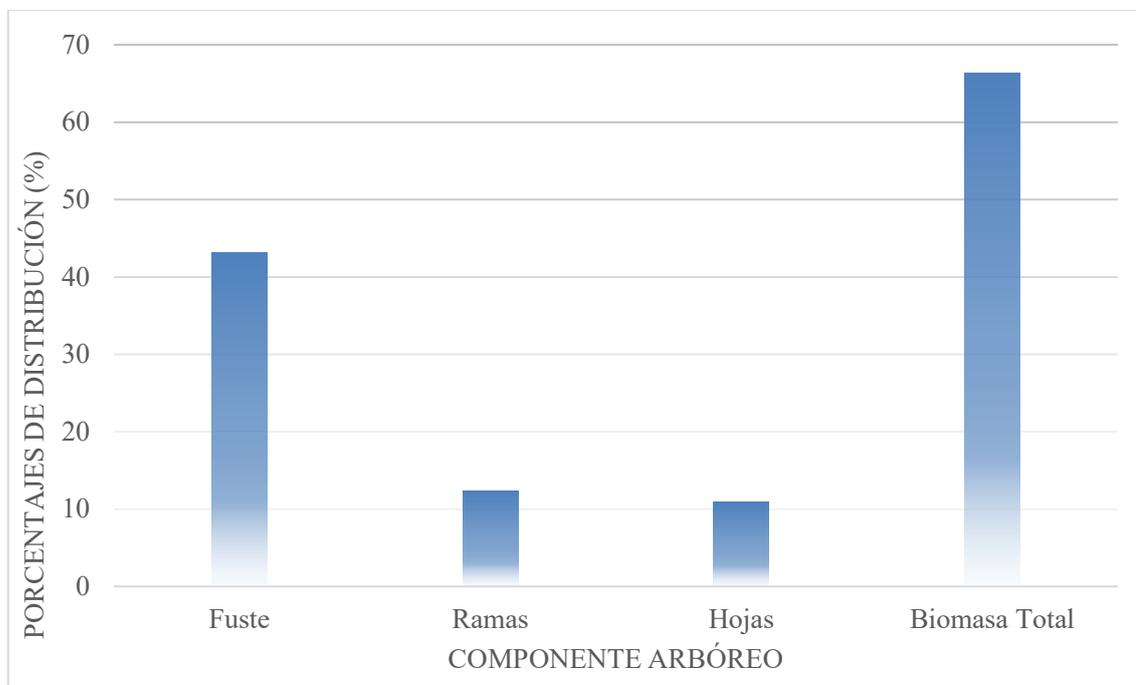
El cálculo de la biomasa aérea total se determinó a través de la sumatoria de la biomasa de cada componente, a partir de los valores del porcentaje de materia seca de cada uno de ellos, que se obtuvieron en laboratorio a partir de las muestras tomadas en campo. Los promedios de biomasa por componentes y biomasa aérea total se presentan en la Tabla 4-4.

**Tabla 4-4:** Biomasa promedio por componente, de *E. saligna* en la Estación Experimental Tunshi-ESPOCH

Especie	Biomasa (kg/ árbol)			
	Fuste	Ramas	Hojas	Biomasa Aérea Total
<b>E. saligna</b>	43,1	12,4	10,9	66,3

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

En la Ilustración 2-4, se representa el aporte promedio por árbol y distribución de la biomasa en cada uno de los componentes analizados, en la estructura total de la especie leñosa. En la especie en estudio el componente que mayor cantidad de biomasa aportó fue el fuste (65%), seguido por las ramas (19%) y por último el componente de las hojas (16%).



**Ilustración 2-4:** Porcentajes de biomasa promedio de cada componente por árbol, de *E. saligna* en la Estación Experimental Tunshi- ESPOCH

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.1.2. Factor de expansión de biomasa (FEB)

$$FEB = B_t/B_f$$

$$FEB = 66,3/43,1 = 1,538$$

El FEB que experimentó la especie leñosa *Eucalyptus saligna* Sm se encuentra dentro de los rangos admisibles con un valor de 1,538.

#### 4.2. Definición y selección de las variables

La selección de las variables independientes en los modelos evaluados se basó en el poder de explicación de la variable dependiente (biomasa), esto se determinó gracias a la prueba de correlación entre las variables dependientes e independientes, donde se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson (r).

Se estimó el coeficiente de correlación de Pearson (Tabla 5-4) entre las variables independientes (diámetro a la altura del pecho -DAP-, altura total -At-, altura hasta la primera rama -Apr-) e dependiente (biomasa total sobre el suelo -Bt-). Se encontró que el DAP tiene una alta correlación con la biomasa total, presentando un coeficiente de correlación de 0,89 (tabla 5-4). En contraste, la altura total (r=0,57) y altura hasta la primera rama (r=0,39) tienen muy baja correlación con la biomasa.

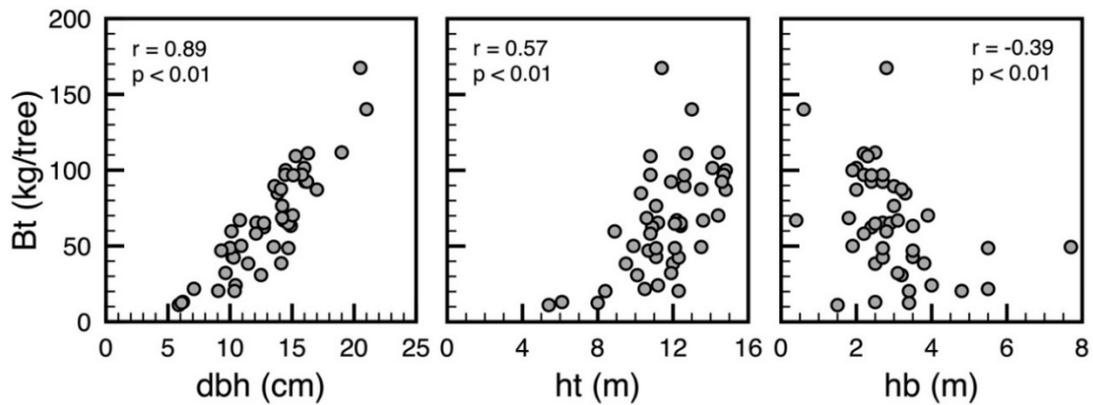
**Tabla 5-4:** Coeficiente de correlación de Pearson entre las variables independientes (DAP, At, Apr,) y la dependiente (Bt) en 40 árboles muestreados de la especie *E. saligna*

		DAP	A <sub>t</sub>	A <sub>pr</sub>	B <sub>t</sub>
<b>DAP</b>	Pearson's r	—			
	p-value	—			
<b>A<sub>t</sub></b>	Pearson's r	0,657	—		
	p-value	<,001	—		
<b>A<sub>pr</sub></b>	Pearson's r	-0,280	0,043	—	
	p-value	0,060	0,778	—	
<b>B<sub>t</sub></b>	Pearson's r	0,888	0,568	-0,393	—
	p-value	<,001	<,001	0,007	—

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

En la Ilustración 3-4, se hace una representación visual sobre la alta correlación existente para la biomasa total sobre el suelo respecto al DAP/dbh, en la especie forestal *E. saligna*, donde se puede

observar que la relación entre la biomasa y el DAP/dbh muestra una tendencia clara y uniformidad en sus datos en comparación con la altura total (ht) y altura hasta la primera rama (hb).



**Ilustración 3-4:** Relación entre la biomasa aérea total por árbol y el DAP/dbh, altura total (ht), y altura hasta la primera rama (hb). *E. saligna*, en Tunshi-ESPOCH

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.3. Estimación de parámetros del modelo

Debido a la alta correlación entre la  $B_t$  y el DAP, se decidió probar aquellos modelos en los cuales el DAP tenga alta importancia. Los resultados de las regresiones para la biomasa total se resumen en la Tabla 6-4.

**Tabla 6-4:** Estimación de parámetros de 16 modelos de biomasa sobre el suelo con base en DAP y altura total

Modelos alométricos		Parámetros								
Nº	Ecuación genérica	F	a	p	b	p	c	p	d	p
1	$B = a + b \cdot dbh$	<0,001	-49,38	<0,001	8,89	<0,001				
2	$B = a + b \cdot h$	<0,001	-42,29	0,086	9,36	<0,001				
3	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot h$	<0,001	-46,6	0,001	9,06	<0,001	-0,434	0,778		
4	$B = a + b \cdot dbh \cdot h$	<0,001	-11,354	0,171	0,499	<0,001				
5	$B = a + b \cdot dbh^2$	<0,001	4,448	0,391	0,342	<0,001				
6	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2$	<0,001	-8,32	0,727	2,047	0,583	0,265	0,067		
7	$\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh)$	<0,001	-0,952	0,011	1,97	<0,001				
8	$B = a + b \cdot h^2$	<0,001	7,764	0,576	0,421	<0,001				
9	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	-33,62	0,078	6,569	0,011	0,00652	0,333		
10	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot h^2$	<0,001	-49,08	<0,001	8,794	<0,001	-0,0104	0,881		
11	$B = a + b \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	14,296	0,007	0,0235	<0,001				
12	$B = a + b \cdot \ln(dbh)$	<0,001	-185,3	<0,001	99,6	<0,001				
13	$B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh^2 \cdot h + d \cdot h$	<0,001	-24,6	0,389	0,451	0,006	-0,297	0,42	4,778	0,332
14	$B = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$	<0,001	-165,3	<0,001	108,5	<0,001	-17,5	0,37		
15	$B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh \cdot h + d \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	-10,271	0,477	0,4296	0,002	0,2118	0,281	-0,0155	0,319
16	$\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$	<0,001	-1,356	0,008	1,789	<0,001	0,354	0,228		

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.4. Estadígrafos para la evaluación del mejor modelo

La Tabla 7-4 muestra los principales resultados de los indicadores utilizados para la selección del mejor modelo ( $R^2$ , Adj  $R^2$ , AIC, BIC, RMSE).

**Tabla 7-4:** Indicadores para la validación del mejor modelo para estimación de biomasa

N°	Modelo genérico	Estadígrafos					
		F	$R^2$	Adj $R^2$	AIC	BIC	RMSE
1	$B = a + b \cdot dbh$	<0,001	0,79	0,78	390	395	15,7
2	$B = a + b \cdot h$	<0,001	0,32	0,31	443	449	28,1
3	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot h$	<0,001	0,79	0,78	392	399	15,7
4	$B = a + b \cdot dbh \cdot h$	<0,001	0,7	0,69	406	411	18,7
5	$B = a + b \cdot dbh^2$	<0,001	0,8	0,8	387	392	15,2
6	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2$	<0,001	0,8	0,8	388	396	15,1
7	$\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh)$	<0,001	0,82	0,81	17,1	22,6	0,273
8	$B = a + b \cdot h^2$	<0,001	0,31	0,3	444	450	28,3
9	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	0,79	0,78	391	398	15,5
10	$B = a + b \cdot dbh + c \cdot h^2$	<0,001	0,79	0,78	392	399	15,7
11	$B = a + b \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	0,76	0,75	396	401	16,8
12	$B = a + b \cdot \ln(dbh)$	<0,001	0,72	0,71	403	408	18,1
13	$B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh^2 \cdot h + d \cdot h$	<0,001	0,81	0,79	389	399	15
14	$B = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$	<0,001	0,72	0,71	404	411	17,9
15	$B = a + b \cdot dbh^2 + c \cdot dbh \cdot h + d \cdot dbh^2 \cdot h$	<0,001	0,81	0,8	389	398	14,9
16	$\ln(B) = a + b \cdot \ln(dbh) + c \cdot \ln(h)$	<0,001	0,82	0,81	17,5	24,8	0,268

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.5. Ranking para la selección del mejor modelo alométrico

En la Tabla 8-4 se resumen los principales indicadores para la selección del mejor modelo de los 16 probados, y así la calificación del mejor modelo con la menor suma es la mejor selección, estos parámetros estadísticos ayudan a ranquear los modelos probados he ahí su importancia en el proceso de selección del mejor modelo.

**Tabla 8-4:** Método para seleccionar el mejor modelo de biomasa sobre el suelo considerando cinco estadígrafos

N°	Modelo alométrico	Parámetros									Estadígrafos/ Ranking										
		F	a	p	b	p	c	p	d	p	R <sup>2</sup>	C	Adj R <sup>2</sup>	C	AI C	C	BI C	C	RMS E	C	Total
7	$\text{Ln}(B) = a + b \cdot \text{Ln}(\text{dbh})$	<0,00 1	-0,952	0,011	1,97	<0,00 1					0,8 2	1	0,81	1	17, 1	1	22, 6	1	0,273	2	6
16	$\text{Ln}(B) = a + b \cdot \text{Ln}(\text{dbh}) + c \cdot \text{Ln}(h)$	<0,00 1	-1,356	0,008	1,789	<0,00 1	0,354	0,22 8			0,8 2	1	0,81	1	17, 5	2	24, 8	2	0,268	1	7
15	$B = a + b \cdot \text{dbh}^2 + c \cdot \text{dbh} \cdot h + d \cdot \text{dbh}^2 \cdot h$	<0,00 1	- 10,27 1	0,477	0,429 6	0,002	0,2118	0,28 1	- 0,015 5	0,31 9	0,8 1	3	0,8	3	389	5	398	6	14,9	3	20
5	$B = a + b \cdot \text{dbh}^2$	<0,00 1	4,448	0,391	0,342	<0,00 1					0,8	5	0,8	3	387	3	392	3	15,2	6	20
6	$B = a + b \cdot \text{dbh} + c \cdot \text{dbh}^2$	<0,00 1	-8,32	0,727	2,047	0,583	0,265	0,06 7			0,8	5	0,8	3	388	4	396	5	15,1	5	22
13	$B = a + b \cdot \text{dbh}^2 + c \cdot \text{dbh}^2 \cdot h + d \cdot h$	<0,00 1	-24,6	0,389	0,451	0,006	-0,297	0,42	4,778	0,33 2	0,8 1	3	0,79	6	389	5	399	8	15	4	26
1	$B = a + b \cdot \text{dbh}$	<0,00 1	-49,38	<0,00 1	8,89	<0,00 1					0,7 9	7	0,78	7	390	7	395	4	15,7	8	33

9	$B = a + b*dbh + c*dbh^2*h$	<0,00 1	-33,62	0,078	6,569	0,011	0,0065	0,33			0,7 9	7	0,78	7	391	8	398	6	15,5	7	35
3	$B = a + b*dbh + c*h$	<0,00 1	-46,6	0,001	9,06	<0,00 1	-0,434	0,77			0,7 9	7	0,78	7	392	9	399	8	15,7	8	39
1 0	$B = a + b*dbh + c*h^2$	<0,00 1	-49,08	<0,00 1	8,794	<0,00 1	- 0,0104	0,88			0,7 9	7	0,78	7	392	9	399	8	15,7	8	39
1 1	$B = a + b*dbh^2*h$	<0,00 1	14,29 6	0,007	0,023 5	<0,00 1					0,7 6	1 1	0,75	1 1	396	1 1	401	1 1	16,8	1 1	55
1 2	$B = a + b*Ln(dbh)$	<0,00 1	-185,3	<0,00 1	99,6	<0,00 1					0,7 2	1 2	0,71	1 2	403	1 2	408	1 2	18,1	1 3	61
1 4	$B = a + b*Ln(dbh) + c*Ln(h)$	<0,00 1	-165,3	<0,00 1	108,5	<0,00 1	-17,5	0,37			0,7 2	1 2	0,71	1 2	404	1 3	411	1 3	17,9	1 2	62
4	$B = a + b*dbh*h$	<0,00 1	- 11,35 4	0,171	0,499	<0,00 1					0,7 4	1 4	0,69	1 4	406	1 4	411	1 3	18,7	1 4	69
2	$B = a + b*h$	<0,00 1	-42,29	0,086	9,36	<0,00 1					0,3 2	1 5	0,31	1 5	443	1 5	449	1 5	28,1	1 5	75
8	$B = a + b*h^2$	<0,00 1	7,764	0,576	0,421	<0,00 1					0,3 1	1 6	0,3	1 6	444	1 6	450	1 6	28,3	1 6	80

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

#### 4.6. Mejor modelo alométrico

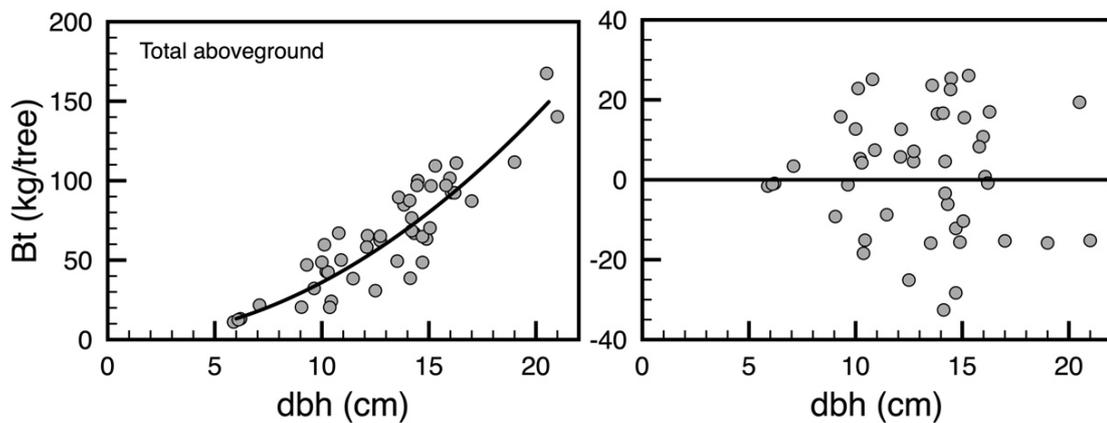
Los modelos de predicción de biomasa sobre el suelo en *E. saligna* que presentaron el mejor ajuste con base en el  $R^2$  y el  $R^2$  ajustado fueron los cuatro primeros (Tabla 8-4), los dos primeros presentaron los mismos valores para ambos parámetros ( $R^2 = 0,82$  y  $R^2$  ajustado  $= 0,82$ ); entre estos dos modelos, el valor más bajo de RMSE, AIC, BIC lo presentó el modelo 7 (Tabla 9-4), donde: B: Biomasa, Ln: Logaritmo natural o base e, y dbh: DAP o diámetro a la altura del pecho.

**Tabla 9-4:** Mejor modelo alométrico seleccionado para cinco estadígrafos

Componente	Modelo	$R^2$	$R^2$ ajust.	AIC	BIC	RMSE
Biomasa sobre el suelo total	$\text{Ln}(B) = -0,952 + 1,97 * \text{Ln}(\text{dbh})$	0,82	0,81	17,1	22,6	0,273

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

Según la selección de los modelos con base en parámetros estadísticos, el modelo 7 fue el de mejor ajuste a continuación, se representa la curva de ajuste de este modelo que relaciona el DAP con la biomasa sobre el suelo total (Ilustración 4-4).



**Ilustración 4-4:** Relación entre el DAP y biomasa sobre el suelo total modelo siete, de *E. saligna* en Tunshi - ESPOCH

Elaborado por: Panamá, Pedro, 2023.

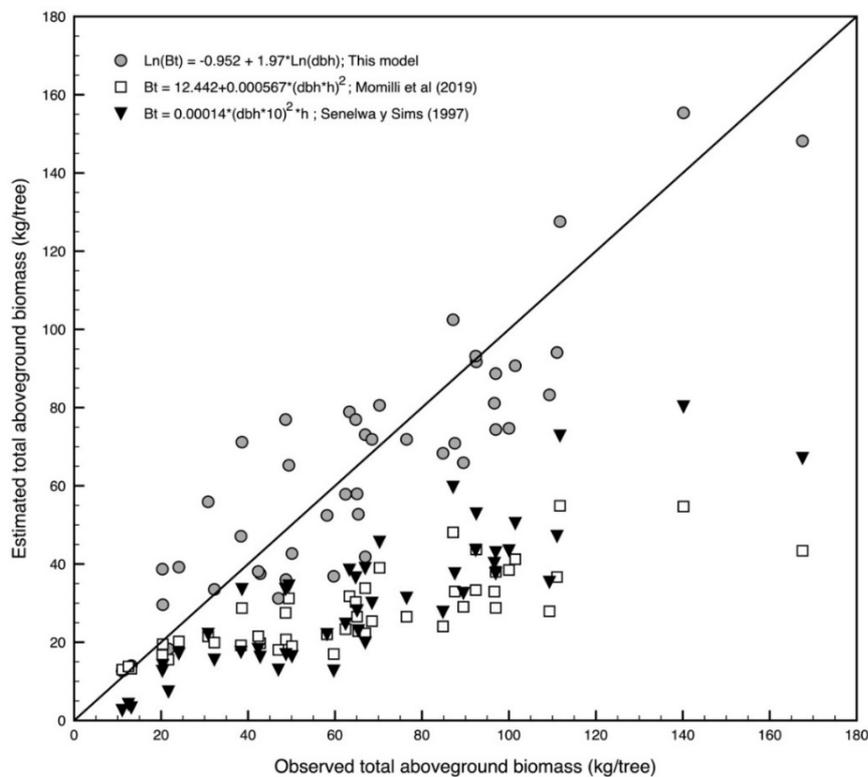
#### 4.7. Comparación de modelos generados por otro autor

Se consultaron modelos generados en otros estudios, para la cuantificación de biomasa sobre el suelo, en la especie leñosa *E. saligna*, con el objetivo de probar su aplicabilidad en los datos generados en esta investigación y a la vez comparar su ajuste con los modelos generados en este estudio.

El modelo de mejor ajuste para determinar la biomasa aérea total en *E. saligna*, se comparó con modelos generados por otros autores, en donde se encontró que el modelo generado en este estudio arroja estimaciones más exactas, con EMR de 23.2% comparado a 50.5% de Momolli et al. (2019, p. 2) y 53.1% de Senelwa y Sims (1997, p. 136).

En este caso de los datos de 40 árboles muestreados para desarrollar un modelo alométrico para estimación de biomasa total sobre el suelo, se encontró que el generado en esta investigación cuantifica la biomasa con una buena estimación con poco sesgo lo contrario a lo hallado por Momolli et al. (2019, p. 2), Senelwa y Sims (1997, p. 133) quienes subestiman la biomasa con la ecuación generada para su cálculo (Ilustración 5-4).

La aplicación de las ecuaciones de regresión generadas por los autores mencionados, no podrían ser aplicadas a la vegetación muestreada en esta investigación, pues los mismos presentarían una gran subestimación en los valores de biomasa total sobre el suelo, las causas de esto podrían ser determinados por factores como la densidad de plantación, tipo de plantación, condición edafoclimática y edáfica, edad de plantación en que fueron generadas.



**Ilustración 5-4:** Simulaciones de biomasa total sobre el suelo real y estimada con el modelo generado en esta investigación y otros estudios para *E. saligna*

**Elaborado por:** Panamá, Pedro, 2023.

## **4.8. Discusión**

### **4.8.1. Diámetro a la altura del pecho (DAP)**

El rango de los promedios del diámetro a la altura del pecho encontrados en la presente investigación: 5,88 y 21,00 cm son similares a los reportados por Senelwa y Sims (1997, p. 133), en un rango de 5-26 cm en un estudio de crecimiento de *E. saligna* con una edad de plantación de 5 años realizada en la Universidad de Massey, Nueva Zelanda, con condiciones de 50 días de helada al año, temperatura promedio 17,3°C y una temperatura mínima de 9,1°C, una precipitación de 970 mm y 1740 horas de sol y un suelo de pH de 5,5 a 6,2. Momolli et al. (2019, p. 1) y Vieira et al. (2016, p. 47), reporta los rangos superiores que van desde 18,0 a 26,9cm en una plantación de 10 años. Estos resultados se ven influenciados por varios factores: edafoclimáticos, nutrición, edad de establecimiento, labores silviculturales; pueden afectar a la productividad y rendimiento de la plantación (Momolli et al., 2019, p. 5).

### **4.8.2. Altura total**

La altura total (ht) de los árboles en la presente investigación toma los rangos que va desde 5,40 y 14,80 m, siendo los hallados en esta investigación superior a los encontrados por Senelwa y Sims (1997, p. 135), quienes reportan valores inferiores de 3 a 9,6m en un estudio de crecimiento de *E. saligna*, con una edad de plantación de 5 años. Lo reportado por Momolli et al. (2019, p. 5) en su investigación de cuantificación de biomasa es superior al encontrado en este estudio con una altura promedio 29.9 m, en una plantación de 10 años. Estos resultados se ven influenciados por varios factores: edafoclimáticos, nutrición, edad de plantación, labores silviculturales, así de esta manera pueden influir directamente en la productividad de la misma plantación (Momolli et al., 2019, p. 5).

### **4.8.3. Porcentaje de materia seca**

El porcentaje promedio de materia seca obtenida en esta investigación para la especie forestal *E. saligna* fue de 55,2%, estos valores son superiores a los hallazgos obtenidos por Hernández et al. (2017, pp. 922-936) quien reportó un porcentaje de 41,63% de promedio de materia seca en el caso de la especie *E. urophylla* este ensayo se trabajó con 93 árboles dentro de un rango de edad de 1 a 7 años, estos resultados se asemejan a pesar de ser dos especies distintas pero dentro de un mismo género, las condiciones meteorológicas del sitio son: temperatura media anual 26 °C, precipitación 2500 mm; el muestreo pertenece a una hectárea de plantación en territorio mexicano.

Jiménez et al (2018, p. 54) encontró valores similares a los de Hernández et al. (2017, pp. 922-936), el mismo que presenta un porcentaje promedio de materia seca de 43,23% en una plantación de 2 hectáreas con la especie *Gmelina arborea* de una edad de tres años.

#### **4.8.4. Biomasa total por componentes**

Para la continuación de este estudio los árboles de *E. saligna* concentraron 65 % de la biomasa total en el fuste, las ramas con un 19% y las hojas con 16%, estos valores se asemejan al estudio de Hernández et al. (2017, pp. 922-936) quien reporta en su estudio de *E. urophylla* quien trabajó con una intensidad de muestreo del 10%, para la cuantificación de biomasa con árboles dentro de un rango de edad de 1-7 años, determinaron que el fuste concentra el 91,42% del total de la biomasa seguido por un 5,54% en ramas y un 2,03% en follaje, también Alvarez (2008, p. 33) quienes reportan valores superiores a este estudio con lo siguiente: 82% almacenado en el fuste, 7% corteza y 11 % ramillos; aunque los resultados de ambos autores son de diferentes especies del género *Eucalyptus* de todas estas investigaciones podemos deducir que la mayor reserva de biomasa se encuentra en el fuste del árbol.

#### **4.8.5. Factor de expansión de biomasa**

El FEB de la especie *E. saligna* encontrado en esta investigación es 1,538 este valor es similar y cercano al encontrado por Hernández et al. (2017, pp. 922-936), quien reporta un valor de 1,58 para la clase diamétrica 10 y para la clase diamétrica 15 decrece su valor a 1,16 esto fue resultado del análisis de biomasa de la especie *E. urophylla*, Fonseca (2017, p. 92) presenta valores similares para un bosque secundario con un valor de 1,44 las especies forestales *Vochysia guatemalensis* y *Hyeronima alchernooides* utilizadas en plantaciones comerciales obtiene un promedio de 1,56; similares a los encontrados en esta investigación y dentro del rango admisible.

#### **4.8.6. Coeficiente de correlación de Pearson**

Gracias a la correlación existente entre las variables DAP y la biomasa total en la actual investigación se generó un  $R^2$  de 0,82, estudio similar al presentado por Senelwa y Sims (1997, p. 138) quienes presentan un  $R^2$  de 0,93 con la misma especie en estudio quien indica que la asociación de las variables DAP y altura se correlacionan con un buen ajuste para una estimación confiable, el coeficiente generado por Momolli et al. (2019, p. 6) es superior con un  $R^2$  de 0,98 presentando una mejor correlación entre las variables DAP y altura similar a las variables de este estudio, existen otros estudios Jiménez (2018, p. 54) en especies forestales como el caso de *Gmelina*

*arbórea* en una plantación quien presenta un  $R^2$  de 0,98, en la relación biomasa-DAP. Esto se explica como la relación de la biomasa total fue explicado mejor por la variable independiente DAP.

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones

Mediante el muestreo destructivo se determinó que el porcentaje de materia seca para la especie leñosa *E. saligna* fue 55,2%. El mayor porcentaje de biomasa se encontró en el fuste con un 65 %, seguido por las ramas (19%) y hojas (16%). El promedio de la biomasa aérea total fue de 66,3 kg por árbol, haciendo proyecciones con las características de este estudio se puede mencionar que a nivel de plantación se genera alrededor de 73 t h<sup>-1</sup> en un sistema de plantación de 3x3m.

El mejor modelo alométrico usado en la estimación de biomasa total sobre el suelo de *E. saligna*, es de tipo logarítmica (Ln), donde además se nota una mayor correlación existente entre la biomasa y el DAP (R<sup>2</sup>: 0,89). La mayor ventaja de estas ecuaciones es que su cálculo no es muy complicado además de que las variables que se ocupan son registradas en los inventarios forestales.

El modelo alométrico que presentó el mejor ajuste para la estimación de biomasa total sobre el suelo en plantaciones de *E. saligna* que tuvo una edad de cinco años, plantado en la Estación Experimental Tunshi, fue:  $\text{Ln}(B) = -0,952 + 1,97 * \text{Ln}(\text{dbh})$ , evaluado bajo cinco estadígrafos (R<sup>2</sup>, R<sup>2</sup> ajustado, AIC, BIC, RMSE).

El modelo alométrico generado en esta investigación es una herramienta muy práctica para la estimar la acumulación de biomasa en plantaciones de *E. saligna* de 5 años en la zona estepa espinosa Montano Bajo. En caso de no existir modelos específicos se puede utilizar como referencia para especies arbóreas con características similares a las de este estudio. Además, estos modelos alométricos son instrumentos muy necesarios para los procesos de valoración económica y monitoreo de carbono en proyectos verdes como la venta de certificados de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>.

## 5.2. Recomendaciones

Determinar la fracción de carbono de *E. saligna* para programas de captura de carbono con esto evitar el uso de la generalidad en sus estimaciones, si bien en la actualidad no existen extensas plantaciones en el país es importante incentivar los estudios relacionados a especies de rápido crecimiento para los avances en el sector forestal.

En el país, es necesario la generación de esta información (cuantificación de biomasa), para que organizaciones u entidades promuevan estrategia de conservación productiva, todo esto complementado por las compensaciones por servicios ambientales (captura de carbono), y así inmiscuirse en proyectos verdes que se encuentran tomando gran realce en la actualidad, como el tomar medidas de mitigación para desacelerar el calentamiento global.

Trabajar con una muestra representativa ( $n > 40$  individuos) y con una intensidad de muestreo ( $> 10\%$ ) que permita obtener estimaciones más eficaces y certeras para una adecuada gestión silvícola, todo esto claro de acuerdo con los objetivos del caso.

## BIBLIOGRAFÍA

**ACOSTA, F.** Determinación del factor de forma de la especie *Eucalyptus saligna* (Eucalipto) en una plantación forestal comercial del sector Tambillo Bajo, cantón Colta, provincia de Chimborazo (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [En línea]. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Recursos Naturales, Escuela de Ingeniería Forestal. Riobamba-Ecuador. 2018, pp. 5-7. [Consulta: 16 septiembre 2022]. Disponible en: <http://dspace.espech.edu.ec/bitstream/123456789/10372/1/33T0207.pdf>.

**ALVAREZ, G.** Modelos alométricos para la estimación de biomasa aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia (Trabajo de titulación) (Maestría) [En línea]. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Escuela de Posgrado. Turrialba-Costa Rica. 2008, pp. 6-113. [Consulta: 25 septiembre 2022]. Disponible en: [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4357/Modelos\\_alometricos\\_para\\_la\\_estimacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4357/Modelos_alometricos_para_la_estimacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

**ARANGA, Á.; & CAMARGO, J.** “Bosques de guadua del Eje Cafetero de Colombia: oportunidades para su inclusión en el mercado voluntario de carbono y en el Programa REDD+”. Recursos Naturales y Ambiente [En línea], 2010, (Colombia) 61, pp. 77-85. [Consulta: 05 diciembre 2022]. ISSN: 1659-1216. Disponible en: [https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8445/Bosques\\_de\\_gadua\\_del\\_eje\\_cafetero.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/8445/Bosques_de_gadua_del_eje_cafetero.pdf?sequence=1&isAllowed=y).

**BARRIONUEVO, S.** *Los Bosques como sumideros de carbono Alternativas para mitigar el Efecto Invernadero* [En línea]. Santiago del Estero-Argentina: Universidad Nacional de Santiago del Estero, 2007, p. 19. [Consulta: 03 diciembre 2022]. ISBN: 978-987-1676-29-3. Disponible en: <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-16-Bosques-sumidero-carbono-BARRIONUEVO.pdf>.

**BROWN, S.** *Estimación de la biomasa y el cambio de biomasa de los bosques tropicales: una introducción* [En línea]. Illinois-Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1997. [Consulta: 12 agosto 2022]. ISBN: 92-5-103955-0. Disponible en: <https://www.fao.org/3/w4095e/w4095e05.htm#2.1%20what%20tree%20formations%20are%20included>.

**CABALLERO, M.; et al.** “Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra”. *Revista Digital Universitaria* [En línea], 2007, (México) 8(10), pp. 2-12. [Consulta: 18 agosto 2022]. ISSN: 1067-6079. Disponible en: [https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct\\_art78.pdf](https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf).

**CALDUCH, R.** “La estructura económica internacional del siglo XIX”. *Estudios internacionales de la complutense* [En línea], 2006, (España) 8(3), pp. 35-82. [Consulta: 17 agosto 2022]. ISSN: 1575-7056. Disponible en: [https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2014-05-17-vol8\\_2006\\_n3.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/docs/835-2014-05-17-vol8_2006_n3.pdf).

**DIARIO OFICIAL DE LA UNIÓN EUROPEA. DIRECTIVA 2009/28/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 23 de abril de 2009 relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables y por la que se modifican y se derogan las Directivas 2001/77/CE y 2003/30/CE** [En línea]. Estrasburgo-Francia: Parlamento Europeo, 2009, p. 30. [Consulta: 05 diciembre 2022]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:es:PDF>.

**DÍAZ, G.** “El cambio climático”. *Ciencia y Sociedad* [En línea], 2012, (República Dominicana) 37(2), pp. 227-240. [Consulta: 19 agosto 2022]. ISSN: 0378-7680. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/870/87024179004.pdf>.

**DONOSO, E.** Análisis del sistema ambiental según la metodología de SENPLADES, como aporte a la planificación y ordenamiento territorial del cantón Ibarra (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [En línea]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Facultad de Ciencias Humanas, Escuela de Geografía. Quito-Ecuador. 1983, p. 44. [Consulta: 07 diciembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/10915/6.16.001230.pdf?sequence=4>.  
ecosistemas forestales tropicales”.

**FONSECA, W.** “Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales”. *Revista de Ciencias Ambientales* [En línea], 2017, (Costa Rica) 51(2), pp. 91-109. [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISSN: 2215-3896. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/6055225.pdf>.

**ESPAÑA, F.** Construcción de modelos alométricos para la determinación de biomasa aérea en aliso de nepal (*Alnus nepalensis* D. Don) en la zona de Intag, andes del norte del Ecuador (Trabajo

de titulación) (Ingeniería) [En línea]. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales, Carrera de Ingeniería Forestal. Ibarra-Ecuador. 2016, pp. 10-11. [Consulta: 25 septiembre 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/5728/1/03%20FOR%20236%20TRABAJO%20GRADO.pdf>.

**FAO.** *El eucalipto en la repoblación forestal* [En línea]. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 1981. [Consulta: 19 septiembre 2022]. ISBN: 92-5-300570-X. Disponible en: <https://www.fao.org/3/AC459S/AC459S00.htm#TOC>.

**FAO.** *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2015 Informe nacional Ecuador* [En línea]. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2014, p. 15. [Consulta: 13 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/3/az203s/az203s.pdf>.

**FAO.** *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 Principales resultados* [En línea]. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2020, pp. 5-6. [Consulta: 12 agosto 2022]. ISBN: 978-92-5-132580-3. Disponible en: <https://www.fao.org/3/CA8753ES/CA8753ES.pdf>.

**FAO.** *Servicios ecosistémicos y biodiversidad* [En línea]. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2022. [Consulta: 13 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.fao.org/ecosystem-services-biodiversity/background/regulating-services/es>.

**GREENPEACE.** *Imágenes y datos: así nos afecta el cambio climático* [En línea]. Madrid-España: Greenpeace, 2018, p. 32. [Consulta: 05 septiembre 2022]. Disponible en: <https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/11/GP-cambio-climatico-LR.pdf>.

**HERNÁNDEZ, F.; & MAZO, M.** *Modelos de Regresión con R* [En línea]. Bogotá-Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2020, p. 11. [Consulta: 18 enero 2023]. Disponible en: [https://fhernanb.github.io/libro\\_regresion/homo.html](https://fhernanb.github.io/libro_regresion/homo.html).

**HERNÁNDEZ, J.; et al.** “Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake”. *Agrociencia* [En línea], 2017, (México) 51,

pp. 921-938. [Consulta: 15 agosto 2022]. ISSN: 2521-9766. Disponible en: <https://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v51n8/1405-3195-agro-51-08-921-en.pdf>.

**INIAP.** *Adaptación de especies forestales de rápido crecimiento del género Paulownia spp a diversos ambientes bioclimáticos y suelos del Ecuador* [En línea]. Quito-Ecuador: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias de Ecuador, 2015, pp. 1-11. [Consulta: 21 septiembre 2022]. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5510/1/INIAPEEPPDF075.pdf>.

**INTA.** *Manual para productores de eucaliptos de la Mesopotamia Argentina* [En Línea]. Concordia-Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1995, p. 46. [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISBN 950-9853-55-0. Disponible en: [https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual\\_para\\_productores\\_de\\_eucaliptos\\_de\\_la\\_mesopotam.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-manual_para_productores_de_eucaliptos_de_la_mesopotam.pdf).

**IPCC.** *Cambio climático 2013 Bases físicas* [En línea]. Ginebra-Suiza: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, 2013, pp. 187-188. [Consulta: 19 agosto 2022]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI\\_AR5\\_glossary\\_ES.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf).

**IPCC.** *Cambio climático: una amenaza para el bienestar de la humanidad y la salud del planeta* [En línea]. Ginebra-Suiza: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, 2022, pp. 1-3. [Consulta: 18 agosto 2022]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/02/PR\\_WGII\\_AR6\\_spanish.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2022/02/PR_WGII_AR6_spanish.pdf).

**IPCC.** *El cambio climático y la tierra* [En línea]. Ginebra-Suiza: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático, 2020, p. 8. [Consulta: 18 agosto 2022]. ISBN: 978-92-9169-354-2. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL\\_SPM\\_es.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf).

**IPCC.** *Global Warming of 1.5°C* [En línea]. Ginebra-Suiza: el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2019, pp. 4-18. [Consulta: 12 agosto 2022]. Disponible en: [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2020/03/SR15\\_Errata\\_20200312.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2020/03/SR15_Errata_20200312.pdf).

**JIMÉNEZ, D.; et al.** “Determinación del mejor modelo alométrico para la estimación de biomasa de *Gmelina arborea* Roxb. procedente de plantaciones con manejo de rebrotes”. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* [En línea], 2018, (México) 15(1), pp. 53-60. [Consulta: 16 febrero 2023].

ISSN: 2215-2504. Disponible en: <https://www.scielo.sa.cr/pdf/kuru/v15s1/2215-2504-kuru-15-s1-53.pdf>.

**JUELA, T.** Caracterización de las propiedades físicas de la madera de *Eucalyptus saligna* Smith en la provincia de Loja (Trabajo de titulación) (Ingeniería) [En línea]. Universidad Nacional de Loja, Área Agropecuaria y de Recursos Naturales Renovables, Carrera de Ingeniería Forestal. Loja-Ecuador. 2015, p. 4. [Consulta: 19 septiembre 2022]. Disponible en: <https://dspace.unl.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/10310/1/Tesis%20Tatiana%20Cecibel%20Juela%20Quizhpe.pdf>.

**JUMBO, C.; et al.** “medición de carbono del estrato arbóreo del bosque natural Tinajillas-Limón Indanza, Ecuador”. La Granja [En línea], 2018, (Ecuador) 27(1), pp. 61-63. [Consulta: 23 septiembre 2022]. ISSN: 1390-8596. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/4760/476054842004/html/>.

**KEEPCODING.** *¿Qué es el criterio de información Akaike AIC?* [Blog]. Madrid-España: Keepcoding, 2022. [Consulta: 15 enero 2023]. Disponible en: <https://keepcoding.io/blog/que-es-el-criterio-de-informacion-akaike/>.

**LERMA, M.; & ORJUELA, E.** Modelos alométricos para la estimación de la biomasa aérea total en el páramo de Anaime, departamento del Tolima, Colombia (Trabajo de tesis) (Ingeniería) [En línea]. Universidad del Tolima, Facultad de Ingeniería, Forestal Ingeniería Forestal. Ibagué-Colombia. 2014, pp. 40-41. [Consulta: 18 enero 2023]. Disponible en: <http://repository.ut.edu.co/bitstream/001/1119/1/RIUT-GAA-spa-2014-%20Modelos%20alom%C3%A9tricos%20para%20la%20estimaci%C3%B3n%20de%20la%20biomasa%20a%C3%A9rea%20total%20en%20el%20p%C3%A1ramo%20de%20anaime%20C%20departamento%20del%20tolima%20C%20colombia..pdf>.

**LÓPEZ, J.** *Coefficiente de determinación (R cuadrado)* [En línea]. Economipedia, 2017. [Consulta: 15 enero 2023]. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/r-cuadrado-coeficiente-determinacion.html>.

**MAE.** *Bosques para el Buen Vivir - Plan de Acción REDD+ Ecuador (2016-2025)* [En línea]. Quito-Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2016, pp. 33-104. [Consulta: 07 septiembre 2022]. ISBN: 978-9942-22-079-0. Disponible en: [https://redd.unfccc.int/files/plan\\_accion\\_redd.pdf](https://redd.unfccc.int/files/plan_accion_redd.pdf).

**MAE.** *Estrategia Nacional de Cambio Climático del Ecuador 2012-2025* [En línea]. Quito-Ecuador: Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2012, pp. 10-22. [Consulta: 07 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/10/ESTRATEGIA-NACIONAL-DE-CAMBIO-CLIMATICO-DEL-ECUADOR.pdf>.

**MAG.** *Geoportal del Agro Ecuatoriano* [En línea]. Quito-Ecuador: Gobierno del Ecuador, 2023. [Consulta: 16 enero 2023]. Disponible en: <http://geoportal.agricultura.gob.ec/>.

**MAG.** *MAGAP implementa programa de incentivos para siembra de bosques con fines comerciales* [En línea]. Quito-Ecuador: Gobierno del Ecuador, 2014. [Consulta: 10 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.agricultura.gob.ec/magap-implementa-programa-de-incentivos-para-siembra-de-bosques-con-fines-comerciales/>.

**MAG.** *Mapa de plantaciones forestales incentivadas en el Ecuador* [En línea]. Quito-Ecuador: Gobierno del Ecuador, 2019. [Consulta: 10 septiembre 2022]. Disponible en: <https://fliphtml5.com/wtae/ffen/basic>.

**MARTÍNEZ, R.; et al.** “Importancia de las plantaciones forestales de *Eucalyptus*”. Ra Ximhai [En línea], 2006, (México) 2(3), pp. 815-846. [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISSN: 1665-0441. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/461/46120313.pdf>.

**MIXPANELL.** *Significancia estadística: qué es y cómo calcularla* [En línea]. Mixpanell, 2021. [Consulta: 16 enero 2023]. Disponible en: <https://mixpanel.com/es/topics/statistical-significance/>.

**MOMOLLI, D.; et al.** “Modeling and Biomass Quantification in *Eucalyptus saligna* Smith Stand at the End Rotation in the South of Brazil”. Journal of Experimental Agriculture International [Internet], 2019, (Brasil) 33(3), pp. 1-10. [Consulta: 16 febrero 2023]. ISSN: 2457-0591. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.9734/JEAI/2019/v33i330146>.

**NÄSLUND, E.; et al.** *Nuestro clima está cambiando* [En línea]. Washington D.C.-Estados Unidos: Banco Interamericano de Desarrollo, 2015, pp. 18-19. [Consulta: 05 septiembre 2022]. Disponible en: <https://nebula.wsimg.com/4fa604a69e36b73010e006e7a4e4700d?AccessKeyId=D785DAE5C529D68B6397&disposition=0&alloworigin=1>.

**NOAA.** *NOAA: El año 2022 fue el sexto año más cálido desde los comienzos de los registros en 1880* [En línea]. Maryland-Estados Unidos: Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica, 2022. [Consulta: 18 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213/supplemental/page-6>.

**OMC.** *El Comercio y el Cambio Climático* [En línea]. Ginebra-Suiza: Organización Mundial del Comercio, 2009, p. 33. [Consulta: 10 septiembre 2022]. ISBN: 978-92-870-3524-0. Disponible en: [https://www.wto.org/spanish/res\\_s/booksp\\_s/trade\\_climate\\_change\\_s.pdf](https://www.wto.org/spanish/res_s/booksp_s/trade_climate_change_s.pdf).

**ONU.** *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático* [En línea]. Nueva York-Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas, 1992, pp. 3-4. [Consulta: 18 agosto 2022]. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>.

**ONU.** *Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático* [En línea]. Nueva York-Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas, 1998, pp. 4-29. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>.

**ORACLE.** *RMSE (Error cuadrático medio)* [En línea]. ORACLE, 2020, p. 260. [Consulta: 16 enero 2023]. Disponible en: [https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs\\_common/PFUSU/insights\\_metrics\\_RMSE.htm#PFUSU-GUID-FD9381A1-81E1-4F6D-8EC4-82A6CE2A6E74](https://docs.oracle.com/cloud/help/es/pbcs_common/PFUSU/insights_metrics_RMSE.htm#PFUSU-GUID-FD9381A1-81E1-4F6D-8EC4-82A6CE2A6E74).

**PICARD, N.; et al.** *Manual for building tree volume and biomass allometric equations from field measurement to prediction* [En línea]. Roma-Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, 2013, p. 35. [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISBN: 978-92-5-107347-6. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i3058e/i3058e.pdf>.

**PNUD.** *Guía para la implementación de Programas Nacionales Voluntarios de Huella de Carbono en América Latina* [En línea]. Nueva York-Estados Unidos: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, 2022, p. 26. [Consulta: 13 septiembre 2022]. Disponible en: [https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-10/PNUD\\_Guia-Huella-de-Carbono-FINAL.pdf](https://www.undp.org/sites/g/files/zskgke326/files/2022-10/PNUD_Guia-Huella-de-Carbono-FINAL.pdf).

**PORRAS, A.; et al.** “Estudio de la productividad y biomasa arriba del suelo, mediante el uso de índices de vegetación en plantaciones de *Tectona grandis* L. (Teca) ubicadas en Guanacaste, Costa Rica”. *Tecnología en Marcha* [En línea], 2022, (Costa Rica) 35(especial), pp. 5-15. [Consulta: 13 agosto 2022]. ISSN: 0379-3962. Disponible en: [https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec\\_marcha/article/view/6229](https://revistas.tec.ac.cr/index.php/tec_marcha/article/view/6229).

**POSADA, S.; & ROSERO, R.** “Comparación de modelos matemáticos: una aplicación en la evaluación de alimentos para animales”. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* [En línea], 2007, (Colombia) 20(2), pp. 141-148. [Consulta: 25 septiembre 2022]. ISSN: 0120-0690. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=295023034006>.

**RAMOS, R.; et al.** *V Congreso internacional de la ciencia, tecnología, emprendimiento e innovación. Estimación de carbono almacenado en dos sistemas agroforestales plantados en la estación experimental Santa Catalina* [En línea]. Riobamba-Ecuador: Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, 2018, pp. 82-84. [Consulta: 25 septiembre 2022]. ISBN: 978-9942-8697-5-3. Disponible en: <https://repositorio.iniap.gob.ec/bitstream/41000/5115/1/INIAPEEPMEMORIASpdf2.pdf>.

**RODÓ, P.** *Criterio de información bayesiano* [En línea]. Economipedia, 2020. [Consulta: 15 enero 2023]. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/criterio-de-informacion-bayesiano.html>.

**SADAME, J.** *Teste de Uso Múltiple do Eucalyptus 2016* [En línea]. TUME, 2016. [Consulta: 21 septiembre 2022]. Disponible en: <https://www.projetoTume.com/saligna>.

**SEGURA, M.; & ANDRADE, H.** “¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes?”. *Agroforestería en las Américas* [En línea], 2008, (Costa Rica) 1(46), pp. 89-96. [Consulta: 13 agosto 2022]. ISSN: 1022-7482. Disponible en: [https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files\\_mf/segura2008a.pdf](https://www.worldcocoafoundation.org/wp-content/uploads/files_mf/segura2008a.pdf).

**SENELWA, K.; & SIMS, R.** “Ecuaciones de biomasa de árboles para eucaliptos de ciclo corto cultivados en Nueva Zelanda”. *Biomass and Bioenergy* [En línea], 1997, (Nueva Zelanda) 13(3), pp. 133-140. [Consulta: 27 enero 2023]. ISSN: 0961-9534. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(97\)00026-3](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(97)00026-3).

**SNOWDON, J.; et al.** “Protocolo de muestreo de biomasa arbórea y rodal”. Mancomunidad de Australiana [En línea], 2002, (Australia) 21, pp. 1-64. [Consulta: 22 septiembre 2022]. ISSN: 14426838. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/298252249\\_Protocol\\_for\\_Sampling\\_Tree\\_and\\_Stand\\_Biomass](https://www.researchgate.net/publication/298252249_Protocol_for_Sampling_Tree_and_Stand_Biomass).

**SOFTWARE DELSOL.** *Coeficiente de determinación* [En línea]. Mengíbar-España: Software DELSOL, 2020. [Consulta: 15 enero 2023]. Disponible en: <https://www.sdelsol.com/glosario/coeficiente-de-determinacion/>.

**SOLANO, D.; et al.** “Generación de modelos alométricos para determinar biomasa aérea a nivel de especies, mediante el método destructivo de baja intensidad para el estrato de bosque seco pluviestacional del Ecuador”. CEDAMAZ [En línea], 2014, (Ecuador) 4(1), pp. 32-44. [Consulta: 13 agosto 2022]. ISSN: 1390-5902. Disponible en: <https://www.google.com/search?client=opera&q=modelos+alometricos+biomas&sourceid=opera&ie=UTF-8&oe=UTF-8>.

**TEEB.** *La economía de los ecosistemas y la diversidad: incorporación de los aspectos económicos de la naturaleza. Una síntesis del enfoque, las conclusiones y las recomendaciones del estudio TEEB* [En línea]. La Valeta-Malta: PNUMA, 2010, pp. 17-18. [Consulta: 11 septiembre 2022]. ISBN: 978-3-9813410-3-4. Disponible en: [https://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study%20and%20Reports/Reports/Synthesis%20report/Synthesis%20report\\_Spanish.pdf](https://www.teebweb.org/wp-content/uploads/Study%20and%20Reports/Reports/Synthesis%20report/Synthesis%20report_Spanish.pdf).

**UNFCCC.** *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?* [En línea]. Bonn-Alemania: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, 2021. [Consulta: 15 agosto 2022]. Disponible en: [https://unfccc.int/es/kyoto\\_protocol](https://unfccc.int/es/kyoto_protocol).

**VARGAS, P.** *El cambio climático y sus efectos en el Perú* [En línea]. Lima-Perú: Banco Central de Reserva del Perú, 2009, p. 3. [Consulta: 17 agosto 2022]. Disponible en: <https://www.slideshare.net/ACTransparencia/bcr-el-cambio-climtico-y-sus-efectos-en-el-per>.

**VIERA, M.; et al.** *Silvicultura do eucalipto no Brasil* [En línea]. Santa Maria-Brasil: Universidad de Santa Maria, 2016, p. 47. [Consulta: 03 febrero 2022]. ISBN: 978-85-7391-231-9. Disponible en:

<https://books.google.com.ec/books?id=2wmuDQAAQBAJ&pg=PA92&lpg=PA93&focus=viewport&hl=es#v=onepage&q&f=false>





**epoch**

**Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 30 / 06 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> PEDRO SEGUNDO PANAMÁ PERUGACHI
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> RECURSOS NATURALES
<b>Carrera:</b> INGENIERÍA FORESTAL
<b>Título a optar:</b> INGENIERO FORESTAL
<b>f. responsable:</b> Ing. Cristhian Fernando Castillo Ruiz



0972-DBRA-UTP-2023