

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**TEMA**

**Estimación de biomasa en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de la región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas**

**AUTORA**

**Avilés Jiménez, Manuela Jesús**

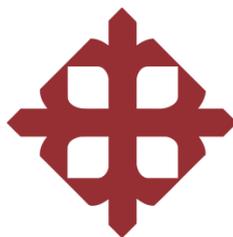
**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERA AGROPECUARIA**

**TUTOR**

**Ing. Peñalver Romeo, Alberto Ph.D.**

**Guayaquil, Ecuador**

**Marzo de 2020**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**CERTIFICACIÓN**

Certificamos que el presente Trabajo de Titulación en su totalidad fue realizado por **Avilés Jiménez Manuela Jesús**, como requerimiento para la obtención del Título de **Ingeniera Agropecuaria**.

**TUTOR**

---

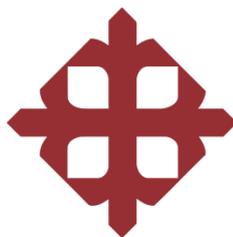
**Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph.D.**

**DIRECTOR DE CARRERA**

---

**Ing. Franco Rodríguez, John Eloy, Ph.D.**

**Guayaquil, 5 de marzo del 2020**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD**

**Yo, AVILÉS JIMÉNEZ MANUELA JESÚS**

**DECLARO QUE:**

El trabajo de Titulación: **Estimación de biomasa en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de la Región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas**, previo a la obtención del Título de **Ingeniera Agropecuaria**, ha sido desarrollado respetando derechos intelectuales de terceros conforme las citas que constan en el documento, cuyas fuentes se incorporan en las referencias o bibliografías. Consecuentemente este trabajo es de mi total autoría.

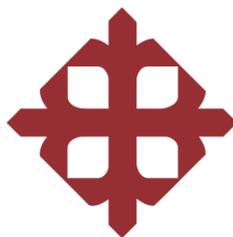
En virtud de esta declaración, me responsabilizo del contenido, veracidad y alcance del Trabajo de Titulación referido.

**Guayaquil, 5 de marzo del 2020**

**AUTORA**

---

**Avilés Jiménez, Manuela Jesús**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**AUTORIZACIÓN**

Yo, **AVILÉS JIMÉNEZ MANUELA JESÚS**

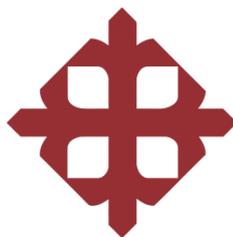
Autorizo a la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil a la publicación en la biblioteca de la institución del Trabajo de Titulación: **Estimación de biomasa en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de la Región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas**, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva responsabilidad y total autoría.

**Guayaquil, 5 de marzo del 2020**

**AUTORA**

---

**Avilés Jiménez Manuela Jesús**



# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO

## CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA

### CERTIFICACIÓN URKUND

La Dirección de las Carreras Agropecuarias revisó el Trabajo de Titulación: **Estimación de biomasa en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de la Región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas**, presentado por la estudiante **Avilés Jiménez, Manuela Jesús**, de la carrera de Ingeniería Agropecuaria, donde se obtuvo del programa URKUND, el valor de 0 % de coincidencias, considerando ser aprobada por esta dirección.

URKUND	
Documento	<a href="#">AVILES JIMENEZ, M.UTE.B.2020.TT.docx</a> (D63749530)
Presentado	2020-02-11 09:06 (-05:00)
Presentado por	ute.fetd@gmail.com
Recibido	noelia.caicedo.ucsg@analysis.orkund.com
	0% de estas 31 páginas, se componen de texto presente en 0 fuentes.

**Fuente:** URKUND-Usuario Caicedo Coello, 2020

Certifican,

---

**Ing. John Franco Rodríguez, Ph. D.**  
Director Carreras Agropecuarias  
UCSG-FETD

---

**Ing. Noelia Caicedo Coello, M. Sc.**  
Revisora - URKUND

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios, por ser la fuerza y consuelo en los momentos complicados y ser la luz de salida a mis problemas.

Al hombre de mi vida y compañero ideal, Anthony Morán, por el amor durante estos años de formación y por la ayuda brindada en la realización de esta investigación, por acompañarme en cada decisión y por ser el apoyo que siempre necesite.

A mis padres, Silvia y Luis, quienes han dado su vida y sacrificado todo por verme lograr mis objetivos y ser una profesional, por su inmenso cariño brindado y por su fe depositada en mí.

A la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo, por darme la experiencia de culminar mi carrera.

Al Ing. Alberto, Peñalver Romeo Ph.D., Tutor de Trabajo de Titulación, por su apoyo y orientación.

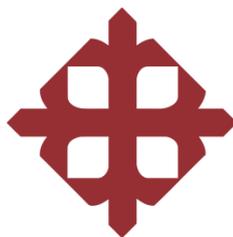
## **DEDICATORIA**

A Dios, por ser mi motor y consuelo en todo momento.

A mis padres, por su amor incondicional y apoyo brindado en cada momento.

A mi novio, que por todo su esfuerzo y cariño merece vivir cada logro alcanzado junto a mí.

A mi hermano, por su apoyo y consejos durante este proceso de formación.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph.D.**  
TUTOR

---

**Ing. Franco Rodríguez, John Eloy, Ph.D.**  
DIRECTOR DE CARRERA

---

**Ing. Noelia Carolina Caicedo Coello, M. Sc.**  
COORDINADORA UTE



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL**

**FACULTAD DE EDUCACIÓN TÉCNICA PARA EL DESARROLLO**

**CARRERA DE INGENIERÍA AGROPECUARIA**

**CALIFICACIÓN**

---

**Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph.D.**  
TUTOR

## ÍNDICE GENERAL

<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
1.1 Objetivos.....	3
1.1.1 Objetivo general. ....	3
1.1.2 Objetivos específicos.....	4
1.2 Hipótesis de investigación .....	4
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>5</b>
2.1 Teca en el Ecuador.....	5
2.2 Morfología del árbol de teca .....	5
2.3 Biomasa forestal .....	6
2.3.1 Contenido de carbono en biomasa.....	7
2.3.2 Distribución porcentual de la biomasa .....	22
2.3.3 Métodos de estimación de biomasa en árboles. ....	9
2.4 Mediciones forestales .....	10
2.5 Cubicación de arboles .....	11
2.6 Factor mórfico.....	12
2.7 Compatibilidad de ecuaciones de perfil de fuste .....	13
2.8 Ecuaciones de construcción del perfil de fuste .....	13
2.8 Ecuaciones de volumen.....	15
2.9 Densidad de maderas.....	18
2.10 Determinación de densidad de madera .....	18
2.11.1 Secado en laboratorio. ....	19
2.11.2 Secado natural. ....	20
2.12 Alometría .....	20
2.12.1 Modelos alométricos.....	20
2.12.2 Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa. ....	21
2.13 Factor de expansión .....	23
2.14 Tecnología de detección remota aplicada en la dendrometría .....	23
2.14.1 Sensores remotos. ....	24
2.14.2 Plataformas. ....	26
2.15 Sistemas de información geográfica.....	27
2.16 Extracción de métricas mediante sensores LIDAR.....	28
<b>3 MARCO METODOLÓGICO</b> .....	<b>30</b>
3.1 Ubicación geográfica .....	30
3.1.1 Características edafoclimáticas.....	30

3.2 Materiales y equipos.....	31
3.2.1 Materiales.....	31
3.2.2 Equipos. ....	31
3.3 Diseño de la investigación.....	31
3.4 Población y muestra de estudio.....	32
3.5 Variables de estudio.....	33
3.6 Estimación de biomasa aérea.....	34
3.7 Metodología para el cálculo de volumen fustal.....	34
3.7.1 Datos para el análisis estadístico.....	34
3.7.2 Agrupación de datos.....	35
3.7.3 Métodos de regresión.....	35
3.7.4 Variables. ....	35
3.7.3 Estadísticos para la selección de modelos.....	36
3.7.4 Modelo compatible de volumen.....	37
3.7.5 Desviación global. ....	37
3.8 Metodología para la determinación de densidad.....	38
3.9 Metodología para la estimación de biomasa por componentes.....	40
3.10 Conteo de ramas.....	40
3.12 Determinación de peso seco de hojas.....	41
3.13 Estimación de biomasa total por árbol.....	41
<b>4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>42</b>
4.1 Ecuaciones de perfil de fuste.....	42
4.2 Ecuación de volumen compatible.....	45
4.3 Desviación global.....	46
4.4 Densidad específica de madera.....	47
4.5 Estimación de biomasa aérea.....	50
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
5.1 Conclusiones.....	67
5.2 Recomendaciones.....	67
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Resumen de métodos de estimación de biomasa.....	10
<b>Tabla 2.</b> Modelos de conicidad.....	14
<b>Tabla 3.</b> Modelos matemáticos de volumen fustal.....	15
<b>Tabla 4.</b> Modelos ajustados de perfil de fuste.....	16
<b>Tabla 5.</b> Ecuaciones de volumen.....	17
<b>Tabla 6.</b> Modelos alométricos de estimación de biomasa.....	20
<b>Tabla 7.</b> Operacionalización de variables.....	24
<b>Tabla 8.</b> Modelos de ecuación de perfil de fuste.....	33
<b>Tabla 9.</b> Indicadores estadísticos de los modelos de perfil de fuste.....	33
<b>Tabla 10.</b> Coeficientes de regresión de modelos de perfil de fuste.....	34
<b>Tabla 11.</b> Modelos genéricos.....	34
<b>Tabla 12.</b> Indicadores estadísticos de modelos genéricos.....	35
<b>Tabla 13.</b> Coeficientes de regresión de modelos genéricos.....	35
<b>Tabla 14.</b> Desviación global de valores estimados.....	36
<b>Tabla 15.</b> Densidad de madera de muestras de fuste a 1.10 m.....	37
<b>Tabla 16.</b> Densidad de madera de muestras de fuste a 1.30 m.....	37
<b>Tabla 17.</b> Densidad de madera de muestras de fuste a 1.50 m.....	37
<b>Tabla 18.</b> Densidad de madera de muestras de ramas finas.....	38
<b>Tabla 19.</b> Densidad de madera de muestras de ramas intermedias.....	38
<b>Tabla 20.</b> Densidad de madera de muestras de ramas gruesas.....	39
<b>Tabla 21.</b> Distribución porcentual de biomasa área por componente.....	39
<b>Tabla 22.</b> Estadísticos de biomasa aérea.....	40

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1.</b> Biomasa forestal.....	7
<b>Gráfico 2.</b> Distribución de biomasa.....	9
<b>Gráfico 3.</b> Protocolo de toma de muestras de campo.....	10
<b>Gráfico 4.</b> Cubicación de árboles.....	13
<b>Gráfico 5.</b> Sistemas de teledetección.....	29
<b>Gráfico 6.</b> Plataforma de teledetección.....	32
<b>Gráfico 7.</b> Predio Morondava.....	35
<b>Gráfico 8.</b> Protocolo de extracción de muestras de copa.....	42
<b>Gráfico 9.</b> Protocolo de estimación de biomasa de ramas.....	44
<b>Gráfico 10.</b> Árbol visualizado en Cloud Compare.....	45

## RESUMEN

La situación ambiental del planeta, es una de las problemáticas más alarmantes en el panorama actual por las consecuencias del cambio climático. Por lo anteriormente expuesto en esta investigación se cuantifico la biomasa presente en plantaciones de teca utilizando ecuaciones alométricas y tecnología de teledetección como el escáner láser terrestre. El uso de métodos no destructivos evito el derribo de árboles y la destrucción parcial del medio forestal. Esta investigación es de tipo exploratoria de carácter no experimental, posee un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo y correlacional. Para la estimación de biomasa se construyó modelos alométricos para el cálculo de volumen por medio del análisis de regresión no lineal, a su vez la densidad se obtuvo por el secado natural de muestras de fuste y rama extraídas en campo. Para las muestras de fuste se hizo uso del barrenado de Pressler. Como resultados de investigación se determinó un valor de densidad específica de madera de teca local de  $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  para una plantación de tres años y una distribución de biomasa área con un 67 % de acumulación en fuste, 24 % en ramas y 8 % en hojas. Se recomienda en futuras investigación realizar estudios de densidad y estimación de biomasa en teca para analizar variaciones.

**Palabras clave:** Alometría, ecuaciones, biomasa, fuste, teca

## ABSTRACT

The environmental situation of the planet is one of the most alarming problems in the current scenario due to the consequences of climate change. Based on the foregoing in this investigation, the biomass present in teak plantations was quantified using allometric equations and remote sensing technology such as the terrestrial laser scanner. The use of non-destructive methods prevented the demolition of trees and the partial destruction of the forest environment. This research is an exploratory type of a non-experimental nature, has a quantitative approach and a descriptive and correlational scope. For the biomass estimation, allometric models were constructed for the calculation of volume by means of the non-linear regression analysis, in turn the density was obtained by the natural drying of stem and branch samples extracted in the field. For the samples of the shaft, pressler bore was used. As research results a specific density value of local teak wood of  $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  was determined for a three-year plantation and a biomass distribution area with a 67 % spindle accumulation, 24 % on branches and 8 % in sheets. It is recommended in future research to conduct density studies and estimation of biomass in teak to analyze variations.

**Key words:** Allometric, biomass, equations, steam, teak

## 1 INTRODUCCIÓN

La situación ambiental del planeta, es una de las problemáticas más alarmantes en el panorama actual, las consecuencias del cambio climático por un acelerado aumento de las emisiones de dióxido de carbono y gases de efecto invernadero proveniente de industrias, vehículos y producciones animales, son cada vez más evidentes, lo cual se refleja en: migración y disminución de poblaciones animales, derretimiento de casquetes polares, cambios bruscos de temperatura, reducción de la capa de ozono y aumento en la incidencia de cáncer de piel en la población por la exposición directa a rayos ultravioleta entre otros efectos.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (1995) planteo diversos mecanismos de mitigación a las emisiones de carbono para frenar el daño ambiental existente, uno de los resultados de las diversas reuniones fue el acuerdo de KYOTO, el cual consistió en proponer estrategias a nivel internacional para disminuir el daño ambiental. Pagiola, Bishop y Landell (2003) describen que uno de los mecanismos de mitigación del cambio climático, es el aporte de los recursos forestales, por su capacidad de fijación de dióxido de carbono, generándose en el acuerdo de Kyoto, el pago de servicios ambientales a las naciones que contaminen menos y posean ecosistemas forestales para captura y secuestro de carbono. La cantidad de carbono fijada por un árbol, está presente en los diferentes componentes de su biomasa forestal.

La biomasa forestal, es igual al peso seco contenido en los diferentes componentes de las unidades arbóreas: raíz, fuste y copa, en general, se definen dos tipos de biomasa para actividades de evaluación: biomasa área y biomasa subterránea, la mayoría de ensayos realizados, excluyen la biomasa subterránea por el nivel de complejidad en los procedimientos extractivos de las raíces.

La cuantificación de biomasa forestal en el Ecuador, se ha venido realizando en diversas investigaciones, sin embargo, en base al interés actual de preservar el medio ambiente y mitigar el efecto del calentamiento global, la evaluación de biomasa y carbono almacenado en plantaciones, se plantea como una actividad enfocada en el desarrollo sustentable, dentro del marco de servicios ambientales existentes en el país.

La estimación de biomasa forestal se puede realizar utilizando métodos directos o indirectos. Los métodos directos recurren a procedimientos destructivos que incluyen el derribo de árboles para la segmentación en partes y toma de muestras, a diferencia de los métodos indirectos o no destructivos que omiten el derribo de árboles y se basan en modelos matemáticos como las ecuaciones alométricas representando ventajas económicas y de trabajo físico para quien ejecute la investigación. La aplicación de tecnología de teledetección en los métodos indirectos, permite obtener variables dendrométricas predictoras para estimaciones de biomasa.

La teca en el Ecuador, es una especie maderable introducida y adaptada a los ecosistemas de la región Costa del país, de forma general, el establecimiento de plantaciones de teca tiene fines comerciales, en sistemas agroforestales y silvopastoriles, la teca es utilizada en tecnologías forestales como cercas vivas y cortinas rompe vientos.

Por lo expuesto en el trabajo de investigación se plantea los siguientes objetivos:

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo general.**

Elaborar modelos alométricos de estimación de la biomasa aérea de las plantaciones de teca.

### **1.1.2 Objetivos específicos.**

- Elaborar modelos alométricos de estimación de volumen a partir de las métricas de los árboles medidos mediante TLS.
- Determinar la densidad específica de madera de la plantación de teca.
- Estimar la biomasa aérea a partir del volumen y densidad específica de madera de la plantación.

### **1.2 Hipótesis de investigación**

- La estimación de biomasa aérea a partir del volumen de fuste y copa junto con la densidad específica de madera se puede realizar empleando métodos no destructivos como las ecuaciones alométricas y tecnología de teledetección.
- La estimación de biomasa aérea a partir del volumen de fuste y copa junto con la densidad específica de madera no se puede realizar empleando métodos no destructivos como las ecuaciones alométricas y tecnología de teledetección.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Teca en el Ecuador

En el Ecuador, la teca es una especie introducida en los ecosistemas del bosque tropical seco de la región Litoral o Costa, caracterizada por ser un árbol frondoso y poseer una madera que es considerada una de las más apreciadas del mundo por su consistencia y durabilidad, Martínez y Juárez (2019) señalan que dichas características mejoran con el paso de los años y que su utilización en la fabricación de muebles y finos acabados se debe a que esta madera no presenta daños al contacto con metales.

La teca como especie forestal maderable dentro del territorio ecuatoriano es establecida con fines exclusivos de exportación, debido a que el consumo interno dentro del país de dicha madera es casi nulo o inexistente. El mercado de exportación por excelencia de la teca ecuatoriana ha sido el mercado asiático, tanto así que el porcentaje en exportaciones a India representa el 95 % total de teca en el país según el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG, 2015). De acuerdo a estadísticas de la Asociación Ecuatoriana de Productores y Comercializadores de Teca y Maderas Tropicales (ASOTECA, 2017), dentro del territorio Litoral existen aproximadamente 55 000 hectáreas de la especie, concentradas en las provincias del Guayas, Manabí, Los Ríos y Esmeraldas.

### 2.2 Morfología del árbol de teca

Gayoso (2016) menciona que *Tectona grandis* es un árbol que puede alcanzar aproximadamente entre 30 y 35 m de altura, destacando la rectitud de su fuste y la presencia de contrafuertes que le proporcionan un aspecto estriado.

La teca posee un fuste recto con una dominancia apical sobresaliente, esta característica se va perdiendo con la madurez de árbol y etapa de

floración, generándose una copa extensa con ramas que poseen una longitud promedio de 2 m según Fonseca (2004).

Este árbol maderable presenta una raíz pivotante y gruesa que sufre variaciones durante su crecimiento, sin embargo, posee gran cantidad de raíces laterales con alta sensibilidad a los bajos niveles de oxígeno, su óptimo desarrollo se da en suelos bien drenados.

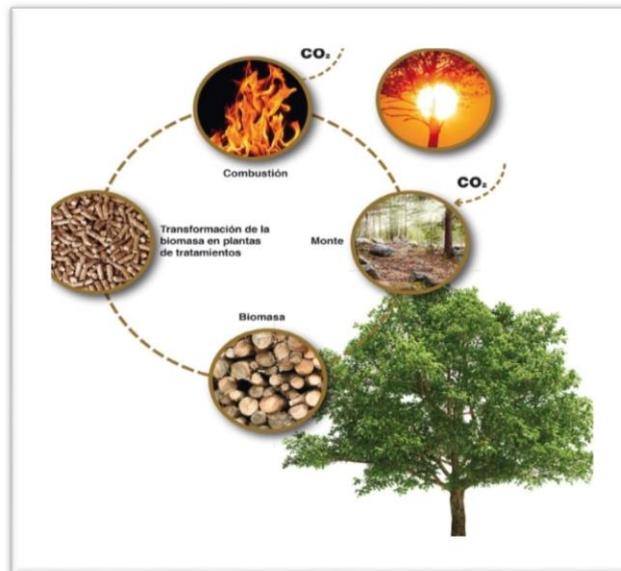
Las flores de teca son monoicas, y se disponen en panículas erectas que alcanzan hasta 60 cm de largo. El cáliz de las hojas tiene forma de campana y contiene seis lóbulos. Las hojas se presentan en las ramas de forma opuesta y alterna, tienen un largo aproximado de 65 cm y 50 cm de ancho, sus peciolo son gruesos.

### **2.3 Biomasa forestal**

Schlegel, Gayoso y Guerra (2000) definen a la biomasa forestal como el peso seco o anhidro de la materia orgánica contenida en un ecosistema específico, clasificándose en aérea y subterránea. Tolosana y Laina (2009) expresan que la biomasa forestal puede ser cuantificada en toneladas o kilogramos de peso seco por árbol y por hectárea.

Desde el punto de vista energético y renovable, Vidal, Benítez, Carlos, y Gra (2004) establecen que la biomasa forestal es una opción viable para la generación de combustibles limpios en forma líquida o gaseosa, razón por la cual, su cuantificación por segmentos separados: fuste, copa y raíz, es de gran interés científico.

**Gráfico 1. Biomasa Forestal**



**Fuente:** Schlegel, Gayoso y Guerra, 2000.

### **2.3.1 Contenido de carbono en biomasa.**

Kollman (1959) , quien determinó que el contenido de carbono de forma mayoritaria en la biomasa forestal se encuentra en un rango de 45 % y 50 %, siendo así que a partir de lo expresado por Kollman (1959), la mayoría de autores en sus investigaciones posteriores registraban valores que afirmaban que el carbono presente en la biomasa corresponde al 50 % del valor total.

Según Gayoso y Guerra (2005), el contenido de carbono en la biomasa corresponde al 50 % del total de la misma, sin embargo, destacan la presencia de variaciones que se pueden reflejar a causa de la edad, especie y tejido del árbol. Otros trabajos de investigación muestran pequeñas variaciones en valores de carbono utilizados: 0.45 en trabajos de Zamora (2003) y Fragoso (2003) y 0.55 en lo registrado por Herrera y Lucatero (2003).

Por el contrario, Cubero y Rojas (1999), en sus resultados, registran que la calidad del sitio forestal determina en gran parte la cantidad de carbono

en la biomasa, quienes destacan que en especies como *Tectona grandis* y *Gmelina arborea*, los valores fluctúan entre 32 y 40 %.

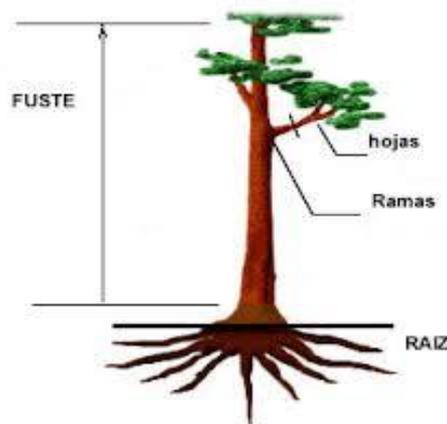
### 2.3.2 Distribución porcentual de la biomasa forestal.

Pérez y Kanninen (2002), mencionan los siguientes porcentajes de distribución de biomasa en un árbol de teca: 70 % a 90 % en el fuste, de 5 % a 30 % en ramas y del 1 % al 6 % en hojas.

Jiménez y Landeta (2009), concluyen en su investigación en plantaciones de teca de ocho años, una acumulación de biomasa en fuste del 85 %, mientras que en copa un 15 %. Lara (2011) para la estimación de biomasa aérea total, asume que, en el fuste del árbol de teca, la biomasa asciende al 80 %, dejando un 20 % para la copa.

Por otra parte, López, Vaidés y Alvarado (2018), afirman que en plantaciones menores a cinco años los porcentajes de biomasa en fuste varían entre el 65 % y 70 %. Marroquín (2019) asevera que luego de cumplir los 10 años de edad de la teca, los porcentajes de biomasa de fuste ascienden al 90 %, quedando un 10 % para la copa.

**Gráfico 2.** Distribución de biomasa



**Fuente:** Rivera, 2015.

### 2.3.3 Métodos de estimación de biomasa en árboles.

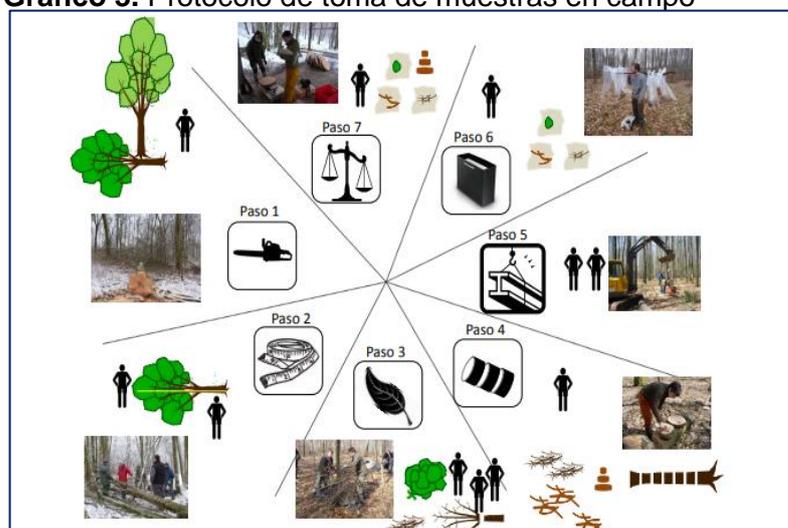
Carrillo et al. (2016), señala que la estimación de biomasa forestal puede efectuarse utilizando métodos directos e indirectos, en los directos se requiere el derribo del árbol, por el contrario, en los métodos indirectos se construyen ecuaciones matemáticas a partir de variables dendrométricas, que permiten realizar estimaciones.

#### 2.3.3.1 Método directo.

Picard, Saint-Andre y Matieu (2012), indican que la obtención de muestras para el cálculo directo de biomasa aérea se hace uso del siguiente protocolo, que también se ilustra en el Gráfico 3.

- Derribo y separación del árbol por partes: fuste y copa.
- Segmentación del fuste en trozas.
- Pesaje de trozas y toma de muestras.
- Separación de componentes de copa: ramas y hojas.
- Recolección y enfundado de muestras de follaje.
- Extracción de una rama representativa de las diferentes clases diamétricas existentes: finas, intermedias y gruesas.

**Gráfico 3.** Protocolo de toma de muestras en campo



**Fuente:** Picard, Saint y Henry, 2012

### 2.3.3.2 Métodos indirectos.

Según Montero y Montagnini (2019), se requiere la construcción de ecuaciones alométricas utilizando métodos estadísticos, la determinación de las variables dendrométricas puede ser realizada a partir de tecnología de teledetección. En la Tabla 1 se resume lo expresado por Lu (2005) sobre las metodologías para determinar biomasa.

**Tabla 1.** Resumen de métodos de determinación de biomasa.

Método	Descripción
<b>Mediciones en campo</b>	Se realizan en base a métodos destructivos para los cálculos correspondientes y construcción de modelos alométricos.
<b>Sensores remotos</b>	Utiliza la captación y generación de ondas electromagnéticas, ya sean de sensores pasivos o activos.

**Fuente:** Lu, 2005.

## 2.4 Mediciones forestales

Ugalde (1991), conceptualiza a la dasometría como la disciplina científica que parte de la dasonomía y se encarga de las medición y estimación del crecimiento y producción de un medio forestal, mientras que la dendrometría se centra en las métricas de cada árbol de forma individual, considerando las características propias del objeto. Aranda (2003) clasifica las mediciones forestales en dos grupos principales de variables:

- Dasométricas: área basal, volumen comercial, espesura de copa, alturas comerciales.
- Dendrométricas: diámetro a la altura de pecho (DAP), altura total y ancho y longitud de copa.

## 2.5 Cubicación de arboles

Martínez y Juárez (2019), establecen que la cubicación de árboles es una técnica usada para la determinación del volumen fustal, según Escobar (2018), el volumen del tallo de un árbol es definido como una medida escalar que expresa el espacio que ocupa el fuste de forma tridimensional: largo, ancho y alto.

La fundamentación matemática del cálculo de volumen de árboles es parte del estudio de la Dasometría y se basa en la similitud de los fustes con figuras geométricas como conos y cilindros al igual que los sólidos en revolución que derivan de métodos que han sido compilados en su mayoría por Loetsch, Zohrer y Haller (1973), Caillez (1980); Parde y Bouchon (1994); Anuchin (1970) y Aldana (2008).

Para la cubicación de árboles en pie, se utilizan fórmulas matemáticas, para lo cual se realizan mediciones en campo: altura total, altura comercial y diámetro a la altura de pecho según Gonzáles (2018), el cual destaca la cubicación utilizando el factor de forma:

$$V = (Dap \times Dap) \times \frac{\pi}{4} \times Hc \times Fm$$

Dónde:

V : volumen en m<sup>3</sup>

Dap: diámetro a la altura del pecho

Hc: altura comercial

Fm: factor mórfico (varía dependiendo de la especie)

Rivas (2012) para el cálculo de volumen de madera cortada en trozas, utiliza la fórmula Smalian:

$$V = \frac{\pi}{4} * \left( \frac{Dm^2 + dm^2}{2} \right) * L$$

Dónde:

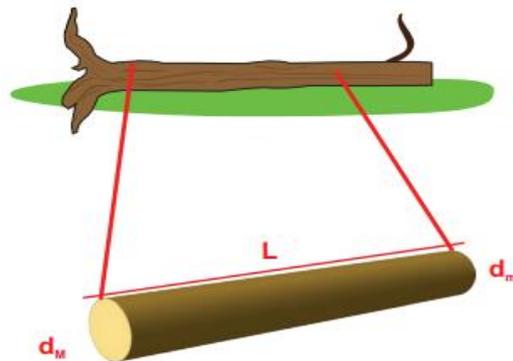
V: volumen en m<sup>3</sup>

Dm: diámetro superior en m

dm : diámetro inferior en m

L: longitud del rollo de madera.

**Gráfico 4.** Cubicación de madera



**Fuente:** Rivas, 2012.

## 2.6 Factor mórico

Espinoza et al. (2016), definen al factor mórico o factor de forma como el cociente entre el volumen del fuste y el volumen de un modelo referencial y se identifica con la letra *f*, presenta variaciones de acuerdo a las condiciones y edad del árbol, por disposiciones forestales en Ecuador el factor de forma utilizado es de 0.7 según el Ministerio del Ambiente del Ecuador (MAE, 2014).

Rivas (2012), define que el factor de forma de cada árbol, varía en dependencia de la forma del fuste:

- Cilíndricos:  $\geq 0.75$
- Paraboloides: 0.4 – 0.74
- Cónicos: 0.27- 0.39
- Neloides: factor mórfico  $< 0.38$

## **2.7 Compatibilidad de ecuaciones de perfil de fuste**

Kozak (2004), señala que una ecuación de perfil de fuste, es compatible, cuando, el volumen calculado mediante la integración de la ecuación desde el suelo hasta la parte superior del árbol debería ser igual al calculado por una ecuación de volumen total.

El enfoque más común en el desarrollo de sistemas de volumen compatibles ha sido expresar el coeficiente ( $\beta$ ) de la ecuación de variable combinada de expresa por Spurr (1952) mediante el uso de una relación de compatibilidad. Esto asegura que la función de reducción y la ecuación de volumen sean analíticamente consistentes según Sharma y Oderwald (2001).

Ejemplos de este enfoque son los sistemas derivados por Demaerschalk (1972), Martin (1981) y Byrne y Reed (1986). Diéguez et al., (2006), indica que otra alternativa ha sido desarrollar un sistema de volumen compatible que garantice la compatibilidad entre la función cónica y una ecuación de volumen total existente al incluir la última en la primera e imponer la condición en los parámetros para que la integración de la ecuación cónica de cero a la altura total proporciona el volumen total del árbol. Ejemplos de este enfoque son los sistemas de Goulding y Murray (1976), Fang y Bailey (1999) y Fang et al., (2000).

## **2.8 Ecuaciones de construcción del perfil de fuste**

Caillez (1980), describe que la obtención del volumen fustal a partir de clases diamétricas a diferentes alturas se obtiene por medio de la construcción de una ecuación de perfil de fuste expresada en forma de polinomio, para la

obtención del modelo del mejor ajuste es necesario la estandarización de variables, calculando la relación entre diámetro y altura, junto con la existente, entre la altura total y la altura puntual o referencial, validado el modelo, la función se integra para el cálculo de volumen.

Lara (2011), compara y valida modelos de ecuaciones de conicidad no segmentada de diferentes autores: Ormerod (1973), Borges (1981), González (1988), Kozak (1988) y Figueiredo et al., (1996), denominado polinomial y Forslund (1990). Caillez (1980) establece que las funciones polinomiales caracterizan de forma más completa el perfil del fuste de un árbol, haciendo incompatibles las funciones lineales y cúbicas. En la Tabla 2 se muestran los modelos utilizados por Lara (2011).

**Tabla 2.** Modelos de perfil

Modelo	Ecuación
Ormerod	$d_i = D \left[ \frac{H - h_i}{H - 1.3} \right]^{b_0}$
Polinomial	$d_i = D \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{h_i}{H} \right) + b_2 \left( \frac{h_i}{H} \right)^2 + b_3 \left( \frac{h_i}{H} \right)^3 + b_4 \left( \frac{h_i}{H} \right)^4 + b_5 \left( \frac{h_i}{H} \right)^5 \right]$
Kozak	$d = b_0 D^{b_1} b_0^D X^C$
Forslund	$d_i = D \left[ \left( 1 - \frac{h_i}{H} \right)^{b_0} \right]^{b_1}$

**Nota:** D: diámetro a la altura de pecho; H: altura total; hi: altura a un diámetro determinado; b0, b1: coeficientes de regresión.

**Fuente:** Lara, 2011.

Rondón, Barrero y Lores (2015), prueban cinco modelos ajustados para estimación de perfil de fuste en pino, utilizando el paquete estadístico SPSS y registran en sus resultados que el modelo cúbico representa el mejor ajuste:

$$\frac{d_{cc}}{d_{1,30}} = 0.103 + 1.637 \left( \frac{h_i - h_i}{h_i - 1,30} \right) + (-0.161) \left( \frac{h_i - h_i}{h_i - 1,30} \right)^2$$

Dónde:

$d_{cc}$ : diámetro a cada medición

$h_i$  : altura a cada medición

## 2.8 Ecuaciones de volumen

Pérez y Kanninen (2007), sugieren cuatro modelos para la estimación de volumen en teca con corteza y sin corteza, utilizando la altura total y el diámetro a la altura de pecho como variables predictoras. Estos modelos se presentan en la Tabla 5.

**Tabla 3.** Ecuaciones de volumen.

Modelo	Coefficiente ajustado	Número de arboles
$v_{cc} = (-0,884 + 0.0297 * dap)^2$	0.98	313
$v_{sc} = (-0.0878 + 0.0269 * dap)^2$	0.96	313
$v_{cc} = 0.000073 * dap^{1.5888} * h^{1.2103}$	0.99	313
$v_{sc} = 0.000038 * dap^{1.5633} * h^{1.3475}$	0.99	313

**Nota:** Vcc: volumen total con corteza; vsc: volumen total sin corteza; dap: diámetro a la altura del pecho; h: altura total.

**Fuente:** Pérez y Kanninen, 2007.

Diéguez et al. (2006), especifican que toda ecuación de perfil para estimación de volumen fustal, debe integrarse y transformarse en una ecuación compatible de volumen, mencionado que la establecida por Kozak et al., (1969) es la más utilizada por combinar altura y diámetro:

$$V = \beta D^2H$$

Otros autores como Fag y Bailey (1999), establecieron modificaciones de la ecuación de volumen a partir de la generada por Kozak (1969):

$$V = a_0 D^{a_1} H^{a_2}$$

En investigaciones realizadas por Telles et al. (2017), en teca, se utilizaron cinco modelos de estimación de volumen de fuste. La Tabla 3 enlista los modelos matemáticos evaluados:

**Tabla 4.** Modelos matemáticos de volumen fustal

Modelo	Ecuación
M1	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^{\beta_2} \cdot H^{\beta_3} + \epsilon$
M2	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_2 \cdot H + \beta_3 \cdot d^2 \cdot H$
M3	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d + \beta_2 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d \cdot H + \epsilon$
M4	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 \cdot H + \beta_2 \cdot d^2 + \epsilon$
M5	$V = \beta_0 + \beta_1 \cdot d^2 + \beta_3 \cdot d^2 \cdot H + \beta_4 \cdot H^2 + \beta_5 \cdot d \cdot H^2$

**Nota:** d: diámetro a la altura de 1.3 m, H: altura total en m, V: volumen del fuste,  $\beta_i$ : parámetros a ser estimados y  $\epsilon$ : error aleatorio del modelo.

**Fuente:** Telles et al., 2017.

Kess, Gómez, Vega y Muttoni (2014), plantean cinco modelos de ecuaciones para cálculo de volumen en teca, por análisis de regresión en el software estadístico Infostat, expuestas en la Tabla 4.

**Tabla 5.** Modelos de volumen

Modelo	Ecuación
M1: Potencial	$\ln \text{Vol} = B_0 + B_1 * \ln \text{dn} + B_2 * \ln \text{hf}$
M2: Lineal	$\text{Vol} = B_0 + B_1 * \text{dn} + B_2 * \text{hf}$
M3: Lineal con variable	$\text{Vol} = B_0 + B_1 * ((\text{dn}^2) * \text{hf}/100)$
M4: Polinómica	$\text{Vol} = B_0 + B_1 * (\text{dn}^2) + B_2 * \text{hf}$
M5: Potencial linealizado	$\ln \text{Vol} = B_0 + B_1 * \ln (\text{dn} * \text{hf})$

**Nota:** Vol = volumen del dn = diámetro a la altura del pecho (cm), hf = altura de fuste (m<sup>3</sup>).

**Fuente:** Kess et al. 2014.

La selección de modelos de perfil de fuste generados por regresión lineal y no lineal se realiza considerando el valor de cada estadístico según lo descrito a continuación por Álvarez (2016).

- R<sup>2</sup>: Es la proporción de la variación total en la variable dependiente (Y), que es explicada por el modelo de regresión estimado, es decir, mide la capacidad explicativa del modelo estimado.
- I.F: Se utiliza para comparar modelos con y sin transformación de variables, mientras más bajo sea su valor mejor es el modelo.
- BIC: En estadística, el criterio de información bayesiano (BIC) o el más general criterio de Schwarz es un criterio para la selección de modelos entre un conjunto finito de modelos. Se basa, en parte, de la función de probabilidad y que está estrechamente relacionado con el Criterio de Información de Akaike (AIC)
- AIC: Es una medida de la calidad relativa de un modelo estadístico, para un conjunto dado de datos. Como tal, el AIC

proporciona un medio para la selección del modelo, mientras más bajo sea su valor mejor es el modelo.

- E.C.M: Es un estimador mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima,
- Sigma: Sigma ( $\sigma$ ) es una letra del alfabeto griego, se usa generalmente para representar la desviación estándar (unidad estadística de medición), representa la variabilidad o dispersión de un conjunto de datos

## **2.9 Densidad de maderas**

La densidad se conceptualiza como la relación existente entre la masa de un elemento y su volumen, según Cuellar et al. (2018), la densidad específica de madera, fluctúa entre los  $400 \text{ kg/m}^3$  y  $550 \text{ kg/m}^3$  con un aproximado de 13 % de humedad definiendo estos rangos como densidad anhidra, mientras que Alarcón et al. (2019), describe que en árboles como la teca, la densidad varía entre  $0.65 \text{ g/m}^3$  y  $0.750 \text{ g/m}^3$ , cuando el porcentaje de humedad asciende a 25 %, aseveración afirmada por Telles et al. (2017), quien plantea en su trabajo de investigación de características físicas de madera, un valor de  $0.60 \text{ g/m}^3$  para muestras frescas de madera de teca. En muestras de madera seca de teca con una humedad inferior al 12 % se registran valores entre  $500 \text{ kg/m}^3$  y  $550 \text{ kg/m}^3$  con base a lo determinado por Roque (2002).

## **2.10 Determinación de densidad de madera**

Giraldo, Nieto, Sarmiento y Borraho (2014), señalan que la determinación de densidad específica de madera se basa en la relación del peso seco de muestras y su volumen, para la obtención de muestras mencionan los métodos directos e indirectos: en los directos se recurre al derribo de árboles, mientras que en los indirectos se usan herramientas como

el barreno de Pressler para la extracción de tarugos de madera sin afectar el crecimiento y estado del árbol.

Existen diversos métodos para el cálculo de densidad de madera de árboles, Barrias, Sandoval y Rojas (2017), plantean que los métodos más utilizados son dos: el secado en laboratorio y el secado natural.

### **2.11.1 Secado en laboratorio.**

Cuellar et al. (2018) describen los siguientes instrumentos utilizados en su investigación para la estimación indirecta de densidad:

- Pylodin: Instrumento diseñado para generar un disparo y penetración en el tallo de un árbol
- Barreno de Pressler: Instrumento hueco con un cilindro en su interior diseñado para la extracción de tacos en ensayos de determinación de edad de árboles a partir del conteo de número de anillos.

Cuellar et al. (2018), señalan, que las medidas de diámetro y longitud de la broca del instrumento a penetrar, determinan el volumen de muestra a obtener. Alarcón et al. (2018), en la metodología de su ensayo de determinación de densidad de madera tres especies del género *Eucalyptus*, asevera lo descrito por Cuellar et al. (2018) y expresa que por medio del barreno de Pressler obtuvo muestras cilíndricas, posterior a este procedimiento, sugieren secar las muestras obtenidas a una temperatura de 104 °C durante 24 horas hasta obtener un peso constante y determinar la densidad concorde a la fórmula:

$$g = \frac{Ps}{V}$$

Dónde:

g: densidad

Ps: peso seco

V: volumen de muestra

Telles et al, (2017), sugieren que para la determinación de volumen se haga uso del método de Arquímedes que consiste en tomar el volumen de agua contenido de un recipiente graduado con el método de observación perpendicular, para luego introducir la muestra de madera y registrar el volumen por el desplazamiento de agua, la diferencia de ambos volúmenes medidos, se define como el volumen correspondiente a la muestra.

#### **2.11.2 Secado natural.**

Vite (2015), plantea que este método consiste en la exposición de muestras de madera a la radiación solar, durante un lapso no mayor a siete días hasta alcanzar un valor de peso constante. Telles et al, (2017), destaca el uso de este método en maderas como la teca y melina, considerando que las muestras mayores a 2 kg deberían ser secadas en una estufa de laboratorio.

#### **2.12 Alometría**

Mireles, Hernández, Martínez y Barra (2002), señalan que la alometría dentro del campo forestal, hace referencia a los cambios y variaciones diferenciales en el crecimiento de una especie arbórea por componentes correlacionados con el crecimiento del individuo en su totalidad.

##### **2.12.1 Modelos alométricos.**

Segura, Hernán y Andrade (2008), plantean que los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas basadas en variables dendrométricas que permiten realizar estimaciones de carbono y biomasa de sistemas forestales y agroforestales de forma indirecta.

### 2.12.2 Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa.

Chave et al. (2005), en su tesis de grado señala que las ecuaciones alométricas, se establecen con un nivel considerable de precisión, dentro de su metodología considera dos ecuaciones para el cálculo de biomasa:

- $\ln(BA) = -2.680 + 1.805 \ln(DAP) + 1.038 \ln(H) + 0.377 \ln(p)$

Dónde:

BA: Biomasa aérea estimada (kg)

DAP: Diámetro normal o diámetro a la altura del pecho de los árboles (cm).

H: Altura total de los árboles (m)

p: Densidad específica de los árboles

- $BA = p * \exp (-1.499 + 2.148 \ln(DAP) + 0.207 (\ln(DAP))^2 - 0.0281(\ln(DAP)))$

Dónde:

BA: Biomasa aérea estimada (kg).

DAP: Diámetro normal o diámetro a la altura del pecho de los árboles (cm).

H: Altura total de los árboles (m).

p: Densidad específica de los árboles.

Segura et al. (2008), de forma estándar, describen los modelos creados por diferentes autores más utilizados para el cálculo de biomasa aérea, estos modelos denominados genéricos han sido empleados por investigadores para estimaciones de carbono en especies como teca, melina y eucalipto, Mireles, Hernández, Martínez y Barra (2002) utilizan de forma estandarizada estas ecuaciones.

**Tabla 6.** Modelos alométricos de estimación de biomasa

<b>Nombre</b>	<b>Ecuación</b>
Berkhout	$VBC = a + b * Dap$
Kopezky	$VBC = a + b * Dap^2$
Hohenadl - Krenn	$VBC = a + b * Dap + c * Dap^2$
Husch	$\ln VBC = a + b * \ln Dap$
Spurr	$VBC = a + b * Dap^2 * h$
Stoate	$VBC = a + b * Dap^2 + c * Dap^2 * h + d * h$

**Nota:** VBC: Volumen, biomasa o carbono; Dap: diámetro a 1.30 de altura; h: altura total del árbol en m

**Fuente:** Segura et al., 2008.

El Ministerio del Ambiente del Ecuador (2014), señala los siguientes pasos para la construcción de modelos alométricos:

- Depósitos o resorvorios de biomasa y carbono a considerar: fuste, copa, ramas, hojas.
- Estratificación del bosque o lugar de estudio.
- Determinación del número de unidades a medir por estrato.
- Identificación de especies a medir.
- Medición de variables dendrométricas para la obtención de volumen.
- Secado en laboratorio y determinación de densidad
- Obtención de modelos alométricos.

Aguilar et al., (2019) establecieron tres ecuaciones alométricas para la estimación de volumen a partir de las variables altura y diámetro:

- $v: e^{(-9.2146+2.6742)*\ln(H)} e^{\frac{0.2271^2}{2}}$
- $v: e^{(-9.533+0.9334)*\ln(DAP)} e^{\frac{0.1796^2}{2}}$
- $v: e^{(-9.2146+2.6742)*\ln(DAP)^2(H)} e^{\frac{0.1373^2}{2}}$

### **2.13 Factor de expansión**

Rodríguez et al. (2016), señalan que la mayoría de los modelos alométricos se centran en la biomasa del fuste, sin considerar la biomasa existente en otros componentes de la copa, ante tal situación, ellos proponen el uso de factores de expansión, que resultan en parámetros que permiten obtener la biomasa de hojas y ramas, por lo general se obtiene multiplicando la densidad básica por el volumen del árbol.

Husch et al. (2003), señalan que al igual que Rodríguez et al., (2016) que por lo general para la obtención de un factor de expansión se utiliza la multiplicación de la densidad básica promedio por el volumen de cada árbol.

Aguilar et al. (2019), utilizan un factor de expansión para cuantificar biomasa aérea total por árbol, a partir de la relación del valor de densidad específica de madera y el valor de 0.8, asumiendo que a nivel de fuste se acumula un 80 % de biomasa total.

Por otra parte, Hernández et al. (2017), consideraron la proporción directa del volumen con respecto a la biomasa de fuste, definiendo la siguiente fórmula:

$$FEB = \frac{Bf}{V}$$

Dónde:

FEB: factor de expansión de biomasa.

Bf: biomasa de fuste.

V: volumen.

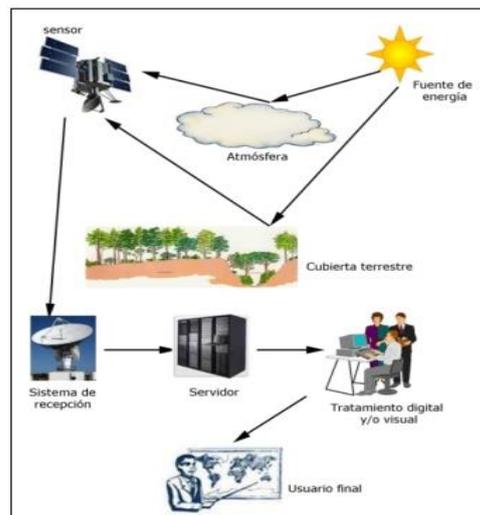
### **2.14 Tecnología de detección remota aplicada en la dendrometría**

Ospina, Bolaños, Zúñiga, y Muñoz (2018), mencionan que la elaboración de inventarios forestales de forma terrestre, ha sido por años de

estudio, la técnica convencional más usada para la evaluación del estado productivo y caracterización de las plantaciones, sin embargo, según Ferrando et al. (2015), la tecnología de detección remota, se destaca como una alternativa viable para la obtención de métricas dentro del ecosistema forestal.

Un sistema de teledetección se comprende por dos elementos fundamentales: los sensores de captación y las plataformas de almacenamiento y transmisión de imágenes, en base a lo mencionado por Paz y Díaz (2018).

**Gráfico 5.** Sistema de teledetección



**Fuente:** García, 2016.

### 2.14.1 Sensores remotos.

García (2016), describe a los sensores remotos como instrumentos de captación o emisión de energía natural u ondas electromagnéticas generadas a partir de elementos determinados en una superficie terrestre. Los principales elementos de un sensor son la fuente de energía, sistema de sensor, sistema receptor y usuario final de la información captada según Huerta, Ramírez, Yépez y Lozano (2018).

### **2.14.1.1 Sensores activos.**

Paz y Díaz (2018), mencionan que son instrumentos que poseen una fuente de ondas electromagnéticas, que, al ser emitidas hacia un objeto determinado, provocan un efecto rebote, dispersando la energía que luego pasara a ser captada y amplificada por el sensor en particular. Cisneros, Zúñiga y Pompa (2018), establecen que dentro del grupo de sensores activos se encuentran: la tecnología LIDAR, los radares, el escáner laser terrestre y la cámara multiespectral.

#### *Cámara multiespectral.*

Una cámara multiespectral permite la obtención de imágenes usando diferentes rangos de frecuencias de ondas, es decir que una vez obtenido el resultado de captación, se podrá obtener múltiples imágenes a lo largo del espectro electromagnético o tipo de onda establecida en base a lo planteado por Williams (2017).

#### *Tecnología LIDAR.*

Paredes (2018), indica que la tecnología LIDAR, se dispone como una forma de teledetección a través de la utilización de la luz emitida por un láser que precisara en tomas de determinadas superficies terrestres en un sistema exacto de coordenadas geográficas. Esta forma de captación de imágenes, según Tottit y Eugenia (2017) se basa en un sensor de barrido láser que, al emitir pulsos específicos, almacena los retornos de la superficie.

#### *Escáner laser terrestre.*

El escáner laser terrestre (TLS) es definido por Castillo (2017), como un instrumento de adquisición en masa de datos, a partir de una nube de puntos en estado tridimensional, generada por la emisión de un rayo láser. Paz y Díaz (2018) lo consideran como una estación topográfica que permite la observación directa y precisa de áreas definidas y preseleccionadas para estudios.

Aguilar et al. (2019), obtienen variables dendrométricas predictoras para la construcción de ecuaciones alométricas, a partir de las mediciones realizadas por escáner laser terrestre en plantaciones de teca, destacando su utilidad en la dendrometría.

#### **2.14.1.2 Sensores pasivos.**

García (2016), indica que los sensores pasivos, son aquellos que captan y reciben energía reflejada o emitida por elementos terrestres, dentro de este grupo se encuentran los sensores de fotografía, los de óptica-electrónica, espectrómetros y radiómetros.

##### *Cámara RGB.*

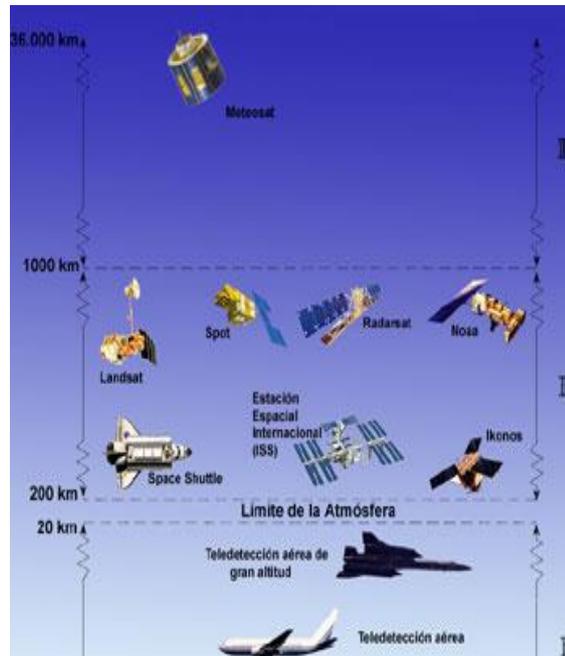
Rodríguez y Klaribel (2018), mencionan que una cámara RGB, es aquella que capta la energía reflejada de un elemento en específico, a partir de la transformación de los tres colores que indican el acrónimo de RGB: rojo, verde y azul, a partir de la reflexión de luz del objeto, los monitores internos utilizan estos colores para la generación de imágenes.

#### **2.14.2 Plataformas.**

Hirschman (2015), describe que las plataformas de teledetección a los satélites, los cuales transportan, almacenan y permiten la transmisión de las imágenes captadas a distancias, entre los más conocidos se encuentran: el LANDSTAT, NOAA, SPOT y METEOSTAT.

Muñoz y Camargo (2019), especifican que estas plataformas internamente poseen sensores que permiten la captación de la información y que en función de la distancia entre la plataforma y la superficie terrestre. Entre las plataformas de teledetección más utilizadas en levantamiento de información por medio de fotogrametría como drones, aviones y plataformas de alcance terrestre.

**Gráfico 6.** Plataformas de teledetección



**Fuente:** Hirschman, 2015.

## 2.15 Sistemas de información geográfica

Un sistema de información geográfica (SIG) integra diferentes herramientas y componentes que hacen posible el almacenamiento, modelado y comprensión de datos geográficos en una determinada ubicación espacial, en base a lo señalado por Hirschman (2015), quien también menciona que por lo general la forma de organizar una cantidad masiva de datos en un SIG, es la creación de mapas con un interfaz interactivo con el usuario.

Arce (2015), expresa que los sistemas de información geográfica, para la organización y agrupación de información, hacen uso de los sistemas de posicionamiento global, el cual destaca entre los más conocidos los descritos a continuación:

- GPS: De origen estadounidense, permite determinar la ubicación de cualquier objeto en la tierra, funciona utilizando una red mínima de satélites orbitales.
- GLONASS: Desarrollado por la Unión Soviética, trabaja de forma homóloga al GPS.
- BeiDou: Desarrollado en China, comprende de un sistema de constelaciones de satélites separadas.
- Galileo: Creado por la Unión Europea para uso civil, es totalmente independiente del GLONASS Y GPS.

## **2.16 Extracción de métricas mediante sensores LIDAR**

La utilización de tecnología LIDAR para la extracción de métricas forestales y construcción de modelos alométricos está presente en investigaciones como la de Aguilar et al. (2019), quienes a partir de teledetección realizan mediciones de variables dendrométricas y con la utilización de softwares especializados, extraen estas mediciones.

Aguilar et al. (2019), señalan que en su investigación se utilizó el software libre 3D Forest para hacer frente a la segmentación de la vegetación forestal (es decir, puntos no terrestres previamente clasificados) en árboles individuales. Según Aguilar et al., (2019) el enfoque automático aplicado se basa en la distancia entre puntos, el número mínimo de puntos que forman grupos y el ángulo y la distancia entre los centroides de los grupos.

Adicionalmente, Aguilar et al., (2019) señalan que es necesario una edición manual adicional para corregir los errores de segmentación eliminando partes redundantes del árbol incorrecto y agregándolas al correcto.

El otro software utilizado para la extracción automática de métricas en el trabajo de Aguilar et al. (2019), fue Tree Geometry desarrollado en lenguaje

Matlab, este programa realiza secciones transversales a lo largo del tallo del árbol a diferentes alturas (normalizadas con respecto al suelo).

Green Valley International (2017), menciona otros programas de extracción como Lidar 360 y Mobile Lidar 3D Scanning, de los cuales Green Valley International (2017) expresa que, por manejo de interfaz y herramientas, Lidar 360 es el más adecuado, ya que permite realizar un acercamiento exacto a la nube de puntos del objeto a segmentar y eliminar detalles como puntos de ramas de otros árboles, sotobosque o algún otro elemento.

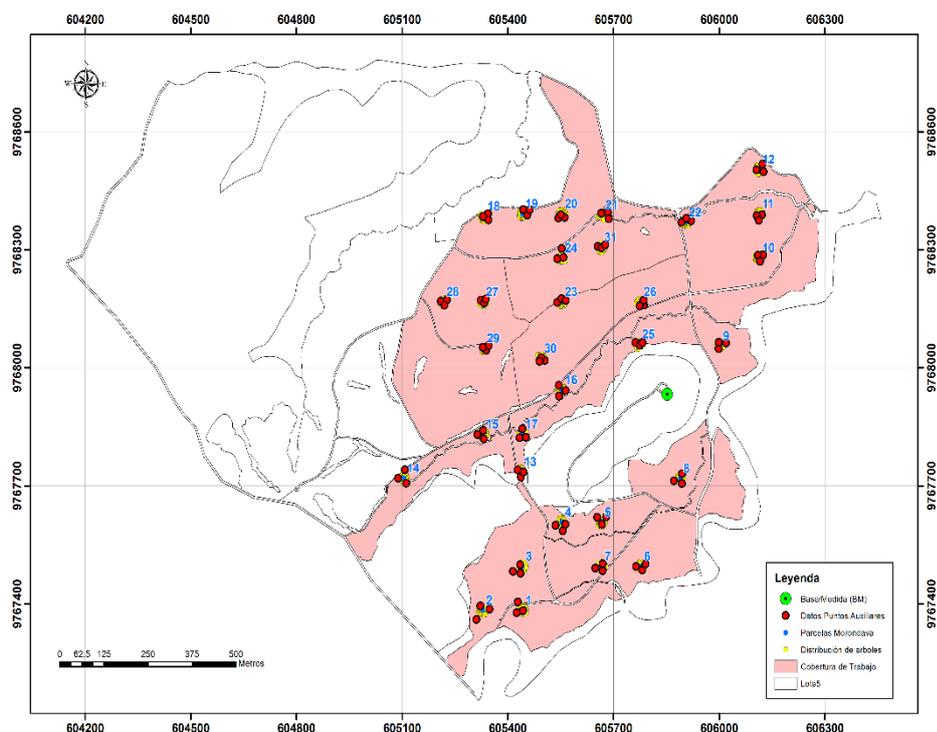
Por otra parte, Pereira (2012), expresa que el software libre Cloudcompare permite unir y reconstruir el modelo estructural de un árbol a partir de las nubes de puntos generadas por el escáner laser terrestre, para posterior a la reconstrucción, obtener métricas del árbol en un software de extracción.

### 3 MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Ubicación geográfica

El objeto de estudio se ubicó al Oeste del sector de Monte Sinaí en la ciudad de Guayaquil, provincia del Guayas, considerada una zona típica de bosque tropical seco, en el predio de plantaciones de teca “Morondava” con coordenadas (2°6'11.72" S, 80°2'59.43" W).

**Gráfico 7. Predio Morondava**



**Fuente:** Peñalver, 2018.

#### 3.1.1 Características edafoclimáticas.

El clima de la zona de estudio posee en promedio una precipitación de 800 mm y una temperatura de 24.6 °C, a su vez presenta una humedad aproximada de 73.1 % en base a lo descrito por Flores, Cabezas, Crespo y Gutiérrez (2010). Según Holdridge (1982) el bosque seco tropical comprende un comportamiento unimodal de lluvias en los tres primeros meses del año y una sequía marcada en lo restante del año, lo que resulta en expresiones

fenológicas de ciertas especies de forma alterna, presencia de follaje en el periodo de enero a julio e inexistencia de follaje de septiembre a diciembre.

### **3.2 Materiales y equipos**

#### **3.2.1 Materiales.**

- Barreno de Pressler de 20 cm de longitud y 5.15 mm de diámetro interior.
- Fundas de papel
- Bolígrafo
- Papel
- Pinzas de laboratorio
- Recipientes
- Fundas de plástico
- Hacha
- Podadoras de altura
- Cinta métrica

#### **3.2.2 Equipos.**

- GPS
- Computadora
- Balanza de precisión
- Cámara fotográfica
- Hipsómetro

### **3.3 Diseño de la investigación**

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, con un alcance descriptivo y correlacional de tipo no experimental, se empleó el método deductivo científico.

### 3.4 Población y muestra de estudio

La población objeto de estudio comprendió las plantaciones de teca de la Región Litoral o Costa del Ecuador. La muestra de estudio se constituye por las parcelas de 1 018 m<sup>2</sup> con un radio de 18 m que contenían los árboles georreferenciados medidos en TLS.

La población objeto de estudio comprendió las plantaciones de teca de la Región Litoral o Costa del Ecuador. La muestra de estudio se constituyó por 152 árboles medidos en TLS. Los árboles pertenecían a una plantación de tres años de edad. La caracterización de la plantación de estudio se describe en la Tabla 7:

**Tabla 7.** Variables dendrométricas de la plantación Morondava

	<b>dg</b>	<b>G</b>	<b>hl</b>	<b>Hdom</b>	<b>Lcopa</b>	<b>E</b>	<b>V</b>	<b>VC</b>
<b>x</b>	7.4	3.9	7.6	9.2	68 %	58.9	21.1	0
<b>s</b>	2.2	1.7	2	2.6	0.1	25.2	10.4	0
<b>E</b>	0.8	0.6	0.7	0.9	0	9.2	5.4	0
<b>E (%)</b>	10.8 %	16.4 %	9.4 %	10.2 %	3.6 %	15.7 %	10.3 %	0

**Nota:** Ni: densidad inicial, dg: diámetro a 1.30 m, G: área basal, hl: altura Lorey, Lcopa: longitud de copa, E: espesura, V: volumen, Vc: volumen comercial, x: promedio, s: desviación estándar, cv: coeficiente de variación, E: error absoluto del muestreo, E (%): error relativo del muestreo.

**Fuente:** Peñalver, 2018.

Esta caracterización de la población de estudio fue realizada en el proyecto institucional “Evaluación de tecnologías de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador” generado en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil con una muestra total de 31 árboles del predio Morondava. La muestra de estudio para esta investigación se comprendió por 152 árboles pertenecientes a las parcelas descritas en la Tabla 8.

**Tabla 8.** Parcelas de estudio

<b>PMO-1</b>	21 árboles
<b>PMO-2</b>	20 árboles
<b>PMO-4</b>	19 árboles
<b>PMO-5</b>	27 árboles
<b>PMO-6</b>	30 árboles
<b>PMO-7</b>	12 árboles
<b>PMO-12</b>	23 árboles

**Nota:** PMO: parcela del predio Morondava

**Elaborado por:** La Autora

### 3.5 Variables de estudio

Las variables de estudio propuestas en la investigación, son las variables predictoras obtenidas mediante TLS y se describen en la Tabla 9:

**Tabla 9.** Operacionalización de variables.

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Tipo</b>	<b>Indicador</b>
Altura total	Longitud que abarca desde la base del tallo hasta el final de la copa.	Independiente	m
Diámetro a la altura de pecho	Diámetro a 1.30 m de altura	Independiente	m <sup>2</sup>
Densidad específica de madera	Cantidad de kg presentes por m <sup>3</sup> de madera.	Independiente	$\frac{m^3}{kg}$
Volumen fustal	Espacio en m <sup>3</sup> ocupado por el fuste.	Dependiente	m <sup>3</sup>
Volumen de ramas	Espacio en m <sup>3</sup> ocupado por las ramas	Dependiente	m <sup>3</sup>
Biomasa forestal aérea	Suma total en kg, de la biomasa presente en ramas, hojas y fuste.	Dependiente	$\frac{kg}{\text{árbol}}$

**Elaborado por:** La Autora.

### **3.6 Estimación de biomasa aérea**

La estimación de biomasa aérea se realizó multiplicando el volumen obtenido por la ecuación compatible de perfil de fuste por el valor promedio de densidad específica de madera.

La estimación de biomasa aérea de esta investigación, se realizó empleando métodos no destructivos en conjunto con el uso de tecnología de teledetección. Para un correcto desglose de actividades de esta investigación, se divide la metodología del trabajo en tres partes: cálculo de volumen, fustal, determinación de densidad específica de madera y estimación de biomasa aérea por componentes.

### **3.7 Metodología para el cálculo de volumen fustal**

#### **3.7.1 Datos para el análisis estadístico.**

Los datos usados para el análisis estadístico se originaron de la extracción de métricas de la nube TLS, realizada en el software libre 3DForest, los datos extraídos de la nube corresponden a la medición de diámetros a diferentes alturas, en un intervalo de 0.50 m, se utilizó también los datos de cubicación generados por el programa Tree Geometry de la investigación de Aguilar et al. (2019). Esta base de datos extraídos se origina en el marco de realización del proyecto institucional “Evaluación de tecnologías de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador” generado en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

La selección de datos para el análisis estadístico se realizó del conjunto de mediciones generadas por 152 árboles medidos por TLS pertenecientes a las parcelas descritas en la Tabla 8 del apartado de población y muestra de estudio, estos árboles fueron clasificados por clases diamétricas, posterior a la limpieza de datos atípicos. La data de validación se conformó por 76 árboles seleccionados de forma aleatoria de las diferentes categorías, los 76 restantes conformaron la data de validación.

### **3.7.2 Agrupación de datos.**

De forma previa al análisis estadístico, se agruparon y ordenaron los datos de medición por árbol en una sola hoja de trabajo de Microsoft Excel. La tabulación, ordenamiento, clasificación y aleatorización de datos se realizó en una hoja de cálculo de Microsoft Excel.

### **3.7.3 Métodos de regresión.**

Se usaron dos tipos de métodos de regresión para la estimación de coeficientes de los modelos. El método de mínimos cuadrados ordinarios fue empleado para la generación de funciones lineales. El análisis de regresión no lineal, utilizando la técnica de Levenberg Marquardt, que, a través del método de máxima verosimilitud, permitió la estimación de los coeficientes de regresión de los modelos genéricos de Forslund y Kozak y el polinomial. El paquete estadístico utilizado para ambas técnicas de regresión fue el software libre "Infostat".

### **3.7.4 Variables.**

#### ***3.7.4.1 Método de regresión lineal por mínimos cuadrados.***

En este método de regresión lineal simple, se estandarizó las variables de altura y diámetro según la metodología de Caillez (1980):

$$x: \frac{h_i}{H} ; y: \frac{d_i}{H}$$

Dónde:

$h_i$ : altura a un diámetro determinado.

$H$ : altura total

$d_i$ : diámetro a una altura determinada

### **3.7.4.2 Método de regresión no lineal por técnica de Levenberg Marquardt.**

Las variables de los modelos genéricos en base a lo definido por Diéguez et al, (2014), se establecieron en:

$$X: \frac{h_i}{H}; Y: \left(\frac{d_i}{D}\right)^2$$

Dónde:

$h_i$ : altura a un diámetro determinado.

$H$ : altura total

$d_i$ : diámetro a una altura determinada

$D$ : Diámetro a la altura de pecho.

### **3.7.3 Estadísticos para la selección de modelos.**

Para las ecuaciones obtenidas por el análisis de regresión lineal por mínimos cuadrados se tomaron como estadísticos de selección: el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), el índice de inflación global (I. F.M), el valor de criterio de información bayesiano (BIC) y criterio de información de Akaike (AIC), el error cuadrado medio (E.CM) y la prueba de bondad de ajuste a la distribución normal de residuos de Kolgomorov, que es empleada cuando el número de observaciones es mayor a 30.

En cuanto a los modelos generados por la técnica de regresión no lineal de Infostat, se consideraron: el valor de BIC y AIC, el error cuadrado medio (E.C.M), el valor de sigma ( $\sigma$ ), el número de iteraciones (n. iteraciones), empleada en técnicas de regresión no lineal.

### **3.7.4 Modelo compatible de volumen.**

Posterior a la selección de modelos en base a los estadísticos descriptivos y pruebas de bondad de ajuste, siguiendo la metodología de Diéguez et al, (2014) es necesario realizar una relación de compatibilidad con una ecuación general de volumen. El modelo ajustado fue integrado y convertido en una ecuación compatible, reemplazando el coeficiente B de la ecuación de volumen descrita por Diéguez et al., (2014):

$$V = B D^2 H$$

### **3.7.5 Desviación global.**

El volumen estimado a partir del modelo escogido, se contrastó con el volumen generado a partir de la cubicación realizada en el programa "Tree Geometry," que consideró la primera y última troza del tallo como cilíndricas, mientras que las demás como figuras cónicas, a partir de este procedimiento matemático, Aguilar et al. (2019), establecieron una fórmula exponencial de estimación de volumen que también fue usada para el contraste. Con base a lo establecido por Sánchez et al. (2016), la fórmula utilizada para el cálculo de desviación global fue la siguiente:

$$DG = \frac{\Sigma V1 - \Sigma V2}{\Sigma V1}$$

Dónde:

$\Sigma V1$ : sumatoria de volumen de contraste.

$\Sigma V2$ : sumatoria de volumen estimado.

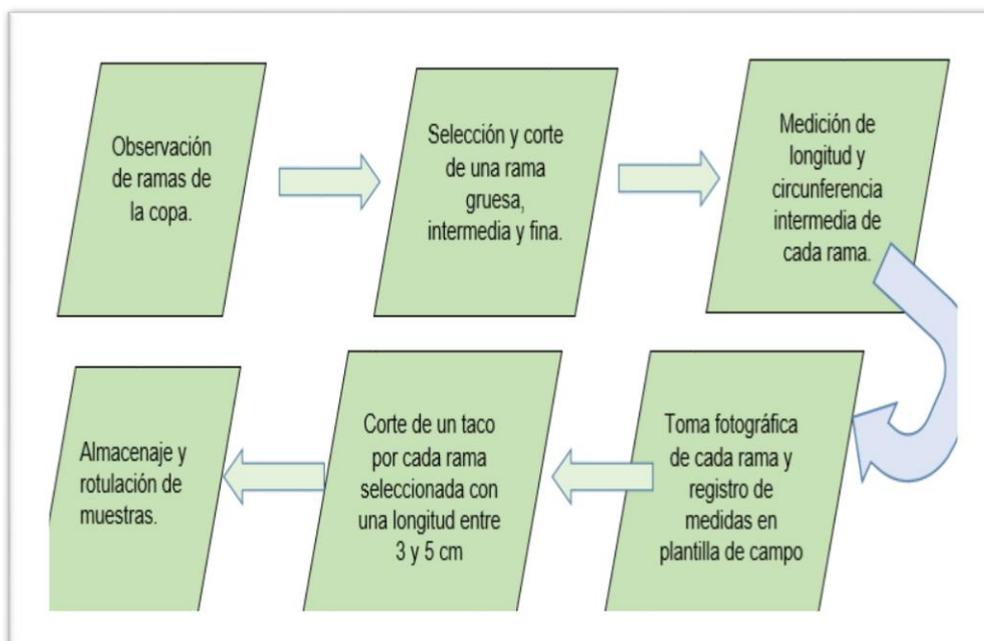
Se calculó también la desviación global del diámetro a 1.30 m estimado con la ecuación de perfil con el medido de forma terrestre y por TLS.

### 3.8 Metodología para la determinación de densidad específica de madera

El número de árboles seleccionados como muestra para determinar la densidad específica de madera, fue de 15 árboles en base al cálculo de poblaciones finitas e investigaciones de Álvarez, Velázquez y Cogollo (2013) quienes establecen una varianza del 10 % para muestreos de densidad de madera de árboles, por otra parte, Arredondo y Návar (2011) establecen que, en poblaciones mayores a 100 árboles, el tamaño de muestra recomendada no debe ser mayor a 20 ni menor a 15 árboles.

Para la determinación de densidad específica de madera de fuste se consideró la metodología descrita por Alarcón et al., (2018) se tomó tres muestras de madera a diferentes alturas por cada árbol, a 1.50 m, 1.30 m y a 1.10 m, para obtener un valor de densidad promedio y evaluar variaciones. En la extracción de tarugos se empleó el barreno de Pressler con medidas específicas: 5 mm de diámetro interior y una longitud dependiente del diámetro del árbol. Para la extracción de muestras de copa, se siguió el protocolo especificado en el Gráfico 8:

**Gráfico 8.** Protocolo de extracción de muestras de copa.



**Elaborado por:** La Autora

Se utilizó una mezcla de sulfato cúprico y cal hidratada para evitar la exposición directa de la herida realizada en cada árbol, como consecuencia de la extracción de tacos y corte de ramas, con patógenos que deriven en enfermedades bacterianas o fúngicas. Para el procesamiento de secado de muestras como etapa previa al procesamiento en laboratorio se empleó el secado natural, que consistió en la exposición directa a la radiación solar, método descrito por Paccar (2016) para muestras de madera de teca y melina, los tarugos de fuste se expusieron al secado natural por cuatro días mientras que las ramas siete días, hasta la obtención de peso constante.

El proceso dentro de laboratorio se comprendió en dos fases: pesaje de muestras y volumetría. El pesaje de muestras de fuste y ramas se realizó en una balanza de precisión, que permitió obtener valores de hasta cinco decimales. La determinación de volumen de los tarugos y muestras de ramas, fue realizado en base al principio de Arquímedes, por medio del uso de probetas se observó de forma perpendicular y se registró el desplazamiento de agua en el recipiente al introducir la muestra, posterior a esto, se restó el volumen final obtenido del volumen inicial y se determinó volumen de tarugos y muestras de ramas. El cálculo de densidad específica de madera se basó en la siguiente fórmula.

$$g = \frac{ps}{v}$$

Dónde:

g : densidad

ps: peso seco

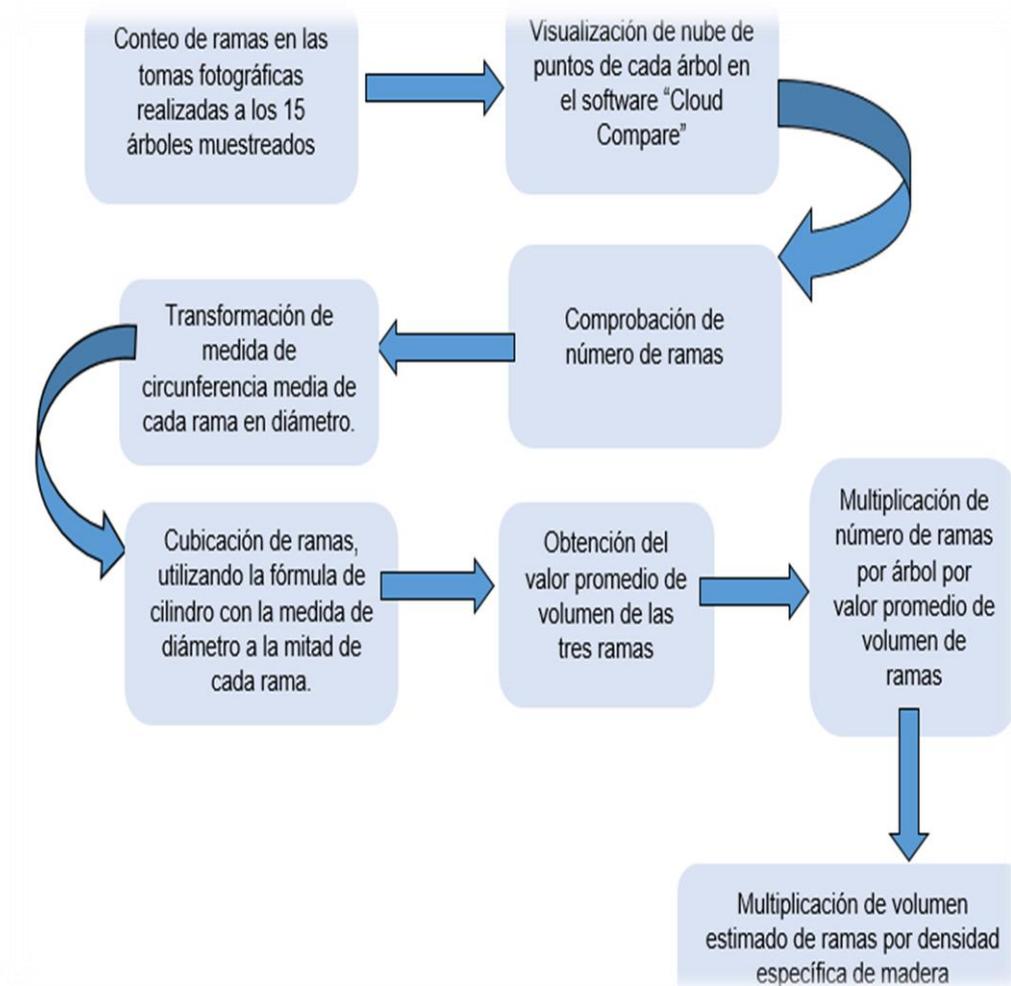
v: volumen de muestra

Para la comprobación de variaciones de densidad específica de madera se realizó el test ANOVA con una significación de 5 %.

### 3.9 Metodología para la estimación de biomasa por componentes

Para la estimación de biomasa de fuste se multiplico el volumen estimado por la ecuación compatible de volumen por la densidad específica de madera promedio. Para obtener un estimado de biomasa de copa se estableció el siguiente protocolo descrito en el Gráfico 9.

**Gráfico 9.** Protocolo de estimación de biomasa de ramas



**Elaborado por:** La Autora

### 3.10 Conteo de ramas

El conteo de ramas se realizó en el software libre Cloud Compare, observando la arquitectura digital del árbol y realizando un conteo aproximado

del número de ramas presente, el conteo de los 15 árboles muestreados se puede verificar en la sección de anexos, a partir del Anexo 8.

### **3.12 Determinación de peso seco de hojas**

La estimación de peso seco de hojas se obtuvo en base a la metodología de Mosquera, Palacios y Bonilla (2007), quienes sugieren la recolección de hojarasca en forma aleatoria por parcela de estudio, el muestreo se realizó en las parcelas 12, 6 y 4 del predio Morondava, que fueron las mismas parcelas donde se obtuvieron muestras de fuste. De cada parcela se recolectó un aproximado de 100 hojas, en laboratorio, por cada grupo de hojas se tomó una submuestra de 25 unidades, estas fueron trituradas y pesadas en balanza de precisión y se calculó el peso seco promedio por hoja que se definió como una estimación de biomasa foliar.

El número aproximado de hojas por árbol se determinó, en base a la observación de la foto de cada rama cortada en campo, contabilizando el total de hojas a partir del número de nudos presente en las ramas, que en base a su morfología resultan en dos hojas nacederas por nudo, agregando las dos hojas terminales. El número de hojas por árbol, se multiplicó por el promedio de peso seco de hojarasca.

### **3.13 Estimación de biomasa total por árbol**

Para la estimación de la biomasa total por árbol se calculó la biomasa presente por árbol a partir de la ecuación alométrica generada y se la fraccionó en biomasa de fuste, ramas y hojas. Esta cuantificación se realizó con los árboles seleccionados para la recolección de muestras (15). Se calculó el porcentaje de biomasa presente en cada componente por árbol. Se evaluaron las variaciones de distribución de biomasa por componente: fuste, ramas y hojas.

## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Ecuaciones de perfil de fuste

En la Tabla 10, se muestran los coeficientes de regresión generados para cada modelo de perfil de fuste.

**Tabla 10.** Coeficientes de modelos de perfil de fuste

Modelo	a	b	c	d	e
$y = ax + bx^2 + c$	-0.0002	-0.00009	0.00011	--	--
$y = ax + bx^2 + cx^3 + d$	-0.00031	0.00037	-0.00018	0.00012	--
$y = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4 + e$	-0.00038	0.00066	-0.00062	-0.00021	0.00013

**Elaborado por:** La Autora

En la Tabla 11, se muestran los modelos de perfil obtenidos por regresión lineal con sus respectivos indicadores estadísticos:

**Tabla 11.** Indicadores estadísticos de los modelos de perfil de fuste.

Modelo	V.I.F	R <sup>2</sup>	D	n
$y = ax + bx^2 + c$	14.83	0.94	0.006	893
$y = ax + bx^2 + cx^3 + d$	216.40	0.96	0.07	893
$y = ax + bx^2 + cx^3 + dx^4$	3360.28	0.96	0.09	893

**Notas:** R<sup>2</sup>: Coeficiente de determinación, D: Prueba para evaluación de ajuste a la distribución normal de residuos Kolgomorov , n: observaciones

**Elaborada por:** La Autora

En la Tabla 12, se muestran los modelos generados por regresión no lineal.

**Tabla 12.** Modelos generados por métodos de regresión no lineal

<b>n</b>	<b>Modelo</b>	<b>Nombre genérico</b>
850	$d = b_0 D^{b_1} b_0^D X^C$	Kozak
850	$d_i = D \left[ \left( 1 - \frac{h_i}{H} \right)^{b_0} \right]^{b_1}$	Forslund
850	$d_i = D \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{h_i}{H} \right) + b_2 \left( \frac{h_2}{H} \right)^2 + b_3 \left( \frac{h_3}{H} \right)^3 + b_4 \left( \frac{h_4}{H} \right)^4 + b_5 \left( \frac{h_5}{H} \right)^5 \right]$	Polinomial

n: observaciones,  $h_i$ : altura relativa; H: altura total; D: diámetro a 1.30 m;  $b_i$ ,  $b_0$ ,  $c$ , X: coeficientes de regresión.

**Elaborado por:** La Autora

En la Tabla 13, se muestran los indicadores estadísticos de los modelos obtenidos por regresión no lineal.

**Tabla 13.** Indicadores estadísticos de modelos genéricos

<b>Nombre genérico</b>	<b>Error cuadrado medio (ECM)</b>	<b>Sigma</b>	<b>AIC</b>	<b>BIC</b>	<b>Iteraciones</b>
Kozak	0.29	0.54	1392.1	1406.5	2
Forslund	0.01	0.08	1852.8	1838.9	1
Polinomial	0.0044	0.07	2250.3	2216.9	9

**Elaborado por:** La Autora

En la Tabla 14, se muestran los coeficientes de regresión estimados de los modelos obtenidos por regresión no lineal

**Tabla 14.** Coeficientes de regresión de modelos genéricos

<b>Nombre genérico</b>	<b>b0</b>	<b>b1</b>	<b>b2</b>	<b>b3</b>	<b>b4</b>	<b>b5</b>	<b>D</b>	<b>X</b>
Forslund	0.0006	0.0004	--	--	--	--	--	--
Polinomial	1.42	-4.88	16.80	-36.10	35.95	-13.17	--	--

**Elaborado por:** La Autora

De los modelos obtenidos por método de regresión lineal por mínimos cuadrados, el modelo cuadrático, presentó los mejores indicadores estadísticos, teniendo el índice de inflación global y error cuadrado medio más bajos en comparación con los otros dos modelos. El índice de inflación global indica en modelos con variables transformadas la presencia de auto correlación y autocolinealidad, problemas descritos por Segura, Hernán y Andrade (2008) y en las conclusiones de investigación de Diéguez et al. (2016).

El modelo cúbico y polinómico en comparación con el cuadrático mostraron un coeficiente de determinación mayor al del modelo cuadrático, sin embargo, el índice de inflación global calculado y error cuadrado medio eran mayores. Por otra parte, la prueba de bondad de ajuste a la distribución normal de residuos mostró evidenció la anormalidad en la distribución de residuos del modelo cúbico y polinómico.

A pesar de que el modelo cuadrático presentó los mejores indicadores estadísticos, Caillez (1980), establece que los modelos cúbicos y polinómicos describen de forma más completa la forma del perfil de un árbol, descartando el modelo cuadrático, considerando que el fuste de teca no es totalmente recto.

El descarte de los modelos obtenidos por métodos de regresión lineal conllevó a la obtención de modelos por regresión no lineal, de los cuales el modelo polinomial de orden seis, fue la función escogida para la estimación de volumen fustal, por presentar los valores más bajos en, E.C.M, sigma y valores de AIC y BIC, adicionando que este modelo cumple con las condiciones de compatibilidad con la ecuación de volumen mencionadas por Diéguez et al. (2014) y Kozak (2006).

#### **4.2 Ecuación de volumen compatible**

Se presentan a continuación la ecuación de perfil de fuste seleccionada con sus coeficientes de regresión, la ecuación de volumen general, su integración y el modelo de ecuación compatible.

Ecuación de perfil de fuste

$$y = 1.42 - 4.88x + 16.80 x^2 - 36.10 x^3 + 35.95 x^4 - 13.17x^5$$

Ecuación de volumen

$$v = BD^2H$$

Modelo compatible:

$$v = D^2H(0.55)$$

Dónde:

V: volumen total

D: diámetro a la altura de pecho

H: altura total

### 4.3 Desviación global

La Tabla 15, describe la desviación global del valor de volumen estimado con la ecuación de volumen compatible generada en esta investigación con el volumen calculado por Aguilar et al., (2019) y el de la fórmula exponencial generada a partir de esta cubicación.

**Tabla 15.** Desviación global del volumen estimado

<b>Contraste</b>	<b>Desviación global %</b>
Volumen steam taper – Volumen Tree geometry (Aguilar et al., 2019)	3
Volumen steam taper – Cubicación fórmula exponencial (Aguilar et al., 2019)	2

**Elaborado por:** La Autora

En la tabla 16 se presenta la desviación global respecto al diámetro calculado con la ecuación de volumen compatible y el diámetro medido en TLS y de forma terrestre.

**Tabla 16.** Desviación global del diámetro estimado

<b>Desviación global de diámetro</b>	<b>%</b>
Dap. Medido (TLS)- Dap. Estimado ecuación compatible	1

**Elaborado por:** La Autora

La compatibilidad del modelo polinomial se comprueba en una desviación global del volumen estimado menor a 5 % con el volumen calculado por Aguilar et al., (2019) a partir de la fórmula de cubicación. La desviación global del diámetro a 1.30 m estimado con el modelo compatible de volumen con respecto al diámetro medido por TLS y de forma terrestre es menor a 1 %.

#### 4.4 Densidad específica de madera

La Tabla 17, muestra los estadísticos descriptivos del cálculo de densidad específica de madera de las muestras de fuste.

**Tabla 17.** Densidad específica de madera de fuste

Muestras	x	S	E.E	C.V
Fuste	500.2628 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.07699003	4 %	15%

**Elaborado por:** La Autora

La Tabla 18, presenta los estadísticos descriptivos del cálculo de densidad específica de madera de las muestras de fuste, dividiendo cada grupo de muestras según la altura a la que fueron tomadas.

**Tabla 18.** Densidad específica de madera de fuste a diferentes alturas

Muestras	X	s	E.E	c.v
Fuste (1.50 m)	491.68 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.04317	4 %	9 %
Fuste (1.30 m)	483.053 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.07933	8 %	16 %
Fuste (1.10 m)	527.732 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.09626	9 %	18 %

**Elaborado por:** La Autora

La Tabla 19, muestra el test ANOVA de las muestras de densidad específica de madera de fuste.

**Tabla 19.** Prueba ANOVA densidad de madera de fuste

<b>F.V</b>	<b>gl</b>	<b>CM</b>	<b>F</b>	<b>p-valor*</b>
Modelo	2	0.01	1.45	0.2460
Tratamiento	2	0.01	1.45	0.2460
Error	42	0.01		
Total	44			

\*no significativo

**Elaborado por:** La Autora

López et al. (2017), describe que los valores de densidad promedio en teca aumentan en base a la dureza de la madera en años, esta aseveración es contraria con el valor de densidad promedio de  $500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  para árboles de tres años de edad del predio Morondava. El valor de densidad obtenido en las tres muestras de fuste a diferentes no refleja variación en base a los resultados del test ANOVA. Sin embargo se observa la diferencia de medias de densidad de las partes inferiores por debajo de 1.30 m, en comparación con las otras dos alturas, Silva y Arreodondo (2012) mencionan que este comportamiento es debido a que la parte distal de los árboles está compuesta por madera relativamente nueva, del año presente o anterior, mientras que en la parte basal del fuste la proporción de madera nueva es relativamente baja y la madera presente contiene un rango de edades anuales desde el nacimiento del árbol hasta el presente.

La Tabla 20, muestra los estadísticos descriptivos del cálculo de densidad específica de madera de ramas.

**Tabla 20.** Densidad específica de madera de ramas

<b>Muestras</b>	<b>X</b>	<b>s</b>	<b>E.E</b>	<b>c.v</b>
	495.64			
Ramas	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.07306258	4 %	15 %

**Elaborado por:** La Autora

La Tabla 21, presenta los estadísticos descriptivos del cálculo de densidad específica de madera de las muestras de rama, dividiendo cada grupo de muestras según las clases diamétricas: fina, intermedia y gruesa.

**Tabla 21.** Densidad específica de madera de ramas (fina, intermedia y gruesa)

Muestras	X	s	E.E	c.v
Fina	502.068 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.087560965	9 %	17 %
Intermedia	487.441 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.06541885	7 %	13 %
Gruesa	497.421 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	0.06863504	14 %	< 1 %

**Elaborado por:** La Autora

La Tabla 22 muestra el test ANOVA de las muestras de densidad específica de madera de ramas:

**Tabla 22.** Prueba ANOVA densidad de madera de ramas

F.V	gl	CM	F	p-valor*
Modelo	2	0.02	1.45	0.8604
Tratamiento	2	0.02	1.45	0.8604
Error	42	0.02		
Total	44			

\*no significativo

**Elaborado por:** La Autora

Los resultados de la prueba ANOVA de densidad específica de madera de ramas sugiere la aceptación de la hipótesis nula lo que demuestra que no existe variación, sin embargo, autores como Chave (2006), mencionan que

las ramas presentan variaciones mayores a las del fuste, por ser partes externas y con mayor exposición a humedad, presentando también densidades más bajas que el fuste, esta segunda aseveración se asemeja a los valores de densidad obtenidos en rama en comparación con los de fuste.

#### 4.5 Estimación de biomasa aérea

La estimación de biomasa aérea se realizó utilizando el modelo alométrico determinado en esta investigación que multiplica volumen por densidad:

$$AGB = (D^2 H (0.55)) * \frac{500 \text{kg}}{\text{m}^3}$$

La Tabla 23, presenta la estimación de biomasa aérea en árboles de teca con la distribución porcentual por componentes: fuste, ramas y hojas.

**Tabla 23.** Distribución de biomasa

ARBOL	DAP (m)	H (m)	% B.R	% B.H	% B.F	TOTAL %
2	0.07461229	8.38	17.277	12.149	70.574	100
42	0.0985199	10.16	16.688	11.989	71.323	100
2	0.09921129	9.77	21.378	6.458	72.164	100
16	0.09733837	9.23	20.217	6.351	73.432	100
40	0.09678894	9.39	34.242	5.188	60.570	100
21	0.11039892	8.02	31.955	6.221	61.824	100
5	0.10945327	10.5	18.030	9.217	72.753	100
16	0.10547929	10.03	26.980	7.079	65.941	100
4	0.09685418	9.8	21.891	8.400	69.709	100
12	0.09160454	8.45	18.962	11.636	69.402	100
26	0.08973337	8.02	28.674	9.353	61.972	100
33	0.10399086	7.64	25.974	9.928	64.099	100
7	0.09008219	8.4	26.435	9.792	63.773	100
		<b>X</b>	24 %	8 %	67 %	
		<b>s.v</b>	5.348	2.21	4.401	
		<b>E (%)</b>	9 %	17 %	3 %	

**Nota:** B.R: biomasa de ramas; B.H: biomasa de hojas; B.F: biomasa de fuste

**Elaborada por:** La Autora

Lara (2011), refiere que en el fuste de teca se acumula el 80 % de la biomasa total de un árbol, Aguilar et al., (2019), también refieren el uso de esta referencia en su trabajo investigativo, sin embargo, Gutiérrez et al., (2018) aseveran que la proporción de biomasa forestal a nivel de fuste varía en base a la edad de la plantación. Por otra parte, Sánchez et al., (2016) plantean que, en plantaciones de teca menores a cinco años, el porcentaje de biomasa en el fuste se ubica en el rango de 62 y 73 %, mientras que en la copa porcentajes entre 40 y 30 %. Jaramillo y Correa (2015) reportan en plantaciones de la provincia del Oro, Ecuador un acumulado de 62 y 70 % de biomasa seca en el fuste de teca entre 5 y 14 años.

Murillo, Alvarado y Mark (2015), aseveran que La distribución de la biomasa aérea seca acumulada por árbol de teca de edades de 3 y 5 años es variable y puede depender de la calidad de sitio forestal, ya que, en sitios de mayor productividad, un 88 % de la biomasa se localizó en el tronco y la corteza, el restante 12 % en ramas y follaje, mientras que en sitios de baja productividad reportó una distribución de un 57 % en el tronco y corteza y un 43 % en las ramas y el follaje. En la investigación de Jiménez y Landeta (2009), realizada en plantaciones de teca de ocho años, el porcentaje de biomasa en fuste se ubica en un rango de 80 % y 85 % y un 20 y 15 % en copa

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

Con base a los resultados de este trabajo de investigación se concluye lo siguiente:

- La estimación de biomasa aérea fue posible utilizando variables dendrométricas predictoras a partir de tecnología de teledetección y métodos no destructivos
- Se obtuvo un modelo compatible de perfil de fuste que permitió la estimación de volumen a partir del método de regresión no lineal.
- Se determinó un valor de densidad específica de madera de  $\frac{500\text{kg}}{\text{m}^3}$  para el predio Morondava sin registrar variaciones
- Se estimó un porcentaje de biomasa aérea por componente de 67 % para fuste, 24 % para ramas y 8 % para hojas a partir de la ecuación alométrica generada en la investigación.

### 5.2 Recomendaciones

Con base a los resultados de este trabajo de investigación se recomienda lo siguiente:

- Se recomienda la estimación de biomasa aérea utilizando variables dendrométricas predictoras a partir de tecnología de teledetección y métodos no destructivos

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar, F. J., Rivas, J. R., Nemmaoui, A., Peñalver, A y Aguilar, M. A. (2019). UAV-Based Digital Terrain Model Generation under Leaf-Off Conditions to Support Teak Plantations Inventories in Tropical Dry Forests. A Case of the Coastal Region of Ecuador. *Sensors*, 19(8), 1934. Recuperado de <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1934>
- Alarcón, P. C., Fernández, M. E., Pathauer, P., Harrand, L., Oberschelp, J., Monteoliva, S., & Martinez-Meier, A. (2019). Comparación de metodologías para la estimación de la densidad de la madera y sus implicancias en la estimación de parámetros genéticos en tres especies del género *Eucalyptus*. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 117(2), 175-183. Recuperado de: <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/revagro/art>
- Aldana, C. E. (2008). Medición Forestal. Obtenido de [http://www.ipcinfo.org/fileadmin/user\\_upload/training\\_material/docs/MedF%2520Medici%25c3%25b3n%2520Forestal.pdf](http://www.ipcinfo.org/fileadmin/user_upload/training_material/docs/MedF%2520Medici%25c3%25b3n%2520Forestal.pdf)
- Álvarez, J; Velázquez, A y Cogollo. (2003). Sobre la estimación en la enseñanza de las matemáticas y la cubicación de maderas como situación didáctica. *Números. Revista de Didáctica de las Matemáticas*, 62, 65-80. Recuperado de: <http://funes.uniandes.edu.co/3439/>
- Antonio, R., Nájera Luna, J. A., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., Jiménez Pérez, J., Gómez Cárdenas, M., & Muñoz Flores, H. J. (2017). Propiedades físico-mecánicas de la madera *Tectona grandis* L. f. de una plantación comercial en el estado de Michoacán. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 8(40), 37-56.

- Anuchin, N. P. (1970). Forest mensuration (Lesnaya Taksasiya). *Israel Program, Forest Scientific Translation, Jerusalem.*
- Aranda, U. D. (2003). *Dendrometría*. Editorial Paraninfo. México, México.  
Recuperado de: <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=25dwscrG>
- Arce, V. (2015). Planificación, logística y valorización de biomasa forestal residual en la provincia de Valencia (Tesis doctoral). Valencia, España.  
Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/dctes?codigo=102840>
- Arreodondo, J y Navas, M. (2011). Volumetría de árboles en pie de caoba (*Swietenia macrophylla King*) en el departamento de Madre de Dios, Perú. Recuperado de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3243>
- ASOTECA (2017). Exportación de teca ecuatoriana. Recuperado de: <http://dspace.udla.edu.ec/handle/33000/7920>
- Barría, C., Sandoval, S y Rojas, G. (2017). Uso del método de resistografía para la predicción de la densidad básica de la madera en árboles en pie de *Pinus radiata*. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 19(3), 349-362.
- Borges, A. (1981). Determinación de ecuaciones de volumen para plantaciones de teca (*Tectona grandis L.*) en la Unidad Experimental de la Reserva Forestal Caparo, Estado Barinas–Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 42(1), 41-50.
- Byrne, T y Red, Ñ. (1986). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137-153.

- Caillez, F. (1980). Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento; estimación del volumen. Obtenido de Roma, FAO.
- Carrillo Anzures, F., Acosta Mireles, M., Jiménez Cruz, C., González Molina, L y Etchevers Barra, J. (2016). Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa y el carbono de la parte aérea de *Pinus hartwegii* en el Parque Nacional Ixta-Popo, México. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(3), 681-691. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S20rttext>
- Castillo Riffart, I. (2017). Predicción de la riqueza de plantas vasculares y carbono aéreo de turberas antropogénicas: comparación de dos métodos de modelación con tres sensores remotos de uso libre. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152785>
- Chave, J., Andalo, C., Brown, S., Cairns, M. A., Chambers, J. Q., Eamus, D., ... & Lescure, J. P. (2005). Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145(1), 87-99.
- Cisneros González, D., Zúñiga Vásquez, J. M., y Pompa García, M. (2018). Actividad del fuego en áreas forestales de México a partir de sensores remotos y su sensibilidad a la sequía. *Madera y bosques*, 24(3). Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?p80003>
- Cubero Moya, J y Rojas Piedra, S. (1999). Fijación de carbono en plantaciones de melina (*Gmelina arborea Roxb.*), teca (*Tectona grandis Lf.*) y pochote (*Bombacopsis quinata Jacq.*) en los cantones de Hojancha y Nicoya, Guanacaste, *Costa Rica* (tesis de grado).

Cuellar Bautista, J. E., Acevedo Mallque, M. P., Yoza Yoza, L. S., Chumbimune Vivanco, S. Y., Garcia Meza, H. A., Ramos León, H. M., ... & Eddy, W. (2018). Estimación indirecta de la densidad básica mediante el uso del Pilodyn en la especie Tornillo *Cedrelinga cateniformis* procedente de plantaciones de diferentes edades en Loreto. Recuperado de: <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/inia/735>

Demaerschalk, U. (1972). Estudio sobre la durabilidad natural de la teca (*Tectona grandis* L. f.) mediante ensayos acelerados de "soil-blocks" en el Laboratorio Nacional de Productos Forestales en Mérida, Venezuela. Boletín Instituto Forestal Latino-Americano de Investigación y Capacitación.(41-42), 63-70.

Diéguez-Aranda, U., Ózcelik, R., Sal-Cando, M., Castedo-Dorado, F., Crecente-Campo, F., ... & Arias-Rodil, M. (2014). Desarrollo de una función de perfil mediante modelos mixtos para *Pinus sylvestris* en Turquía: selección de parámetros fijos a expandir. Bosque (Valdivia), 37(1), 159-167.

Espinosa, S. M.; Yepes, A., Zapata, M., Bolívar, J., Monsalve, A., Sierra-Correa, P. C., & Sierra, A. (2016). Ecuaciones alométricas de biomasa aérea para la estimación de los contenidos de carbono en manglares del Caribe Colombiano. Revista de Biología Tropical, 64(2), 913-926.

Fang, Z y Bailey, R. L. (1999). Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science, 46(1), 1-12.

Fang, Z., Borders, B. E., & Bailey, R. L. (2000). Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. Forest Science, 46(1), 1-12.

- Ferrando, J., Goya, J., Barrera, M., Yapura, P y Frangi, J. (2015). Biomasa y productividad aérea de bosques de *Austrocedrus chilensis* en Río Negro, Argentina. *Revista de la Facultad de Agronomía, La Plata*, 104(2), 139-149. Recuperado de: <http://revista.agro.unlp.edu.ar/index.php/206/124>
- Figueiredo, A., B. E. Borders y K. L. Hitch. 1996. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil *For. Ecol. Man.* 83:39-46
- Flores, J; Cabezas, P ; Crespo, A y Gutiérrez. T (2010). Plagas y enfermedades en plantaciones de Teca (*Tectona grandis* LF) en la zona de Balzar, Provincia del Guayas. *Ciencia y tecnología*, 3(1), 15-22.
- Fonseca, C. S. (2004). Análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas de la madera de teca (*Tectona grandis* LF) de Quevedo y Balzar. *Revista Ciencia y Tecnología*, 1(2), 55-63.
- Forslund, R. 1990. The power function as a simple stemprofile examination tool. *Can. J. For. Res.* 21:193-198.
- Fragoso, P. (2003). Estimación del contenido y captura de carbono en biomasa aérea del predio «Cerro Grande» municipio de Tancítaro Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Michoacán, México.
- García, M. (2016). Estimación de la biomasa aérea de herbáceas con sensores aerotransportados de alta resolución (Tesis doctoral). Universidad del León. León, España. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/ript=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/ript=sci_arttext)
- Gayoso, J y Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2), 33-38. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pi>

- Giraldo, C. D. L., Nieto Rodríguez, V. M., Sarmiento, M., & Borralho, N. (2014). Estimación indirecta de la densidad de la madera mediante el uso de pilodyn en la selección de clones de *Eucalyptus pellita* F. Muell. *Colombia Forestal*, 17(2), 181-192.
- González, G. (1988). Teca en el Mediterráneo occidental y sus relaciones con Acinos. *Lagascalía*, 15(1), 49-66.
- González, H (2018). La conicidad de los árboles y algunas posibles aplicaciones en el manejo de bosques. *Rev. Fac. Nat. Agr.* 41 (1):51-60.
- Goulding, C. J. y J. C. Murray. 1976. Polynomial
- Goulding, C. J., & Murray, J. C. (1976). Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. *NZJ For. Sci*, 5(3), 313-322.
- Green Valley International. (2017). Programas de extracción de métricas forestales. Recuperado de: [vistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/41](http://vistas.uteq.edu.ec/index.php/cyt/article/view/41)
- Gutiérrez-Ríos, M. D. J., Vázquez-Alarcón, A., Uribe-Gómez, M., Sánchez Vélez, A., Lara Bueno, A., & Cruz León, A. (2018). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 7(SPE16), 3235-3249.
- Hernández-Ramos, J., Santos-Posadas, H., Valdez-Lazalde, J. R., Tamarit-Urias, J. C., Ángeles-Pérez, G., Hernández-Ramos, A., ... & Carrero, O. (2017). Biomasa aérea y factores de expansión en plantaciones forestales comerciales de *Eucalyptus urophylla* ST Blake. *Agrociencia*, 51(8), 921-938.

- Herrera de la Vega, F., & Lucatero Birrueta, A. (2003). Inventario de carbono capturado actual en el Ejido las Casitas municipio de Izúcar de Matamoros, Puebla, México.
- Hirschman, A. (2015). La estrategia del desarrollo económico. Recuperado de: <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/16190>
- Holdridge, L.R. (1982). Ecología basada en zonas de vida; IICA. Serie de Libros y Materiales Educativos; Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1982; ISBN 9789290390398.
- Huerta García, R., Ramírez Serrato, N., Yépez Rincón, F, Lozano-García, D. (2018). Precisión de los sensores remotos para la estimación de parámetros de biomasa aérea: LIDAR portátil y sensores ópticos. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 24(2), 219-235.
- Husch, B., Beers, T y Kershaw Jr, J. (2003). Forest Mensuration, ; John Willey & Sons. Inc.: Hoboken, NJ, USA.
- IPCC. (1995). The supplementary report to the IPCC scientific assessment. Cambridge University Press. Cambridge. UK. Recuperado de: [https://www.researchgate.net/profile/David\\_Griggs/publication/](https://www.researchgate.net/profile/David_Griggs/publication/)
- Jaramillo, P y Correa, G. (2015). Estimación de biomasa y carbono en dos especies de bosque mesófilo de montaña. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2(4), 529-543. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pi>

- Jiménez, E., & Landeta, A. (2009). Producción de biomasa y fijación de carbono en plantaciones de teca (*Tectona grandis* Linn F.) Campus Prosperina–ESPOL. *Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral*.
- Kees, S. M., Gómez, C., Vega, A y Muttoni, F. (2014). Funciones de volumen de fuste para árboles individuales de forestaciones con *Prosopis alba* Griseb (algarrobo blanco) en la provincia de Chaco. *Reunión Nacional del Algarrobo*, 13-14.
- Kess, A., Vega, M & Muttoni, A. T. (2014). Ecuaciones alométricas para estimación de biomasa en bosques tropicales. *Ingeniería solidaria*, 10(17), 19-27.
- Kollman .(1959). An algorithm for least squares estimation of non linear parameters. *Jour. Soc. Ind. App. Math.* 11(2):431–444.
- Kozak, G. (2004). Modelos compatibles de ahusamiento-volumen para árboles de *Gmelina arborea* Roxb. en el Alto Magdalena, Colombia. *Colombia Forestal*, 21(2), 174-187.
- Lara, C. (2011). Aplicación de ecuaciones de conicidad para teca (*Tectona grandis* L.F.) en la zona costera ecuatoriana. *Ciencia y Tecnología* 4(2), 19-27. Recuperado de: <http://www.uteq.edu.ec/revistacyt/publico/archipdf>
- Loetsch, F., Zöhrer, F., & Haller, K. (1973). *Forest inventory*. Vol. II. BLV Munique.

- López, Antonio, R., Gómez Cárdenas, M., Alanís Rodríguez, E., Aguirre Calderón, O. A., & Jiménez Pérez, J. (2017). Ajuste y selección de modelos matemáticos para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* L. f. en Nuevo Urecho, Michoacán, México. *Madera y bosques*, 24(3).
- López, H. G., Vaides, E. E., & Alvarado, A. (2018). Evaluación de carbono fijado en la biomasa aérea de plantaciones de teca en Chahal, Alta Verapaz, Guatemala. *Agronomía Costarricense*, 42(1), 137-153.
- Lu, D. (2005). Aboveground biomass estimation using Landsat TM data in the Brazilian Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 26(12), 2509-2525.
- Marroquín Morales, P. (2019). *Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en una plantación de teca (Tectona grandis Lf) en Yucatán, México* (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- Martin (1981). Biomasa e índice de área foliar de *Rosmarinus officinalis* L. en matorral semiárido (Cuenca de Mula, Murcia). In *Anales de Biología* (No. 21, pp. 83-92). Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia.
- Martínez, G y Juárez, E. (2019). La cubicación de madera como un problema geométrico real diseñado para promover el desarrollo de habilidades en la resolución de problemas. Recuperado de: <http://funes.uniandes.edu.co/13982/>

Ministerio de Agricultura y ganadería (MAG, 2015). Estudio descriptivo de la producción, comercialización y logística de Exportación a la india de la madera de teca tectona gradis y su proceso de industrialización como cambio de la matriz productiva. Recuperado de: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle>

Ministerio de Medio Ambiente del Ecuador (MAE, 2014). Estimación de biomasa forestal. Recuperado de: [edu.ec/handle/33000/7920](http://repositorio.ug.edu.ec/handle/33000/7920)

Mireles, M., Hernández, J., Martínez, A y Barra, J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(6), 725-736.

Montero, M y Montagnini, F. (2019). Modelos alométricos para la estimación de biomasa de diez especies nativas en plantaciones en la región Atlántica de Costa Rica. *Recursos Naturales y Ambiente*, (45). Recuperado de: <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/rrna/article/view/287>

Mosquera, R., Palacios, A y Bonilla, C. (2017). Explicaciones acerca de fenómenos relacionados con el volumen de líquido desplazado por un sólido en inmersión, con la densidad y con la flotación, en alumnado de Educación Secundaria Obligatoria. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 230-247.

Muñoz, D y Camargo, J. (2019). Identificación visual de guaduales en el Eje Cafetero de Colombia a partir de una imagen Landsat 8 sometida a mejoramiento espacial por método ISH. *Recursos Naturales y Ambiente*, 65 (6), 52-68. Recuperado de: <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/RRNA/>

Murillo, R., Alvarado, A., & Verjans, J. M. (2015). Concentración y acumulación de nutrimentos en la biomasa aérea de plantaciones de teca de 3 a 18 años en la cuenca del Canal de Panamá. *Agronomía Costarricense*, 39, 117-136.

Ormerod, D. W. 1973. A simple bole model. *For. Chron.*

Ospina-Salazar, D. I., Bolaños, J. A. B., Zúñiga-Escobar, O., & Muñoz-Perea, C. G. (2018). Fotosíntesis y rendimiento de biomasa en ají, rábano y maíz sometidos a agua tratada magnéticamente. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 19(2).

Paccar, J. (2016). *Dendrometría básica*. Universidad de Concepción. Facultad de Ciencias Forestales. Departamento Manejo de Bosques y Medio Ambiente. Recuperado de: <http://repositorio.udec.cl/bitstream/handle/11594/4>

Pagiola, S.; Bishop, J. y Landell, M. (2003). La venta de servicios ambientales forestales. Mecanismos basados en el mercado para la conservación y el desarrollo. Instituto Nacional de Ecología, D. F., México. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-093420110004>

Pardé, J y Bouchon, J. (1994). *Dasometría*. Paraninfo, Cuba. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018700153&script=sci\\_arttext&tlng](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S018700153&script=sci_arttext&tlng)

Paredes Chocce, M. (2018). Uso de índices de vegetación del sensor Modis-Terra en la estimación de biomasa aérea de pajonales altoandinos. Recuperado de: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3351>

Paz Pellat, F y Díaz Solís, H. (2018). Relaciones entre la precipitación, producción de biomasa e índices espectrales de la vegetación: alcances y limitaciones. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 153-168. Recuperado de: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pi>

Peñalver, A. (2018). Evaluación de tecnologías de detección remota para la estimación de biomasa de Teca en la Región Costa del Ecuador. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Guayaquil, Ecuador.

Pereira. (2012). Cloudcompare, introducción. Recuperado de <https://www.danielgm.net/cc/>

Pérez, L y Kanninen, M. (2007). Estimación del volumen comercial a diámetros y alturas variables para *Tectona grandis* LF en Costa Rica. *Recursos Naturales Y Ambiente*, (49-50). Recuperado de: <http://bco.catie.ac.cr/portal-revistas/index.php/rrna/article/view/566>

Picard, Nicolas ., Saint-André, L y Henry, M. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles: del trabajo de campo a la predicción. Recuperado de: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2013001501>

Rivas, D. (2012). Guía de cubicación de madera. Pereira. Bogotá, Colombia. Recuperado de: [http://www.rivasdaniel.com/pdfION\\_MADERA.pdf](http://www.rivasdaniel.com/pdfION_MADERA.pdf)

Rodríguez, B y Klaribel, J. (2018). Análisis dasométrico aplicando tecnología escáner láser terrestre y técnicas convencionales para la estimación de biomasa aérea en el bosque la Armenia (tesis de grado). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE. Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente. Sangolquí, Ecuador. Recuperado de: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/>

- Rodríguez-Larramendi, L. A., Guevara-Hernández, F., Reyes-Muro, L., Ovando-Cruz, J., Nahed-Toral, J., Prado-López, M., ... & Alejandra, R. (2016). Estimación de biomasa y carbono almacenado en bosques comunitarios de la región Frailesca de Chiapas, México. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 7(37), 77-94.
- Rondón, C Barreno, M y Loren, P. (2015). Regression model for estimating the stem taper *Pinus maestrensis* Bisse plantations in Integrated Forest Enterprise Granma.
- Roque, R. M. (2002). Influencia de la edad del cambium, tasa de crecimiento y nivel de precipitación sobre la densidad básica de la teca en Costa Rica. *Madera y Bosques*, 8(1), 39-49.
- Sánchez Hernández, M. Á., Fierros González, A. M., Velázquez Martínez, A., Posadas, S., Aldrete, A., & Cortés Díaz, E. (2016). Estimación de biomasa en teca en plantaciones menores a 8 años. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 9(46), 131-156.
- Schlegel, B., Gayoso, J y Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Valdivia: Universidad Austral de Chile. Recuperado de: [https://www.uach.cl/procarbono/pdf/manuales/guia\\_destructivo.pdf](https://www.uach.cl/procarbono/pdf/manuales/guia_destructivo.pdf)
- Segura, M, Hernán, J y Andrade, E. (2008). Almacenamiento y tasas de fijación de biomasa y carbono en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao*) y laurel (*Cordia alliodora*). Recuperado de: <http://www.19/a3117e.pdf>

- Sharnol, P y Oderwald, M. (2011). Sistema de cubicación para árboles individuales de *Tectona grandis* L. f. mediante funciones compatibles de ahusamiento-volumen. *Revista mexicana de ciencias forestales*, 5(21), 58-74.
- Silva, C y Arredondo, F. (2012). Estimación de la densidad de madera en árboles de comunidades forestales templadas del norte del estado de Durango, México. *Madera y bosques*, 18(1), 77-88.
- Spurr, S. H. (1952). Origin of the concept of forest succession. *Ecology*, 33(3), 426-427.
- Tolosana, E y Laina, R. (2009). Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid. Fucovasa. Recuperado de: <http://wwwsp.inia.es/Investigacion/OtrasUni/TransferenciaTecnologia/>
- Tottil, M y Eugenia, M. (2017). Evaluación mediante sensores remotos del impacto de las medidas silvícolas en Obaga de Coll de Deu (Lérida) en el vigor de la masa. Recuperado de: <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/28364>
- Ugalde, L. (1981). Conceptos básicos de dasometría. Centro Agronómico tropical de investigación y enseñanza. CATIE. Programa de Recursos Naturales Renovables. Turriaba, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/repdoc/A5909e/A5909e.pdf>
- Vidal, A., Benítez, J., Carlos, R y Gra, H. (2004). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de *Pinus caribaea* var. *caribaea* en la EFI: La Palma de la provincia de Pinar del Río, Cuba. *Quebracho-Revista de Ciencias Forestales*, (11), 60-66. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/481/48101106.pdf>

Vite (2015). Modelos de índices de sitio para *Ochroma Pyramidale* (balsa) en el Litoral Ecuatoriano, ( Tesis de Maestría). Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Quevedo, Ecuador.

Williams, G. (2017). Caracterización ambiental del golfo San Matías mediante sensores remotos y parámetros oceanográficos: relación con la distribución y abundancia de los recursos biológicos de interés pesqueros. Recuperado de:  
<http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/123456789/174>

Zamora, H. (2003). Trigonometric variable-form taper equations for Australian eucalyptus. For. Sci. 46:397-409

# **ANEXOS**

### Anexo 1. Volumetría de muestras



Fuente: La Autora

### Anexo 2. Medición de alturas



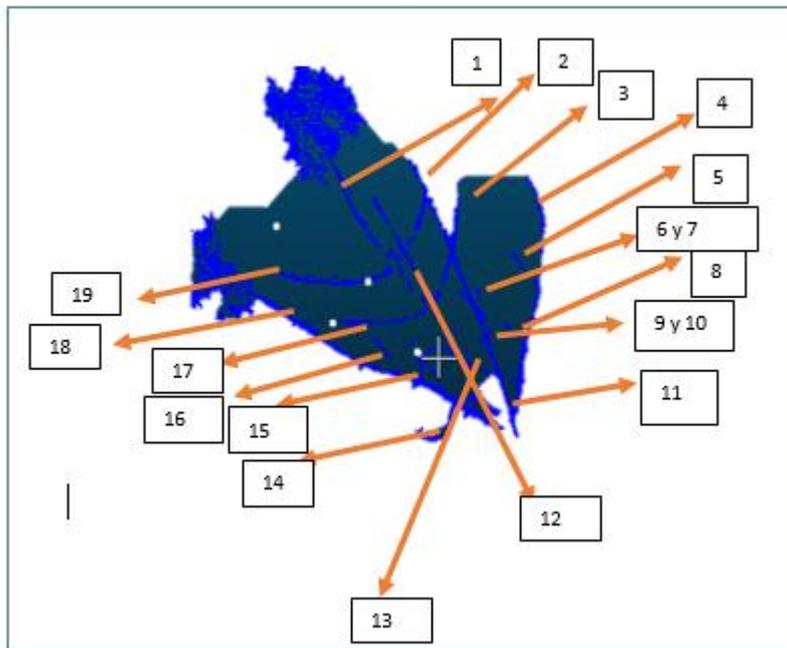
Fuente: La Autora

#### Anexo 4. Pesaje de muestras



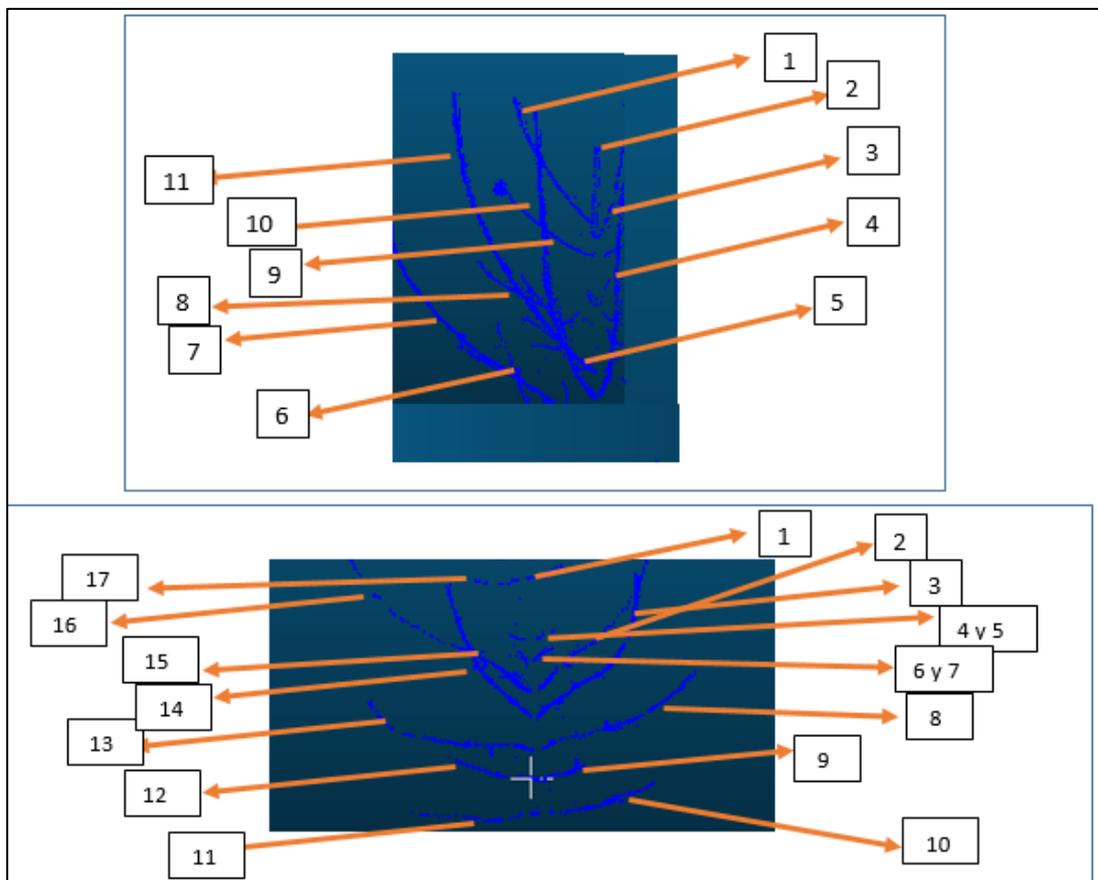
Fuente: La Autora

#### Anexo 5. Conteo de ramas de árbol 2.



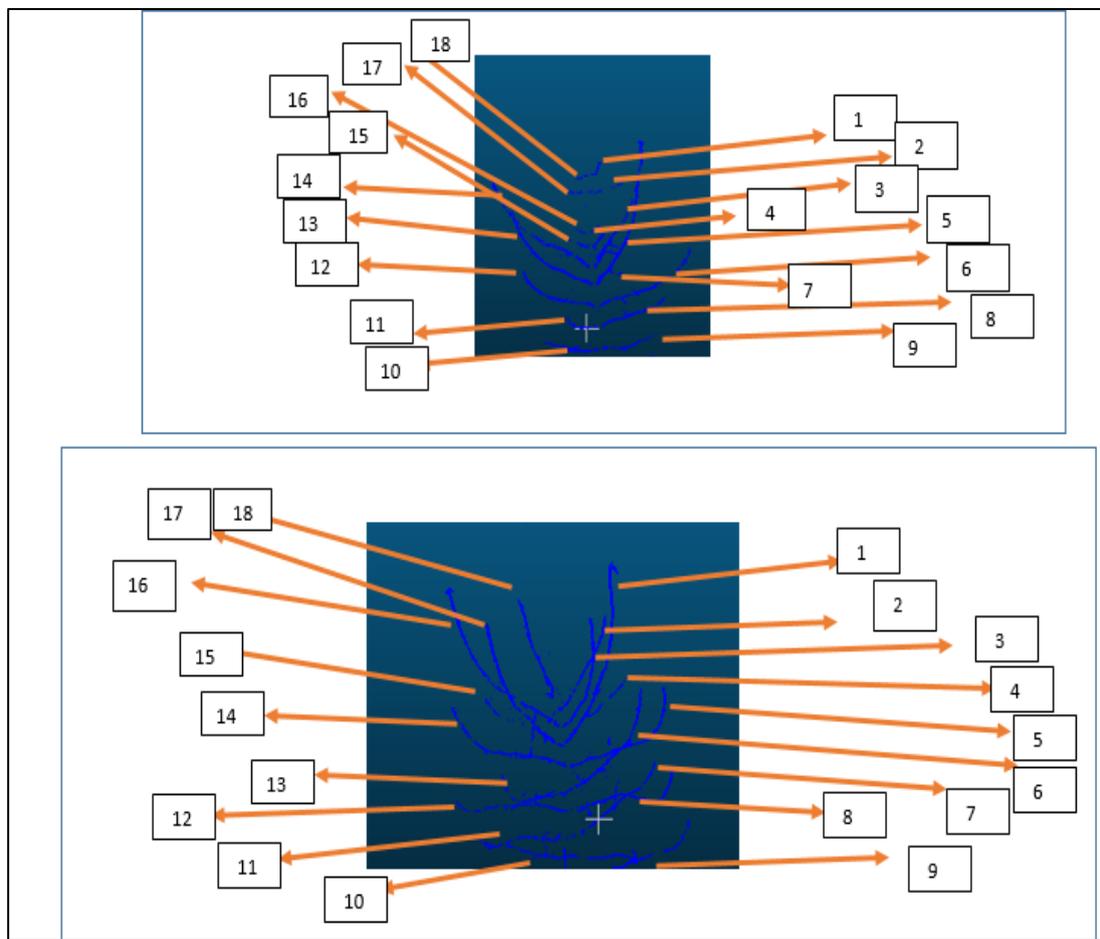
Fuente: La Autora

**Anexo 6.** Conteo de ramas de árbol 42 y 3.



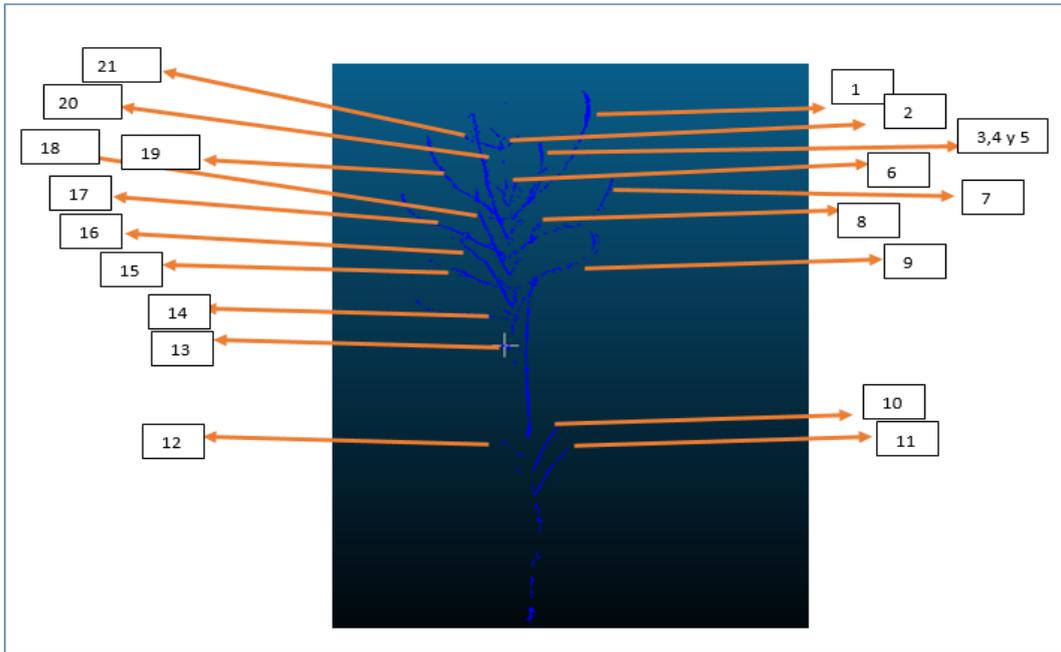
**Fuente:** La Autora

**Anexo 7.** Conteo de ramas de árbol 16 y 20.



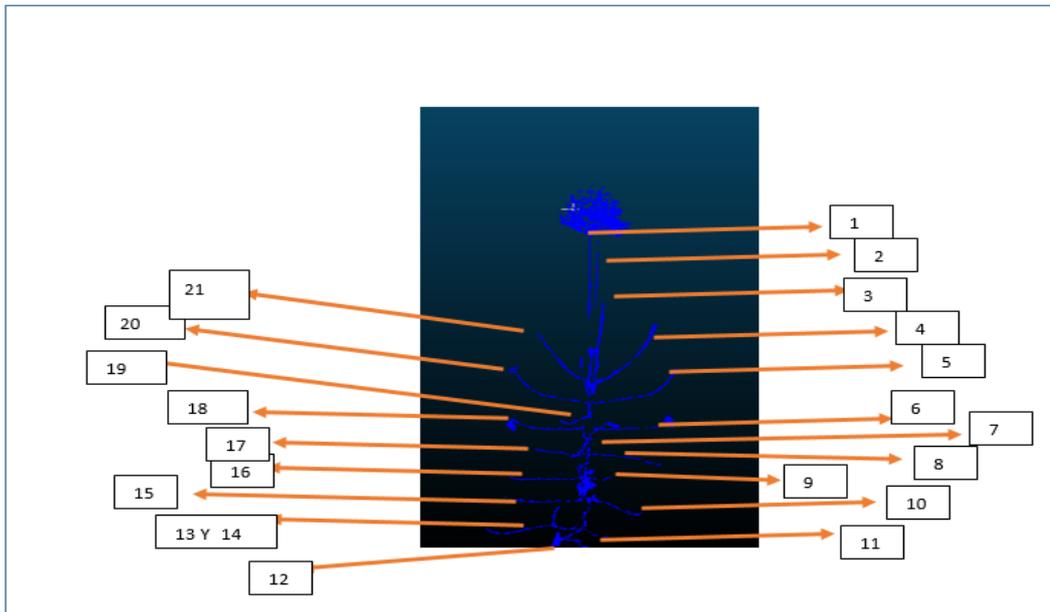
**Fuente:** La Autora

**Anexo 8.** Conteo de ramas de árbol 40.



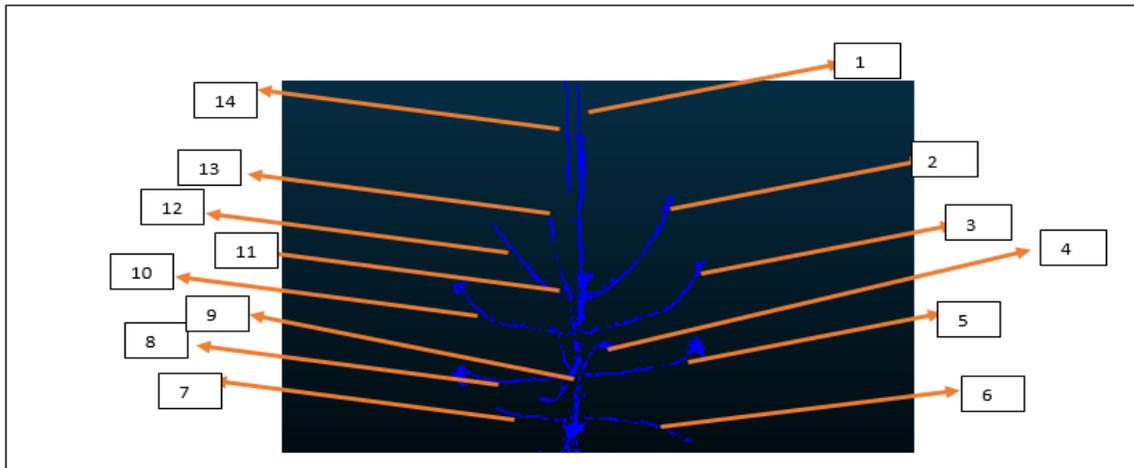
**Fuente:** La Autora

**Anexo 9.** Conteo de ramas de árbol 21.



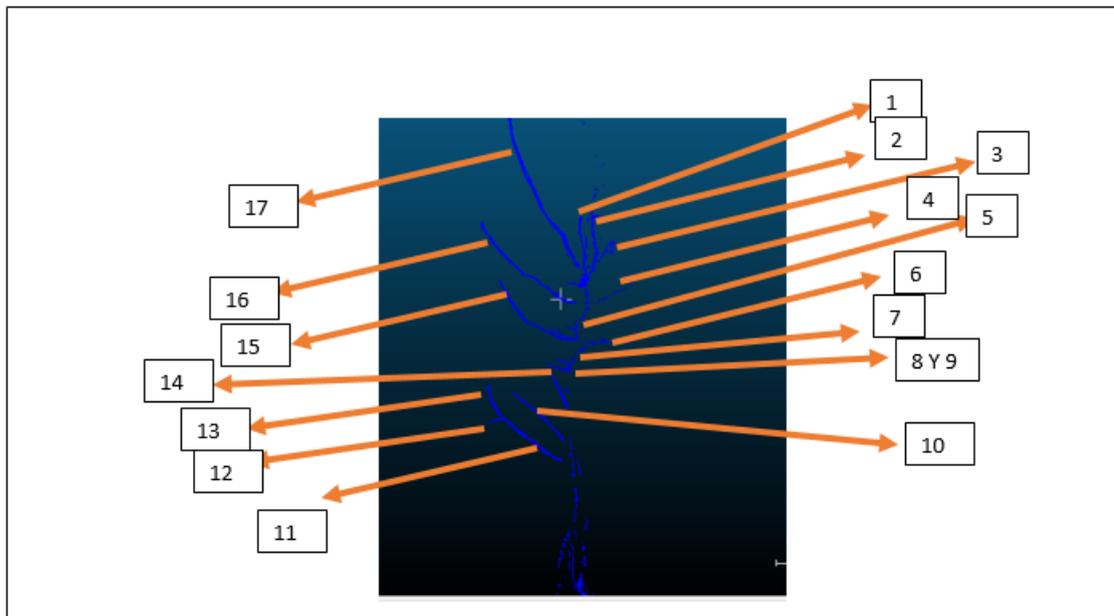
**Fuente:** La Autora

**Anexo 10.** Conteo de ramas de árbol 26.



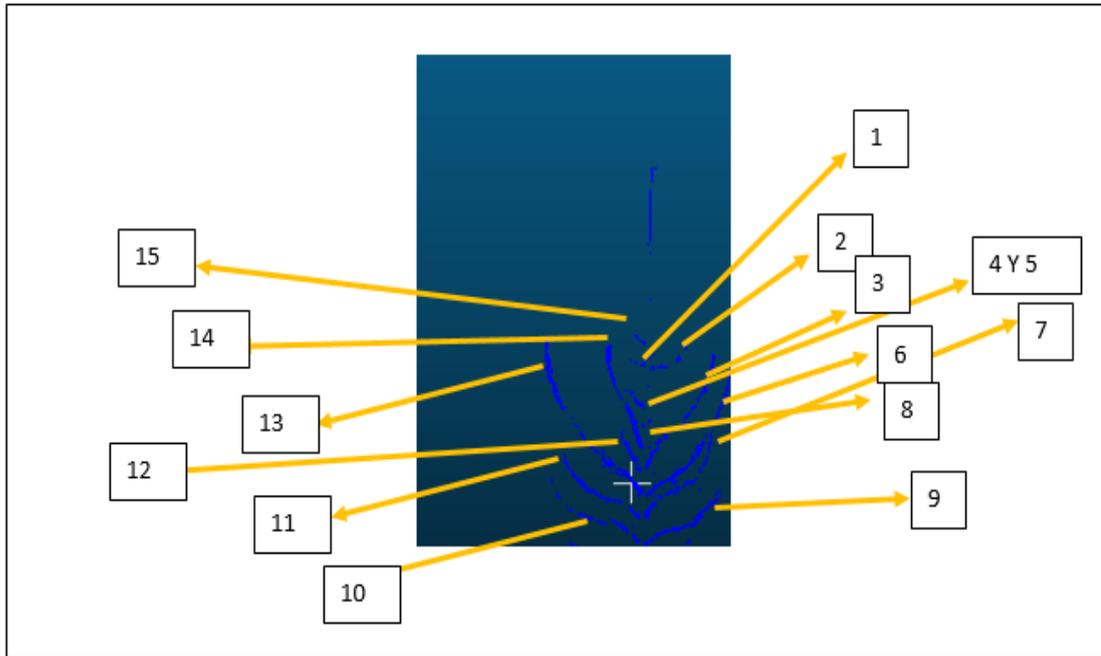
**Fuente:** La Autora

**Anexo 11.** Conteo de ramas de árbol 5



**Fuente:** La Autora

**Anexo 12.** Conteo de ramas de árbol 13



**Fuente:** La Autora



Presidencia  
de la República  
del Ecuador



Plan Nacional  
de Ciencia, Tecnología,  
Innovación y Saberes



SENESCYT

Secretaría Nacional de Educación Superior,  
Ciencia, Tecnología e Innovación

## DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Avilés Jiménez, Manuela Jesús**, con C.C: 0951471572 **autora** del trabajo de titulación: **Estimación de biomasa en plantaciones de teca (*Tectona grandis*) de la región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas**, previo a la obtención del título de **Ingeniera Agropecuaria**. en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil.

1.- Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

2.- Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Guayaquil, **5 de marzo del 2020**

---

Nombre: **Avilés Jiménez, Manuela Jesús**  
C.C: **0951471572**

## REPOSITORIO NACIONAL EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

### FICHA DE REGISTRO DE TESIS/TRABAJO DE TITULACIÓN

<b>TEMA Y SUBTEMA:</b>	Estimación de biomasa en plantaciones de teca ( <i>Tectona grandis</i> ) de la región Costa del Ecuador por medio de ecuaciones alométricas.		
<b>AUTOR(ES)</b>	Manuela Jesús Avilés Jiménez		
<b>REVISOR(ES)/TUTOR(ES)</b>	Ing. Alberto Peñalver Romeo, Ph. D.		
<b>INSTITUCIÓN:</b>	Universidad Católica de Santiago de Guayaquil		
<b>FACULTAD:</b>	Facultad de Educación Técnica para el Desarrollo		
<b>CARRERA:</b>	Ingeniería Agropecuaria		
<b>TÍTULO OBTENIDO:</b>	Ingeniera Agropecuaria		
<b>FECHA DE PUBLICACIÓN:</b>	5 de marzo del 2020	<b>No. DE PÁGINAS:</b>	91
<b>ÁREAS TEMÁTICAS:</b>	Cambio climático, forestería, teledetección		
<b>PALABRAS CLAVES/KEYWORDS:</b>	Alométricas, ecuaciones, biomasa, fuste, teca		
<b>RESUMEN/ABSTRACT:</b>			
<p>La situación ambiental del planeta, es una de las problemáticas más alarmantes en el panorama actual por las consecuencias del cambio climático. Por lo anteriormente expuesto en esta investigación se cuantifico la biomasa presente en plantaciones de teca utilizando ecuaciones alométricas y tecnología de teledetección como el escáner láser terrestre. El uso de métodos no destructivos evito el derribo de árboles y la destrucción parcial del medio forestal. Esta investigación es de tipo exploratoria de carácter no experimental, posee un enfoque cuantitativo y un alcance descriptivo y correlacional. Para la estimación de biomasa se construyó modelos alométricos para el cálculo de volumen por medio del análisis de regresión no lineal, a su vez la densidad se obtuvo por el secado natural de muestras de fuste y rama extraídas en campo. Para las muestras de fuste se hizo uso del barrenado de Pressler. Como resultados de investigación se determinó un valor de densidad específica de madera de teca local de <math>500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}</math> para una plantación de tres años y una distribución de biomasa área con un 64 % de acumulación en fuste, 20 % en ramas y 16 % en hojas. Se concluyó que esta distribución y valor de densidad se correlaciona con la edad del árbol por lo que se recomienda en futuras investigaciones, evaluar las variaciones en plantaciones de mayor edad.</p>			
<b>ADJUNTO PDF:</b>	<input checked="" type="checkbox"/> SI	<input type="checkbox"/> NO	
<b>CONTACTO AUTOR/ES:</b>	<b>CON</b>	<b>Teléfono:</b> +593995658004	<b>E-mail:</b> manuelajesusavilesjimenez@gmail.com
<b>CONTACTO INSTITUCIÓN (COORDINADOR PROCESO UTE)::</b>	<b>CON LA DEL</b>	<b>Nombre: Noelia Caicedo Coello</b>	
		<b>Teléfono: +593-9-87361675</b>	
		<b>E-mail: noelia.caicedo@cu.ucsg.edu.ec</b>	
<b>SECCIÓN PARA USO DE BIBLIOTECA</b>			
<b>Nº. DE REGISTRO (en base a datos):</b>			
<b>Nº. DE CLASIFICACIÓN:</b>			
<b>DIRECCIÓN URL (tesis en la web):</b>			