

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Modelos Proxy Para La Estimación De Biomasa De Fuste De *Pinus patula* Schiede ex
Schltdl. & Cham., En El Ejido Cumbre de Muridores, Hidalgo

Por:

EZEQUIEL ORTIZ BADILLO

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Modelos Proxy Para La Estimación De Biomasa De Fuste De *Pinus patula* Schiede ex
Schltdl. & Cham., En El Ejido Cumbre De Muridores, Hidalgo

Por:

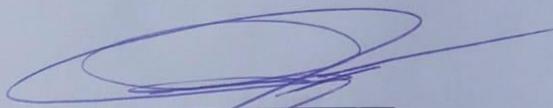
EZEQUIEL ORTIZ BADILLO

TESIS

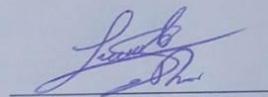
Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:



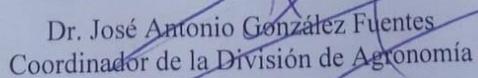
Dr. Jorge Méndez González
Asesor Principal



MC. Librado Sosa Díaz
Coasesor



Dr. Eduardo Alberto Lara Reimers
Coasesor



Dr. José Antonio González Fuentes
Coordinador de la División de Agronomía



Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre de 2021

Declaración de no plagio

El autor quien es el responsable directo, jura bajo protesta de decir verdad que no se incurrió en plagio o conducta académica incorrecta en los siguientes aspectos:

Reproducción de fragmentos o textos sin citar la fuente o autor original (corta y pega); reproducir un texto propio publicado anteriormente sin hacer referencia al documento original (auto plagio); comprar, robar o pedir prestados los datos o la tesis para presentarla como propia; omitir referencias bibliográficas o citar textualmente sin usar comillas; utilizar ideas o razonamientos de un autor sin citarlo; utilizar material digital como imágenes, videos, ilustraciones, graficas, mapas o datos sin citar al autor original y/o fuente, así mismo tengo conocimiento de que cualquier uso distinto de estos materiales como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por las autoridades correspondientes. Por lo anterior me responsabilizo de las consecuencias de cualquier tipo de plagio en caso de existir y declaro que este trabajo es original.

Pasante

Ezequiel Ortiz Badillo

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a **Dios** por la vida, por permitirme vivir hasta este día, por haberme acompañado y guiado a lo largo de mi carrera, por ser mi fortaleza en los momentos difíciles y por llenarme de Amor, experiencias y aprendizajes.

Le agradezco a mis abuelos **Josefina Hernández, José Badillo Franco †, Facunda Mendoza Martínez y Luis Ortiz Nava** por ser parte importante de mi vida, por sus consejos, por su cariño y amor cuando más lo he necesitado.

A mi Alma Mater, la **Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro**, que me recibió, me adoptó y me formó en sus aulas. Gracias por todo.

Le agradezco al **Dr. Jorge Méndez González** por haberme brindado la oportunidad de desarrollar mi tesis, por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y aprender cosas nuevas.

Le agradezco al **MC. Librado Sosa Díaz y Dr. Eduardo Alberto Lara Reimers** por haberme apoyado en la realización de este trabajo.

A **mis amigos** por su amistad, por confiar en mí, por las tareas y trabajos que juntos realizamos, por las veces que me explicaron y haber hecho de mi etapa universitaria un trayecto de vivencias que nunca olvidare.

A **mi chaparrita** por todo el apoyo brindado, por el amor, por el cariño, por los abrazos, por los consejos, por las risas y alegrías. Te amo mi amor.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo principalmente a **Dios**, por haberme dado la vida y permitirme el haber llegado hasta este momento tan importante de mi formación profesional.

A mis padres **Abel** y **Rufina** quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por apoyarme en todo momento de mi vida, por tanto, amor, por los valores inculcados y por darme la oportunidad de estudiar lejos de mi hogar. Los amo con todo mi corazón.

A mis hermanos **Abel**, **Danilo**, **Magali** y **Ana** por su cariño y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento, por ser parte importante en mi vida y representar la unidad familiar, por llenar mi vida de alegrías y amor cuando más lo he necesitado gracias. A toda mi familia por sus consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Índice General

AGRADECIMIENTOS	IV
DEDICATORIA	V
Índice General.....	VI
Índice de Cuadros	VIII
Índice de Figuras.....	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT.....	XI
1.- INTRODUCCIÓN.....	1
2.- OBJETIVOS.....	3
2.1.- Objetivo general.....	3
2.2.- Objetivos específicos	3
3.- HIPÓTESIS	3
4.- REVISIÓN DE LITERATURA	4
4.1.- Cambio climático.....	4
4.2.- Carbono.....	4
4.3.- Biomasa	5
4.4.- Criterio RD®1000	5
4.5.- Troceo simulado	5
4.6.- Método de Pressler.....	6
4.7.- Densidad básica de la madera	6
4.8.- Modelos alométricos para la estimación de biomasa.....	6
4.9.- <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.....	7
4.9.1- Antecedentes de trabajos realizados	8
5.- MATERIALES Y MÉTODOS.....	12

5.1.- Área de estudio	12
5.2.- Muestreo del arbolado	13
5.3.- Cálculo de volumen a través ecuación de Pressler	13
5.4.- Cálculo de volumen a través del método de troceo simulado.....	14
5.5.- Conversión de volumen a biomasa	15
5.6. Validación de los métodos de cubicación	16
5.7.- Ajuste del modelo alométrico	16
5.8.- Comprobación de los supuestos estadísticos del modelo alométrico	17
5.9.- Validación del modelo alométrico	17
6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
6.1.- Validación de los métodos de cubicación	21
6.2.- Modelo alométrico de predicción de biomasa de fuste de <i>P. patula</i>	25
7.- CONCLUSIONES	35
8.- LITERATURA CITADA	36

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de variables de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.....	19
Cuadro 2. Estadísticos de regresión dummy para la validación de los métodos de cubicación Pressler y troceo simulado.	22
Cuadro 3. Estadísticos de ajuste en modelos de regresión que incluyeron variables tipo dummy para el método cubicación Pressler y troceo simulado.	22
Cuadro 4. Detección de observaciones influyentes reales y potenciales del modelo lineal para predecir biomasa de fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	27
Cuadro 5. Evaluación de la capacidad predictiva del modelo para predecir biomasa de fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	29
Cuadro 6. Resultados del ajuste del modelo alométrico en forma logarítmica para predecir biomasa de fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	29
Cuadro 7. Comparación de predicciones de biomasa de fuste en <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham.	32

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.....	12
Figura 2. Boxplots de las variables utilizadas para construir modelos alométricos para <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	19
Figura 3. Análisis de correlación de Pearson entre el conjunto de datos de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.....	20
Figura 4. Modelos de regresión para comparar dos métodos de cubicación de fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	23
Figura 5. Diagrama Bland-Altman, que muestra la diferencia entre los dos métodos para el cálculo del volumen.	24
Figura 6. a) Homogeneidad de varianza, b) normalidad y c) correlograma de residuales del modelo de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido Cumbre de Muridores, Hidalgo.....	26
Figura 7. Valores observados ajustados y estimados (a) y observaciones influyentes potenciales (b) del modelo de biomasa de fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.	28
Figura 8. Modelo ajustado para estimación de biomasa en fuste de <i>Pinus patula</i> Schiede ex Schltdl. & Cham. comparado con otros estudios en biomasa de fuste.	33

RESUMEN

El cambio climático es un fenómeno global que va en aumento, repuesta de las emisiones de CO₂ derivadas de las actividades humanas, lo que genera preocupación por la evaluación de los sumideros de carbono en las comunidades vegetales. Es por ello, que la cuantificación efectiva de la biomasa en especies forestales ayuda a conocer la aportación de los bosques en la regulación de las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo del presente estudio fue ajustar una ecuación alométrica para predecir biomasa del fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido Cumbre de Muridores, en el sureste de México. Se aplicó el muestreo selectivo, 166 árboles de los cuales se obtuvo el diámetro normal (Dn), altura al punto directriz (Hp), altura total (Ht) y diámetros a diferentes alturas del fuste fueron medidos con un dendrómetro electrónico Criterion RD1000®. El volumen del fuste se obtuvo mediante la ecuación de Pressler (Vp) y por troceo simulado aplicando la fórmula de Huber (VH) y tipo dendrométrico para la punta, y se transformó a biomasa por medio de la densidad básica de la madera. Se evaluaron los supuestos estadísticos en modelos de regresión (normalidad, homocedasticidad e independencia). El modelo ajustado $\ln(Bf) = -1.950 (\pm -3.660) + 2.357 (\pm 0.092) \times \ln(Dn)$ es eficiente ($p < 0.05$). donde Bf es biomasa del fuste y Dn el diámetro normal. El diámetro normal logró explicar 95 % ($R^2 = 0.95$; $p < 0.05$) de la biomasa, del fuste de *P. patula*. La cuantificación indirecta del volumen por medio de los métodos de Pressler y troceo simulado es una alternativa eficiente y de bajo costo que permiten estimar la biomasa por medio de un modelo alométrico.

Palabras clave: *Pinus patula*, método de Pressler, método de troceo simulado, modelo alométrico, densidad básica, biomasa, supuesto.

ABSTRACT

Climate change is a global phenomenon that is on the rise, responding to CO₂ emissions from human activities, which raises concerns about the assessment of carbon sinks in plant communities. That is why the effective quantification of biomass in forest species helps to know the contribution of forests in the regulation of greenhouse gas emissions. The objective of this study was to adjust an allometric equation to predict biomass of the shaft of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., in the Ejido Cumbre de Muridores, in southeastern Mexico. Selective sampling was applied, 166 trees from which the normal diameter (Dn), height to the guideline point (Hp), total height (Ht) and diameters at different shaft heights were obtained were measured with a Criterion RD1000[®] electronic dendrometer. The volume of the shaft is obtained by the Pressler equation (Vp) and by simulated chopping by applying the Huber formula (VH) and dendrometric type for the tip, and is transformed into biomass by means of the basic density of the wood. We evaluated statistical assumptions in regression models (normality, homoscedasticity and independence). The adjusted model $\ln(Bf) = -1.950 (\pm -3.660) + 2.357 (\pm 0.092) \times \ln(Dn)$ is efficient ($p < 0.05$), where Bf is biomass of the shaft and Dn the normal diameter. The normal diameter managed to explain 95 % ($R^2 = 0.95$; $p < 0.05$) of the biomass, of the shaft of *P. patula*. The indirect quantification of the volume by means of the Pressler and simulated chopping methods is an efficient and low-cost alternative that allows to estimate the biomass by means of an allometric model.

Keywords: *Pinus patula*, Pressler method, simulated chopping method, allometric model, basic density, biomass, supuesto.

1.- INTRODUCCIÓN

El cambio climático es la modificación del clima atribuido a las actividades humanas que alteran la composición de la atmósfera y provocan un impacto a nivel mundial (Díaz, 2012). Así, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) han aumentado desde la era preindustrial, alcanzando grandes concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (León y Guillén, 2020). El CO₂ se libera a la atmósfera a partir de actividades antropogénicas (quema de combustibles fósiles, procesos industriales y cambios de uso de suelo), se absorbe en océanos, suelos y ecosistemas terrestres, representando 55 % de las emisiones (Ciais *et al.*, 2013; Llebort, 2018). Se estima que en el periodo de 2008 a 2018 las emisiones antrópicas de CO₂ a la atmósfera fue de 3.6 gigatoneladas (BP PLC, 2019). El Carbono (C) se almacena en grandes cantidades en la biomasa de la vegetación forestal y en el suelo, a través de un intercambio entre la atmósfera y la vegetación por medio de la fotosíntesis y la respiración. Por medio de la estimación del carbono en la biomasa se puede determinar la contribución de los bosques en el balance de los gases de efecto invernadero (Gayoso y Guerra, 2005). Por tanto, la biomasa es la materia orgánica almacenada por debajo y encima del suelo en un ecosistema forestal, y comúnmente se divide en componentes como; raíces, fuste, ramas y hojas (Schlegel *et al.*, 2000; Fonseca *et al.*, 2009). Por consiguiente, las comunidades vegetales mantienen el potencial de captura de carbono que varía dependiendo de la composición florística, la edad y la densidad de población de cada estrato (Acosta, 2009; Bautista *et al.*, 2016).

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar el volumen, biomasa y carbono de especies forestales en función de variables de fácil medición, como el diámetro del fuste a la altura del pecho (1.3 m) y la altura total (Segura y Andrade, 2008). Por ello, en la estimación de carbono y biomasa se emplean modelos alométricos que facilitan la evaluación a pequeña y gran escala (Nogueira *et al.*, 2008; Cuenca *et al.*, 2014), los cuales además de contar con buen ajuste, deben ser validados y cumplir los supuestos estadísticos en modelos de regresión para ofrecer predicciones satisfactorias (Flores *et al.*, 2021)

Existen métodos directos e indirectos para cuantificar el carbono almacenado en la biomasa de las especies forestales. Los métodos directos requieren de muestreo destructivo para estimar el volumen, biomasa y carbono por cada componente del árbol (Cuenca *et al.*, 2014; Montes *et al.*, 2020; Flores *et al.*, 2021), mientras que los indirectos usan procedimientos de cubicación para obtener la biomasa sin derribar los árboles (Cuenca *et al.*, 2014). En este sentido, existen alternativas de bajo costo como el troceo simulado (Salas *et al.*, 2005; Valencia *et al.*, 2017) y el método de Pressler (García *et al.*, 2019) el cual permite obtener el volumen de árboles en pie a partir de la altura del punto directriz (Hp) y diámetro normal (Dn). En algunos estudios (Paia *et al.*, 2016; Valencia *et al.*, 2017; García *et al.*, 2019; Curto *et al.*, 2019) se ha expresado que el método de Pressler permite estimar el volumen con diferencias mínimas en relación al volumen real. En ese sentido, la densidad básica de la madera se define como la relación del peso de la madera seca y su volumen verde (Rojas y Villers, 2005; Núñez, 2007) y permite conocer la biomasa presente en el volumen. Por otro lado, *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., representa un alto valor económico en bosques naturales y plantaciones forestales comerciales (Gillespie, 2000), sin embargo aún existe ausencia de información que mejore la validación de modelos para estimar biomasa mediante métodos indirectos

2.- OBJETIVOS

2.1.- Objetivo general

Ajustar una ecuación alométrica para predecir biomasa del fuste en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido Cumbre de Muridores, Hidalgo, México.

2.2.- Objetivos específicos

Comparar dos métodos de estimación de volumen de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

Estimar la biomasa del fuste de árboles de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., a través de la fórmula de Pressler y la densidad básica de la madera.

3.- HIPÓTESIS

H₀: El modelo alométrico es eficiente para la evaluación de biomasa en el fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

H_a: El modelo alométrico es ineficiente para la evaluación de biomasa en el fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

4.- REVISIÓN DE LITERATURA

4.1.- Cambio climático

El cambio climático global (CCG) es la variación del clima provocado de manera natural y por las actividades humanas que modifican la composición de la atmósfera (Díaz, 2012). El CCG afecta al funcionamiento de los ecosistemas y sus componentes (Montiel *et al.*, 2021), no obstante los gases de efecto invernadero (GEI), son los componentes naturales de la atmósfera que absorben y emiten radiación (Benavides y León, 2007) y mismos que han aumentado de 280 a 416 ppm en los últimos 270 años (Luna *et al.*, 2021). Aranda *et al.* (2018) describen que para la mitigación de los efectos provocados por CO₂ es necesario mantenerlo almacenado en la biomasa vegetal, que se da por medio de la fotosíntesis.

La intranquilidad en el aumento de CO₂ ha originado la investigación y el estudio de los procesos biológicos en los bosques (Aguilar, 2011). Uno de los aspectos de mayor relevancia sobre el estudio de los bosques es la capacidad de los mismos para el almacenamiento y retención de carbono por medio de la biomasa (Razo *et al.*, 2013).

4.2.- Carbono

El carbono es un elemento fundamental de los compuestos orgánicos que se almacena en los árboles. La unión de carbono con el oxígeno genera el dióxido de carbono (Marroquín, 2019). Por otro lado, el secuestro de CO₂ se da por medio de la fotosíntesis y se almacena en la biomasa y suelo, por lo que debido a la capacidad de retención de los bosques de este elemento se les denomina sumideros (Casiano *et al.*, 2018). La estimación del carbono en la biomasa forestal se realiza por medio de modelos alométricos, que relacionan variables de difícil medición (biomasa, volumen, carbono, etc.) con parámetros de fácil obtención (Diámetro normal, Altura, Área basal, etc.)

4.3.- Biomasa

La biomasa es el contenido de materia orgánica almacenada dentro y sobre el suelo en un ecosistema forestal, comúnmente se divide en componentes como; raíces, fuste, ramas y hojas (Schlegel *et al.*, 2000; Fonseca *et al.*, 2009). La estimación de biomasa vegetal es indispensable para cuantificar el carbono almacenado por los ecosistemas forestales (Escobar y Maass, 2008) y la contribución de estos últimos en la mitigación del cambio climático (Fonseca, 2017). La distribución y almacenamiento de la biomasa pueden estar influenciados por factores como: desarrollo del rodal, edad, calidad del sitio, composición de especies, variables ambientales, densidad del rodal y prácticas silvícolas aplicadas. Así mismo, varía en cada componente del árbol (Rodríguez *et al.*, 2012; Chavez *et al.*, 2016)

4.4.- Criterion RD@1000

Es un dendrómetro electrónico que integra un visor y un sensor de inclinación, que permite evaluar el diámetro en cualquier punto a lo largo del fuste (De Eugenio *et al.*, 2018), es una alternativa de medición indirecta que sustituye al relascopeo de Biterrlich (Biazatti *et al.*, 2020), reduciendo el tiempo de operación y permitiendo la evaluación óptima de las variables a una distancia similar a la altura del árbol (Rodríguez y Fernández, 2009).

4.5.- Troceo simulado

La mayoría de las especies forestales no siguen una regularidad en el diámetro a lo largo del fuste (Biazatti *et al.*, 2020), es por ello que las ecuaciones de cubicación de especies forestales se construyen a través de muestreos destructivos para obtener una aproximación lo más exacta posible de las dimensiones y morfología del árbol, lo que tiene un alto costo operacional y ecológico (Salas *et al.*, 2005). De forma contraria, existen instrumentos de medición indirecta (relascopeo y dendrómetros electrónicos) que facilitan la obtención de dimensiones sin realizar el derribo, reduciendo esfuerzo y tiempo de operación (López, 2000; Salas *et al.*, 2005). A dicha técnica se le llama troceo simulado y se basa en tomar diámetros a diferentes alturas del fuste (p. ej. 0.3, 1.3, 2, 4, 6, 8, 10, ... n , m). El volumen se estima a partir de la cubicación de cada troza o segmento simulado (sumando al final todos los segmentos), mientras que para la cubicación se pueden emplear las fórmulas de Smalian,

Huber, cono truncado y Newton (Larrea *et al.*, 2008; Riaño y Lizarazo, 2017; Salazar *et al.*, 2021).

4.6.- Método de Pressler

Max Robert Pressler desarrolló una fórmula de cubicación de gran precisión para sólidos en revolución (no cilíndricos) que se aplica a fustes completos y que estima el volumen a partir del altura del punto directriz y diámetro normal (Ajuria, 2016). Al respecto, García *et al.* (2019) señalan que la fórmula de Pressler, permite obtener el volumen de árboles en pie con diferencias mínimas en relación al volumen real, mismo que es apoyado por Valencia *et al.* (2017) quienes indicaron ausencia de diferencia significativa entre el volumen obtenido con la ecuación de Pressler y el volumen real.

Si bien el método de Pressler es confiable para obtener el volumen del fuste de especies de coníferas, la desventaja que presenta, se refleja en la evaluación de la variable H_p que obliga a utilizar un relascopio (telerascopio) de Bitterlich o algún modelo de dendrómetro electrónico, que permita una rápida evaluación de la variable.

4.7.- Densidad básica de la madera

La relación que existe entre la masa y una unidad de volumen suele conocerse como densidad básica (Panshin y De Zeeuw, 1970), así mismo la densidad de la madera es contenido relativo de los diferentes elementos celulares (vasos, traqueidas, fibras, células del parénquima), misma que varía de acuerdo al tamaño de las células, grosor de las paredes celulares y de la proporción de los diferentes tejidos contenidos en el volumen de la madera (Zobel y Talbert, 1984). Los métodos empleados para obtener la densidad básica de la madera son: método empírico, método de desplazamiento de agua y Método de máximo contenido de humedad (Valencia y Vargas, 1997). Por medio de la densidad básica de la madera de una especie se puede contemplar la biomasa rodal (Valencia y López, 1999), aunque de igual manera se puede emplear de forma individual, esta técnica indirecta de estimación de biomasa se obtiene por medio del volumen (Silva y Návar, 2019).

4.8.- Modelos alométricos para la estimación de biomasa

Una manera de estimar la biomasa en especies forestales de manera indirecta es mediante ecuaciones alométricas (modelos) sometidas a un análisis de regresión lineal, no lineal o

exponencial (Marroquín *et al.*, 2018). Por tanto, un modelo alométrico es definido como una ecuación matemática que permiten estimar el volumen, biomasa y carbono de especies forestales. La mayoría de las ecuaciones o modelos alométricos emplean como variable independiente al diámetro normal y establecen una relación con esta variable y la biomasa de los componentes del árbol (Gómez *et al.*, 2011).

La elección de una ecuación o modelo alométrico varía radicalmente de la especie y del crecimiento (Martínez *et al.*, 2020). Además, el modelo debe cumplir los supuestos estadísticos de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de los errores, los cuales indican la calidad de predicción de la variable dependiente (Jiménez *et al.*, 2020). Por ello es importante que los residuos derivados de la predicción presenten una distribución normal o cercana a la normalidad (Vilá *et al.*, 2019), varianzas homogéneas u homocedasticidad (Álvarez, 2021) y que sean independientes entre sí (Murillo, 2008).

La validación de un modelo consiste en juzgar la predicción a partir de datos nuevos que aún no conoce, es por ello que se debe evaluar la capacidad predictiva del modelo. Algunos de los métodos más comunes son: Leave One Out Cross Validation (LOOCV), K-fold cross-validation y Repeated K-fold cross-validation, apoyan a una buena precisión por medio de error cuadrático medio (RMSE) derivado de las predicciones (Laura, 2019). En este sentido, tomar subconjuntos de datos para entrenamiento (ajuste) y validación ayudan a obtener una mejor estimación del rendimiento del modelo, un menor valor de RMSE y baja varianza (Amat, 2016).

4.9.- *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham

Es una de las principales coníferas maderables endémicas de México que se distribuye en clima templado sobre bosque mesófilo de montaña y bosques templados (CONAFOR, 2010; CONABIO, 2021) Debido a su rápido crecimiento, buena conformación de copa, fuste recto y madera de calidad (Nyoka, 2002) se considera una especie de potencial productivo bajo condiciones naturales y plantaciones forestales comerciales (Gillespie, 2000). Su distribución natural se da sobre las formaciones montañosas del Eje Neovolcánico, la Sierra Madre Oriental y Sierra Madre de Oaxaca, en los estados de Hidalgo, Puebla y Veracruz donde las poblaciones tienen un óptimo desarrollo. También se puede encontrar en los estados de Nuevo León, Tamaulipas, Oaxaca, Querétaro, Tlaxcala y Estado de México (Pérez *et al.*,

2013). A pesar de la importancia económica que representa *P. patula*, hay ausencia de información que mejore la validación de modelos alométricos para estimar biomasa y calidad de las investigaciones. Debido a que los estudios sobre esta especie no cuentan con los requisitos (supuestos) y la validación de los modelos.

4.9.1- Antecedentes de trabajos realizados

Salas et al. (2005) emplearon el troceo simulado hasta 6 m de altura en las especies; *Aextoxicon punctatum* Ruiz & Pav., *Nothofagus obliqua* (Mirb.) Oerst., *Eucryphia cordifolia* Cav., *Laurelia sempervirens* (Ruiz & Pav.) Tul. y *Persea lingue* Nees. El volumen real se obtuvo mediante forcípula tradicional para volumen real, forcípula finlandesa y relascopio de Bitterlich, cuyos principales resultados demostraron que la forcípula finlandesa sobreestima en medición y volumen - 2.2 y -2.4 %, mientras que el relascopio de Bitterlich solo mostró un sesgo de -0.5 % en volumen.

Paia et al. (2016) aplicaron el método de Pressler y ocho métodos de cubicación más para 98 árboles de *Pinus taeda* Linneo., de 9, 13 y 20 años edad en Brasil. Las categorías presentes fueron de 10 a 45 cm y las alturas 11 a 28 m. Se aplicó la prueba de homogeneidad de Bartlett, un análisis de varianza para todas las edades y la prueba de Tukey al 5% de significancia para comparar los promedios de los volúmenes. El volumen obtenido de los métodos de Pressler, Smalian, Newton, Huber, Seccional Estándar, Hohenadl (5 secciones), Hohenadl (10 secciones), FAO y relativo 19 secciones se comparó con el volumen real (xilómetro). Los resultados obtenidos demostraron que, para la edad de 9 y 13 años, el método Huber, Pressler y Seccional Estándar presentaron los menores desvíos comparados con el volumen real, mientras que a la edad de 20 años el método de Hohenadl (5 secciones) presentó la mejor precisión, seguido de los métodos de Huber, Seccional Estándar y Pressler.

Por otro lado, Valencia *et al.*, (2017) emplearon el método de Pressler, una ecuación de predicción y tipos dendrométricos para la cubicación de 134 árboles de la especie *Pinus Patula* Var. *longepedunculata* Look ex Martínez en Santiago Textitlán, Oaxaca. Las categorías diamétricas presentes fueron de 5 a 75 cm con un volumen real de 0.0212 y 8.4241 m³. Se aplicó la prueba de medias de t-Student y prueba F del análisis de varianza mediante diseño completamente al azar para la comparación de los diferentes métodos. Los resultados

arrojaron que no hay diferencias estadísticas significativas ($p \leq 0.05$) entre el volumen obtenido con el método de Pressler y el volumen de los métodos empleados.

Curto et al., (2019) utilizaron el método de Pressler, Hossfeld, factor de forma y troceo simulado para la cubicación de 20 árboles de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maid \times *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake (clon H13), en Inop, Mato Grosso, Brasil. El método de Hosfeld ($Vh = \frac{3}{4} * \frac{1}{3} * h$) consta de obtener el área de la sección transversal del diámetro a 1/3 de la altura del árbol y altura total. Los resultados mostraron que los métodos Hossfeld y Pressler; tienden a subestimar y sobreestimar el volumen, mientras que el método de troceo simulado es el más preciso y el método de factor de forma es una alternativa viable para cuantificar con precisión.

A si mismo Flores et al., (2021) aplicaron el método de Pressler para la cubicación de 108 árboles de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco en un bosque sin manejo en la Sierra de Arteaga Coahuila, México, las variables diámetro normal, altura total y punto directriz se evaluaron con dendrómetro Criterion RD[®]1000. El rango diamétrico fue de 10 a 90 cm, mientras que las alturas fueron 5 a 36 m. Se ajustaron, validaron y comprobaron los supuestos estadísticos del modelo alométrico en su forma lineal y potencial para la estimación de biomasa en fuste. Los resultados obtenidos fueron satisfactorios al mostrar que el modelo expresa el 98 % de la biomasa empleando el diámetro normal.

Martínez et al., (2020) ajustaron cinco modelos alométricos para estimar la biomasa total de *P. patula* en un bosque de pino-encino de Ixtlán de Juárez, Oaxaca, para lo cual se realizó un análisis destructivo de 25 árboles distribuidos en las clases diamétricas de 5 a 25 cm, con alturas que rondan de 4.3 a 20 m. Se cumplió el supuesto de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (White).

El mejor modelo fue el propuesto por Brown y col. (1989) con un valor de $R^2 = 0.988$. Los resultados demostraron que el 69.61 % de la biomasa se almacena en el fuste, el 22.62% en la raíz, el 5.67% en las ramas y el 2.11%, en el follaje, los modelos propuestos permiten estimar la biomasa total y por componentes y se recomienda su uso en *P. patula* en categorías diamétricas y condiciones de crecimiento similares.

Soriano et al., (2015) ajustaron modelos en su forma de variable combinada escalada para la predicción de biomasa por componentes (fuste, ramas, follaje y corteza) en *P. patula* y 11 especies de latifoliadas en un rodal de bosque mesófilo de montaña en Zacualtipán, Hidalgo, México. Para lo cual se realizó un muestreo destructivo 25 árboles de *P. patula* y 46 árboles de latifoliadas, las variables evaluadas fueron diámetro normal, altura total. Los diámetros de las secciones del fuste que variaron de 1.75 a 2.55 m, el diámetro 2.6 a 73 cm y la edad de los árboles osciló de 3 a 87 años. Los resultados mostraron que la biomasa promedio del fuste en *P. patula* fue de 68.2 %, ramas (14.3 %), corteza (9.3 %) y follaje (8.2 %), mientras que para latifoliadas se concentró 49.1 % en el fuste.

Chávez et al., (2016) ajustaron modelos alométricos para conocer la biomasa aérea total (fuste, ramas, follaje y corteza) acumulada para *P. patula*, en diferentes rodales cuales les fue aplicado la corta de regeneración, se tomó como testigo un bosque de 80 años sin manejo silvícola. Se evaluaron y etiquetaron todos los individuos con una altura ≥ 1.3 m y diámetro normal ≥ 2.5 cm, en los años 2005, 2008 y 2012. La biomasa aérea total y por componente estructural fue estimada con los modelos de biomasa generados para la misma área de estudio propuestos por Soriano et al. (2015). Los resultados obtenidos mostraron que la biomasa aérea total aumentó después del aprovechamiento con diferencias significativas ($p < 0.0001$) entre los rodales, así también el rodal con 30 años después al aprovechamiento reportó 178.1 Mg/ha biomasa aérea total, lo cual resultó ser 20% menor a la observada en área de referencia (rodal sin tratamiento silvícola). Por otro lado, la asignación de biomasa en el fuste se mantuvo constante, entre 70 % y 71 %, aunque en el rodal sin tratamiento silvícola la biomasa se encontró en un 66 %. Por lo que se concluyó que los bosques de *P. patula* bajo aprovechamiento (corta de regeneración) podrían alcanzar a los 30 años niveles de biomasa similares a un rodal sin manejo.

Rodríguez et al., (2019) ajustaron modelos para la estimación de biomasa en biomasa por componentes estructurales de *P. patula* en fase de vardascal, así como de los compartimentos (necromasa, mantillo, arbustos y follaje caído) en las áreas tratadas con matarrasa en Ixtlán de Juárez, Oaxaca. Se realizó el muestreo destructivo de 90 árboles para obtener las variables diámetro normal, altura total, longitud de fuste limpio, longitud de copa viva. El fuste del árbol fue seccionado en trozas de 1 m hasta el ápice y se calculó volumen utilizando el

método de trozas traslapadas. Se comprobó los supuestos de normalidad (Shapiro-Wilk) y homogeneidad de varianzas (Bartlett).

Los resultados obtenidos mostraron que el modelo para estimar biomasa en fuste y total fue sobresaliente, ($R^2= 0.97$) con estimadores confiables ($p \leq 0.0001$), mientras que, para ramas, hojas y raíces el ajuste fue menor en el modelo no lineal (0.80, 0.79 y 0.92), Así mismo la mayor cantidad de biomasa se encuentra en el fuste (82.46 %), sin embargo en las ramas se estimó (1.57 %), en las hojas (1.43 %) y raíces (14.52 %), lo que dio pauta a describir que los modelos ajustados para estimar biomasa total y por componentes estructurales son adecuados y confiables.

5.- MATERIALES Y MÉTODOS

5.1.- Área de estudio

El presente estudio se realizó en un rodal (Fig. 1) de bosque mesófilo de montaña en el Ejido Cumbre de Muridores, San Bartolo Tutotepec, Hidalgo. El Ejido se ubica en latitud N $20^{\circ} 20' 49.83''$, longitud O $98^{\circ} 19' 29.73''$ y una altitud de 2,430 m (Salaya *et al.*, 2012).

El clima es Cm (templado húmedo) con temperatura media anual entre 12 y 18 °C (García, 1998). La precipitación media anual varía de 1200 a 1500 mm (Vidal, 1990). La vegetación que domina es bosque mesófilo de montaña (INEGI, 2016), el suelo regosol distrito (INIFAP-CONABIO, 1995) que se caracteriza por ser delgado con textura fina, poco desarrollado sobre material no consolidado y generalmente sobre topografía accidentada (SEMARNAP, 1996).

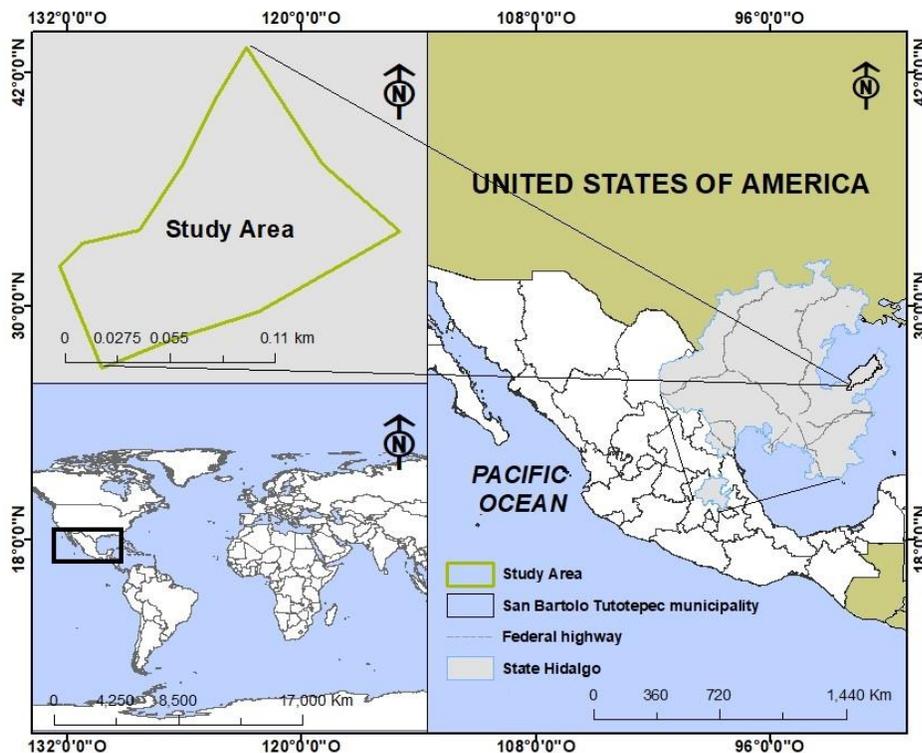


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio

5.2.- Muestreo del arbolado

Se aplicó un muestreo selectivo a 166 árboles de *P. patula*. Se consideraron todas las categorías diamétricas presentes en el área de estudio. Se seleccionaron árboles con fuste recto, sin daños, sin malformaciones, sin resinación y libres de plagas enfermedades (Hernández *et al.*, 2019; Flores *et al.*, 2021).

Con ayuda de un cinta metrica marca Surtek, modelo CLFV20 (20m) se midió la distancia horizontal “x” entre el árbol y el observador y con el dendrómetro electrónico marca Criterion RD1000® (Laser Technology, Inc, Centennial, CO, EUA) Se midió el diámetro normal a 1.3 m (Dn), altura del punto directriz (Hp); donde se ubica la mitad del Dn y altura total (Ht), al introducir la distancia horizontal y ajustar la banda láser vista por medio del visor. Las variables obtenidas se utilizaron para obtener en volumen de Pressler; la inclusión de la evaluación de las variables y la ecuación de cubicación se les conoce como método de Pressler.

De esos árboles, se tomó una submuestra de 21 individuos para obtener el volumen a través de troceo simulado (en pie) con ayuda del dendrómetro electrónico marca Criterion RD1000® (Laser Technology, Inc, Centennial, CO, EUA) mediante la misma tecnica empleada en el metodo de Pressler, las trozas simuladas fueron a las siguientes alturas del fuste: ras de suelo, 0.3, 1.3, 3.3, 5.3, 7.3, 9.3, ... n, m, posteriormente fueron cubicadas mediante la formula de Huber a excepcion de la punta, cual se cubicó con la fórmula del cono.

5.3.- Cálculo de volumen a través ecuación de Pressler

Para la estimación del volumen de árboles en pie, la fórmula de Pressler resulta práctica (Valencia *et al.*, 2017), es exacta para el cono, paraboloides y muy aproximada para el neiloide (Diéguez *et al.*, 2005).

$$Vp = \frac{2}{3} * g * p \quad (1)$$

$$g = \frac{(Dn)^2}{100} * \frac{\pi}{4} \quad (2)$$

$$P = Hp + 1.95 \quad (3)$$

Donde:

Vp = Volumen de Pressler (m^3).

g = Área basal del árbol (m^2).

P = Altura de Pressler (m).

Hp = Altura del punto directriz (m).

La ecuación (1) fue propuesta por Robert Pressler para sólidos en revolución no cilíndricos aplicada para la cubicación de árboles en pie. A través de la cual se obtiene el volumen de Pressler (Vp) para fustes completos (McTague, 1992; Ajuria, 2016; Fernandes *et al.*, 2017; Garcia *et al.*, 2019; Flores *et al.*, 2021).

5.4.- Cálculo de volumen a través del método de troceo simulado

A partir de la simulación de trozas a lo largo del fuste (ras de suelo, 0.3, 1.3, 3.3, 5.3, 7.3, 9.3, ... n, m) con ayuda del dendrómetro electrónico. Se empleó la fórmula de Huber para estimar el volumen para todas las secciones simuladas de 0.3, 1 y 2 m , basándose en que la fórmula de Huber como Smalian son precisas para estimar el volumen de árboles individuales (Corral y Návar, 2009).

$$VH = \frac{\pi}{4} * dm * l \quad (4)$$

$$Vcono = \frac{Sb * h}{3} \quad (5)$$

Donde:

VH = Volumen de Huber (m^3).

dm = Diámetro medio de la sección (cm).

l = Largo de la troza (m)

$Vcono$ = Volumen de cono (punta) (m^3).

Sb = Área de la base del cono (m^2).

h = Altura del cono (m).

Se aplicó la fórmula del cono (Ec. 5) para evaluar el volumen en la punta del árbol por ser el tipo dendrométrico al que se asemeja y en cuyas secciones la fórmula Huber y Smalian son poco precisas. El volumen total por individuo fue la suma del volumen de cada troza simulada más el volumen de la punta.

5.5.- Conversión de volumen a biomasa

Se consideró la densidad básica de la madera propuesta por Goche et al., (2003) con valores de 0.45 y 0.44 g / cm³ para una calidad de estación alta antes y después del aclareo en la comunidad El Reparó y 0.47 y 0.44 g / cm³ para una calidad de estación baja antes y después del aclareo en la comunidad El Aguaje, ambas en el estado de Hidalgo, así mismo Goche et al., (2011) con un media general de 0.4602 g / cm³, para las comunidades El Reparó, Tres Fracciones de Fondones y El Aguaje ubicadas en el estado de Hidalgo. El promedio de las densidades básicas obtenidas en sus estudios cercanos al área de estudio fue 452 kg/m³. El volumen fue transformado a biomasa al multiplicar el volumen por el promedio de la densidad básica (452 kg/m³) obtenida de los estudios antes mencionados.

Se ha observado que las variables dasométricas logran una buena explicación de la biomasa (Picard, 2012), específicamente el diámetro normal que es conocido por su estrecha relación con la biomasa y otras variables (Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Návar, 2009; Flores *et al.*, 2011; Picard, 2012; Razo *et al.*, 2013; Rojas *et al.*, 2015; Díaz *et al.*, 2017; Flores *et al.*, 2021). Por lo anterior, se ajustó una ecuación alométrica en su forma potencial (Ec.) en su forma lineal (Ec.7) con el diámetro normal (variable independiente) y biomasa (variable dependiente).

Por otro lado, el ajuste de las ecuaciones en su forma logarítmica (Ec. 7) ayuda a reducir la heterocedasticidad (Sprugel, 1983) y es consistente para distintas formas de crecimiento (Díaz *et al.*, 2007).

$$Bf = \beta_0 Dn^{\beta_1} \quad (6)$$

$$\ln(Bf) = \ln(\beta_0) + \beta_1 \ln(Dn) \quad (7)$$

Donde:

Bf = Biomasa del fuste (kg).

Dn = Diametro normal (cm).

β_0, β_1 = Coeficientes de regresión.

ln = Logaritmo natural.

5.6. Validación de los métodos de cubicación

Se validaron dos métodos de cubicación de volumen (Pressler y troceo simulado) con una submuestra de 21 árboles de *P. patula* usando un análisis de regresión con variables tipo Dummy, siendo la biomasa (en logaritmo) la variable dependiente y la variable Dummy el tipo de troceo (0 y 1 respectivamente). La finalidad de la validación fue verificar que el método de Pressler para el cálculo de volumen fuera adecuado, y con ello poder sugerir o no el modelo.

Se realizó también una prueba de homogeneidad de varianzas, con el método de Fligner-Killeen (95 %) entre los volúmenes obtenidos con ambos métodos, para verificar la validez del método de Pressler, para calcular volumen de fuste. Adicionalmente, se calculó el tamaño del efecto (la d de Cohen) que es la diferencia neta observada entre los grupos de un estudio.

5.7.- Ajuste del modelo alométrico

El modelo se ajustó en el Software R Core Team, (2021) mediante la función $lm(x \sim y)$, donde la variable independiente fue logaritmo natural del diámetro normal (x) y la dependiente logaritmo natural de biomasa (y), para lo cual la base de datos 100 % (166 observaciones) fue dividida en *test data* 18.7 % (31 datos de prueba) y *train data* 81.3 % (135 datos para entrenamiento), mismas con las que se ajustó y validó internamente el modelo.

La función de R *summary* nos permitió conocer la distribución de los residuos del modelo (valores mínimos, 1er, 2do y 3er cuartil y valor máximo), los coeficientes estimados por el modelo (β_0 y β_1), el error estándar de los residuos y los valores de R^2 , múltiple y ajustado y el p-value del estadístico F (usualmente menor que 0.05). Los intervalos de confianza (2.5 %

a 97.5 %) se conocieron con la función de R *confint.lm* cuanto mayor es la confianza, más amplio el intervalo mientras que es más común usar un intervalo de confianza del 95%.

5.8.- Comprobación de los supuestos estadísticos del modelo alométrico

Se verificó el cumplimiento de los supuestos estadísticos de normalidad, homogeneidad de varianza e independencia de errores de la regresión lineal para predecir la biomasa de *P. patula*, lo cual es importante para demostrar si el modelo estimará de manera correcta o no la variable. Se realizó de la prueba de Lilliefors Kolmogorov-Smirnov por medio con la función de *lillie.test* del paquete *nortest* (Gross y Ligges, 2015) y Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965) se realizó con la función *shapiro.test* del mismo paquete y mediante estas pruebas se comprobó la normalidad (Pedrosa *et al.*, 2015; Flores *et al.*, 2021). La homogeneidad de varianza se evaluó a través de Breusch-Pagan (Breusch y Pagan, 1979; Zeileis y Hothorn, 2002) por medio de la función *bptest* del paquete *lmtest* (Harel, 2017). La independencia de los errores se verificó por medio de la prueba de Durbin-Watson (Durbin y Watson, 1971) con la función *dwttest* del paquete *nortest*. Así mismo, mediante el paquete *stats* se hizo el diagnóstico de observaciones atípicas e influyentes (Fox y Weisberg, 2019; Flores *et al.*, 2021) que pudieran afectar la estimación de la biomasa. Las pruebas anteriores se realizaron mediante el Software R Core Team, (2021).

5.9.- Validación del modelo alométrico

En base a 31 observaciones de prueba (18.7 %) se comprobó el desempeño predictivo del modelo mediante tres métodos: El método validación cruzada (Leave One Out) empleó 30 datos y excluyó uno como validación repitiéndose el proceso para cada dato contenido en el conjunto de datos de prueba (31 veces). Mediante el proceso se calculó el error cuadrático medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y un valor medio de ajuste (R^2).

De igual manera se empleó la validación cruzada de K-Fold, donde $K= 10$ folders o sets y $n = 31$ así mismo $K-1$ se empleó como predictor, en el proceso se calculó el error cuadrático medio (MAE), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y un valor medio de ajuste (R^2).

Así mismo se empleó la validación cruzada (repetida de K-Fold), siendo igual a K-Fold pero se repitió el proceso completo 3 veces. Todos los análisis para construir la ecuación alométrica, su validación y gráficos se realizaron R Core Team (2021).

6.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se evaluaron 166 árboles de *P. Patula*, cuyos diámetros oscilaron de 12.5 y 62 cm (Cuadro 1) contemplados en las categorías diamétricas de 10 a 60 cm. La altura máxima registrada fue de 34.7 m y la mínima de 5.90 m; el árbol más grande registró 1,478.57 kg (3.29 m³) de biomasa y 6.79 kg (0.63 m³) el más pequeño. Así mismo, la biomasa fue muy variable al mostrar un coeficiente de variación (CV) de 103.11 %, mientras que el diámetro y altura varían entre 41 y 28%.

En *P. patula*, Martínez et al., (2020) ajustaron ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea y subterránea (Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México), utilizando 25 árboles, para lo cual reportaron categorías diamétricas de entre 5 y 25 cm y alturas que van de 4.30 a 20.18 m, en este sentido la biomasa obtenida en la categoría mínima fue de 0.109 kg y en la categoría de 25 cm fue 423.96 kg de biomasa fustal en contraste con el presente estudio se revela que existe una sobrestimación de 143 kg de biomasa de fuste en la categoría de 25 cm y una subestimación de 4 kg en la categoría mínima, si bien el comportamiento de predicción de biomasa fustal está ligado al crecimiento de los individuos, dado que la el modelo empleado por el autor incorpora la variable altura total.

Por otro lado Rodríguez et al., (2019) ajustaron modelos para la estimación de biomasa por componentes estructurales de *P. patula* en fase de vardascal, en áreas tratadas con matarrasa (Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México), para la categoría de 15 cm estimaron 113 kg de biomasa fustal representando una sobrestimación de 29 kg con respecto al presente estudio en la misma categoría, así mismo se encontró una subestimación de 640 kg biomasa del fuste en la categoría de 60 cm. Las diferencias (sobrestimación) se asocian a que el modelo empleado fue ajustado para diámetros menores a 10 cm aunado a que el modelo incorpora la altura total.

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de variables de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

Variable	Media \pm IC	Min	Max	Q ₁₀	Mediana	Q ₉₀	DE	CV (%)
Dn (cm)	27.33 \pm 1.71	12.50	62.00	16.05	23.50	43.50	11.18	41.00
Hp (m)	11.07 \pm 0.37	5.50	17.30	8.40	10.90	14.35	2.44	22.10
Ht (m)	19.43 \pm 0.82	5.90	34.70	13.00	19.10	25.90	5.34	28.00
Vol (m ³)	0.59 \pm 0.93	0.63	3.29	0.13	0.34	1.40	0.61	103.11
Bf (kg)	265.9 \pm 42.01	28.29	1487.57	60.64	153.16	632.68	274.16	103.11

Dn: diámetro normal, Hp: altura del punto directriz, Ht: altura total, Vol: volumen del fuste, Bf: biomasa de fuste, IC: intervalo de confianza de la media, Q₁₀ y Q₉₀: cuantiles de la variable, DE: desviación estándar, CV: coeficiente de variación.

Se emplearon gráficos de caja (boxplots) y de densidad (gráficos de violín) para cada una de las variables (Fig. 2). El resultado mostró que hay una distribución sesgada a la derecha para el diámetro normal (Fig. 2a), la altura de Pressler (Fig. 2b) y la biomasa (Fig. 2d) mientras que la altura total (Fig. 2c) se aproximó a una distribución normal. Por otro lado Chimbo, (2016) evaluó carbono en la biomasa de las especies *Eucalytus globulus* Labill, *Pinus Radiata* D. Don y *Hesperomeles ferruginea* (Pers) Benth. en el Bosque Aguarongo, Ecuador, para lo cual empleó diagramas de cajas para reportar las medianas de los resultados obtenidos, sin embargo, es importante el análisis preliminar de las variables evaluadas.

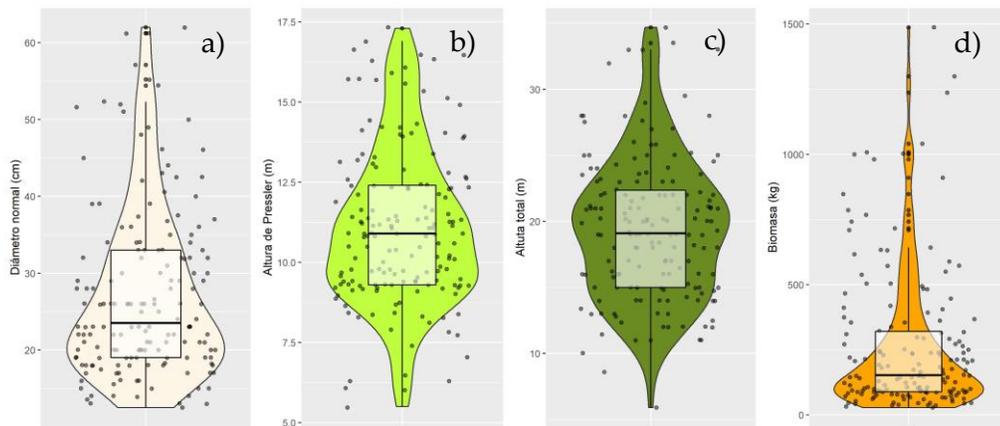


Figura 2. Boxplots de las variables utilizadas para construir modelos alométricos para *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

La matriz de correlación de Pearson, permitió analizar la relación entre variables (Fig. 3). El Diámetro normal ($r = 0.96$) está significativamente ($p < 0.05$) correlacionada con la biomasa, sin embargo las variables no cumplieron una distribución normal, en este sentido es conveniente transformar las unidades originales a logarítmicas para que el modelo cumpla los supuestos (Guillen y Acuña, 2014) y disminuya la varianza. En relación al presente estudio, se logra concluir que al aumentar el diámetro normal aumenta la biomasa y al disminuir el diámetro normal de igual manera disminuye la biomasa, varios autores apoyan que hay una buena correlación entre el diámetro normal y la biomasa de *P. patula*. Por otro lado Wei y Gutiérrez, (2013) reportan que existe una correlación casi perfecta empleando diámetro normal, densidad y altura total con la biomasa en las 43 especies de los dos bosques estudiados (primario y secundario), mientras que Yana, (2019) reporta un valor de $r = 0.931$, lo que indica que la biomasa está correlacionada con diámetro normal de *Cassia hookeriana* Gill, *Cupressus macrocarpa* Hartw, *Cytisus canariensis* (L) O. Kuntze, *Pinus radiata* D. Don, *Polylepis incana* HBK, *Salix babylonica* Linneo, lo que da pauta para describir que en el presente estudio la biomasa está fuertemente influenciada por el comportamiento de Dn de *P. patula*.

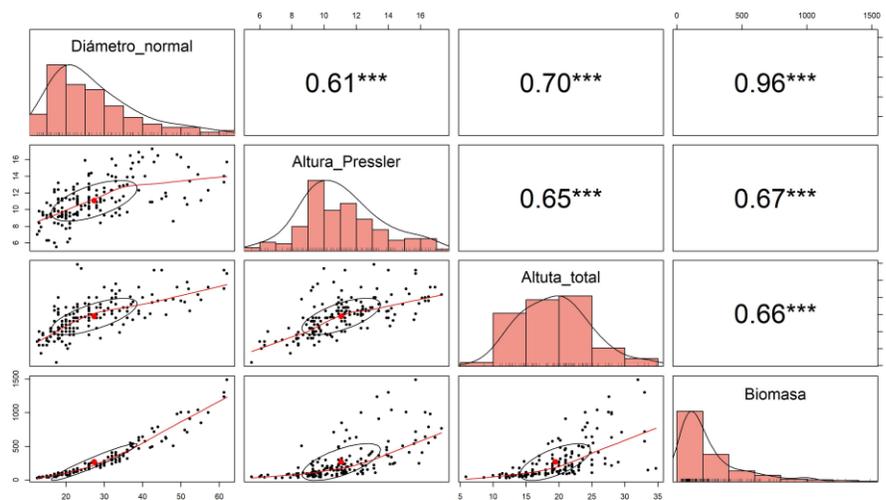


Figura 3. Análisis de correlación de Pearson entre el conjunto de datos de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

6.1.- Validación de los métodos de cubicación

Se realizó la validación del método de Pressler y troceo simulado a través del análisis de regresión Dummy (Cuadro 2 y 3), se empleó una recta de regresión representando ambos métodos ($R^2 = 0.96$), los coeficientes resultantes demostraron ser significativos ($p < 0.001$) donde $\beta_0 = -8.94$ representa el intercepto, $\beta_1 = 2.46$ la pendiente de la línea de regresión.

La evaluación por separado de cada método representado por una recta de regresión mostró que la pendiente es igual en ambos métodos al obtener el valor de $p = 0.842$ no significativo y un coeficiente de determinación alto $R^2 = 0.96$ en el método de troceo simulado, en este contexto se analizaron las rectas por separado donde se incluyó la variable $\ln D_n$ del método de troceo simulado $p = 0.482$ y el método de troceo simulado $p = 0.507$, los valores arrojaron que el intercepto es igual para ambos casos, lo que evidencia que en ambos métodos presentan la misma pendiente y el mismo intercepto (Fig. 4) indicando que ambos métodos de cubicación presentan estimaciones volumétricas estadísticamente similares.

La prueba de Fligner-Killeen de homogeneidad de varianza, arrojó un valor de Chi cuadrada de 0.050353 y un valor de p de 0.8225; es decir el estadístico no encuentra evidencias significativas ($\alpha=0.05$) de que las varianzas sean distintas entre ambas poblaciones; es decir, el volumen con ambos métodos es estadísticamente igual.

Adicionalmente, se calculó el tamaño del efecto (la d de Cohen) que es la diferencia neta observada entre los grupos de un estudio. Se trata de un parámetro que siempre debe acompañar a los p -values, ya que un p -value solo indica si hay evidencias significativas para rechazar la hipótesis nula pero no dice nada sobre si la diferencia es importante o práctica. Los resultados arrojaron un valor de $d = -0.0110486$, con un límite inferior de -0.6053526 y superior de 0.5832554 , considerado como efecto mínimo. Por lo tanto, se concluye que no existen diferencias entre métodos de cubicación.

Cuadro 2. Estadísticos de regresión dummy para la validación de los métodos de cubicación Pressler y troceo simulado.

Coeficientes	Estimados	Error Std.	Valor t	Pr(> t)	I. C.	I. C.
					2.50%	97.50%
Misma recta de regresión para ambos métodos						
β_0 (Intercepta)	-8.9447	0.2427	-36.86	<2e-16 ***	-9.4338	-8.4556
$\beta_1 \log(\text{Diámetro})$	2.4578	0.0699	35.18	<2e-16 ***	2.317	2.5986
Una recta de regresión para cada método con la misma pendiente						
β_0 (Intercepta)	-8.9524	0.2484	-36.04	<2e-16 ***	-9.4533	-8.4515
$\beta_1 \log(\text{Diámetro})$	2.4578	0.0706	34.8	<2e-16 ***	2.3154	2.6003
Método Troceo	0.0154	0.0768	0.2	0.842	-0.1395	0.1702
Rectas de regresión separadas para cada método con diferentes pendientes						
β_0 (Intercepta)	-8.7795	0.3491	-25.152	<2e-16 ***	-9.4839	-8.0751
$\beta_1 \log(\text{Diámetro})$	2.4074	0.1005	23.96	<2e-16 ***	2.2047	2.6102
Método Troceo	-0.3304	0.4936	-0.669	0.507	-1.3266	0.6657
LnDn: Método Troceo	0.1008	0.1421	0.709	0.482	-0.186	0.3875

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1; I.C. Intervalo de confianza.

Cuadro 3. Estadísticos de ajuste en modelos de regresión que incluyeron variables tipo dummy para el método cubicación Pressler y troceo simulado.

	Misma Reg.	Regresión por método	Reg. separadas
Error estándar residual	0.2575	0.2604	0.2619
R^2	0.9657	0.9657	0.9661
R^2_{aj}	0.9649	0.9641	0.9637
Estadístico F	1238.0	605.4	399.1
Valor de p	2.20E-16	2.20E-16	2.20E-16

El análisis de regresión Dummy (Fig. 4) permitió observar el comportamiento de ambos métodos de cubicación (líneas de regresión), mismas que mantienen un comportamiento similar de pendiente e intercepta, por lo cual se concluye que ambos métodos son confiables en la estimación de volumen, por lo cual se puede ajustar un modelo a partir del volumen de ambos métodos.

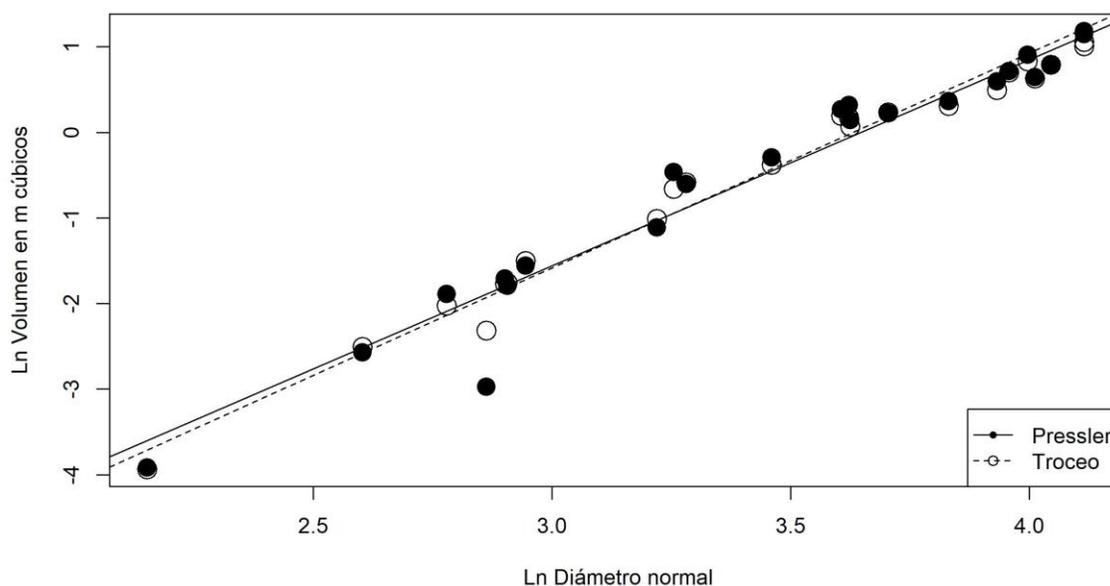


Figura 4. Modelos de regresión para comparar dos métodos de cubicación de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

El gráfico de Bland-Altman se empleó para el análisis de los dos métodos de cubicación donde la línea negra indicó la media de ambos métodos, línea roja indicó el intervalo de confianza (95 %). El eje “x” representó el promedio del volumen de ambos métodos, mientras que el eje “y” representó las diferencias entre los métodos de cubicación (Pressler y Troceo). Los puntos se distribuyen de manera uniforme a lo largo de la media, lo que representa que no hay sesgos del método Pressler frente al método de troceo simulado.

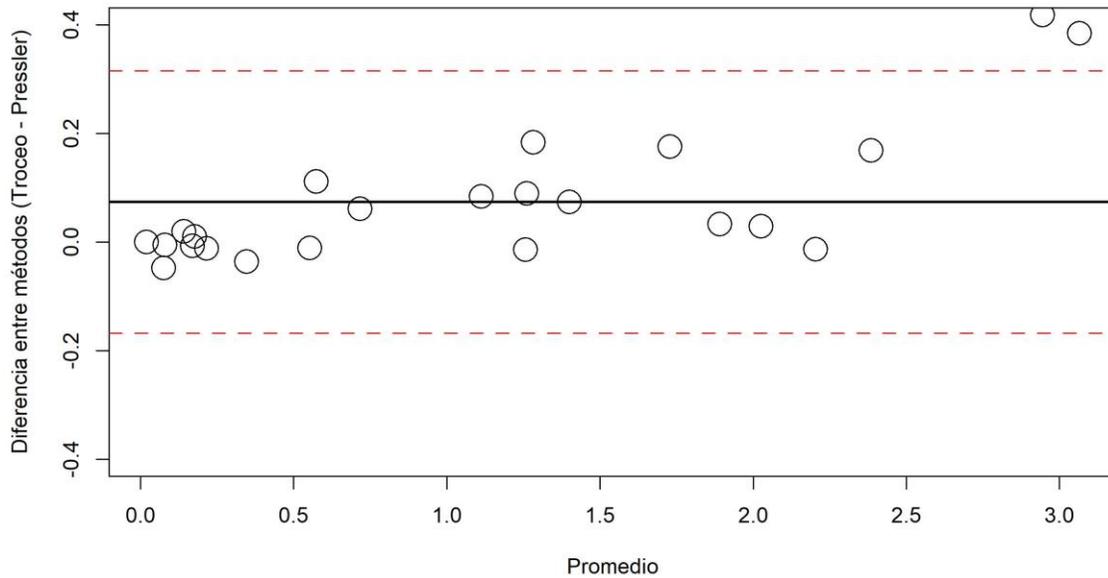


Figura 5. Diagrama Bland-Altman, que muestra la diferencia entre los dos métodos para el cálculo del volumen.

Las tres regresiones Dummy mostraron el mismo $R^2_{aj} = 96 \%$. Quiñonez et al., (2014) utilizaron tres sistemas de ecuaciones simultaneas (ahusamiento y volumen comercial) para *Pinus arizonica* Engelm, *Pinus ayacahuite* Ehrenb ex Schltldl, *Pinus durangensis* Ehrenb, *Pinus leiophylla* Schlecht Cham y *Pinus teocote* Schlecht et Cham en Durango, México. El ajuste de los sistemas se realizó por medio de tres perspectivas; para cada especie en los tres sistemas, modelo reducido (ajustes globales combinando todas las especies) y modelo completo (donde incorporaron el ajuste global y variables Dummy). Así mismo el modelo completo con variables Dummy (especies) fue el mejor, muestra las diferencias en el volumen total y la forma del fuste, hace eficiente el ajuste del sistema compatible. Por lo cual, al usar variables Dummy se logra ver el efecto del ahusamiento sobre el volumen comercial que varía según características de las especies. En relación a lo anterior, el presente estudio, las variables Dummy muestran el comportamiento de los dos métodos de cubicación mediante la línea de regresión.

Tlaxcala et al., (2016) en su estudio para identificar la mejor progenie considerando la forma y el ahusamiento de *Cedrela odorata* L., emplearon dos modelos complementados con pruebas de adicionalidad (análisis de regresión Dummy), comprobaron que todas progenies tienen el mismo intercepto a la edad de 16 años, en contraste a esta investigación se comprueba que ambos modelos parten del mismo origen.

6.2.- Modelo alométrico de predicción de biomasa de fuste de *P. patula*

La verificación de los supuestos estadísticos (Cuadro 6) de normalidad ($W = 0.99$, $p = 0.39$ y $KS = 0.05$, $p = 0.51$; Fig. 6b), homogeneidad de varianza ($BP = 0.61$, $df = 1$, $p = 0.44$; Fig. 4a) e independencia de errores ($D-W = 1.98$, $p = 0.84$) y sus valores de significancia permiten aceptar la hipótesis nula en cada prueba, indicando que los residuales se distribuyen normal, presentan varianzas homogéneas y son independientes.

Existe evidencia (Fig. 6b) para aceptar las hipótesis nulas en las pruebas de Shapiro-Wilk ($p = 0.39$) y Kolmogorov-Sminov ($p = 0.51$), además, se observó una distribución homogénea de los residuos a lo largo de la variable estimada (biomasa), lo que también es corroborado por la prueba de Breusch-Pagan ($p = 0.84$) la cual reveló que los residuos son homocedásticos. De igual manera, probando distintos retrasos (lags) a la serie de residuos (análisis de autocorrelación) se observó que no existe dependencia de las observaciones, a excepción de cuando se retrasa 11 veces la serie (Fig. 6c), aunque dicha correlación apenas alcanza a sobrepasar el umbral de correlación significativa ($p < 0.05$), por lo que se concluye que existe independencia de residuos. Además, la prueba de Durbin-Watson ($p = 0.84$) apoya la hipótesis de independencia de residuos. A su vez, esto indica que podemos confiar en las estimaciones del modelo.

El modelo lineal (Eq. 9) es apropiado para predecir con precisión la biomasa fustal en función del diámetro normal, Antonio et al., (2018) ajustaron un modelo matemático para predecir el volumen fustal de *Tectona grandis* Linneo f., (Nuevo Urecho, Michoacán), empleando diámetro de tocón, diámetro normal, diámetro a distintas alturas y altura total. Además, se verificaron los supuestos estadísticos de Shapiro-Wilk (0.97), White (13) y Durbin-Watson (2), mientras que el presente estudio presentó valores de 0.99, 0.61 y 0.84, siendo valores aceptados para cumplir los supuestos, difiriendo en la prueba aplicada para cumplir la homogeneidad de varianza, sin embargo, ambas pruebas cumplen el supuesto.

Así mismo, García et al., (2021) ajustaron ecuaciones para predecir volumen fustal en plantaciones de *Swietenia macrophylla* King (Santiago Ixcuintla, Nayarit), empleando altura total, diámetro del tocón, normal y a diferentes alturas; además, se verificaron los supuestos estadísticos para un modelo de variable combinada, aunque no se presentan los resultados. Jiménez et al., (2020) estimaron carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* Linneo f. (Nuevo Urecho, Michoacán) mediante ecuaciones alométricas, empleando diámetro normal y altura total. Además, reportaron valores de 0.96 para la prueba de Shapiro-Wilk, 12.99 para la de White y 2.01 para la prueba de Durbin-Watson. En este sentido se cumplen los supuestos cuando $p \geq 0.05$.

Algunos autores solo expresan el valor de R^2_{aj} , error estándar y CV (Fonseca et al., 2009; Montoya et al., 2018; Ramírez y Chagna, 2019; Villavicencio et al., 2020) sin embargo, es recomendable que los modelos obedezcan los supuestos establecidos (Montgomery et al., 2006; Fox, 2016).

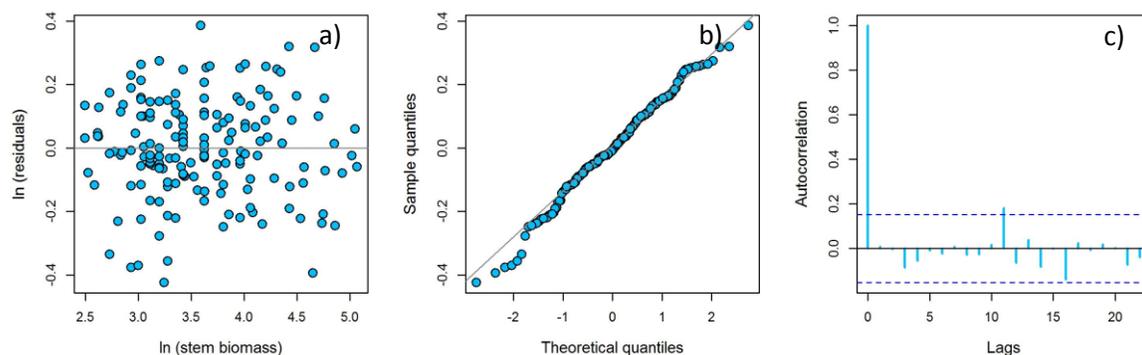


Figura 6. a) Homogeneidad de varianza, b) normalidad y c) correlograma de residuales del modelo de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido Cumbre de Muridores, Hidalgo.

Se realizó el análisis de los observados y los estimados (línea gris), donde se logra apreciar un buen ajuste ($R^2 = 95$), sobre la nube de datos observados (Fig. 7). Además, existe relación entre el diámetro normal y la biomasa fustal, los resultados muestran un comportamiento exponencial, es decir a manera que aumenta el diámetro normal la biomasa igual lo hace, pero en tasas cada vez más altas.

Castañeda et al., (2005) expresan que la relación diámetro normal y biomasa aérea fue significativa ($p \leq 0.01$) para la estimación de biomasa en una plantación de *Bambusa oldhamii* (Huatusco, Veracruz), con edades de 1, 2, 3 y 4 años, los diámetros oscilaron de 4.7 a 7.9 cm, mientras que la altura alcanzó los 16.3 m, a medida que el diámetro aumentó la biomasa igual. Por otro lado, Acosta et al., (2002) reportan que el modelo alométrico potencial utilizado para predecir biomasa en las especies *Clethra hartwegii* Britt., *Rapanea myricoides* (Schl.) Lundell., *Alnus glabrata* Fernald., *Liquidambar macrophylla* Oerst., *Inga sp.* y *Quercus peduncularis* Née. (Quercus) en Oaxaca, México, tuvieron valores altos del coeficiente de determinación ($R^2 = 0.97$), utilizando sólo la variable diámetro normal a la altura del pecho, en el presente estudio se obtuvo $R^2 = 0.97$, lo que apoya la elección de diámetro normal como estimador de la biomasa.

El análisis de las distancia de Cook y Leverage mostraron que existen observaciones influyentes potenciales, aunque no ponen la predicción en riesgo (Fig. 7b; Cuadro 4), dado que no sobrepasan el rango de -2.5 a 2.5 en los residuos estudentizados (Cook y Weisberg, 1982) en la predicción (dffit), ni en la varianza de los coeficientes de regresión (dfb.1, dfb.l(Dn)).

Cuadro 4. Detección de observaciones influyentes reales y potenciales del modelo lineal para predecir biomasa de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

Observación	Influencia potencial de observaciones					
	dfb.1	dfn. l(Dn)	dffit	cov.r	cook.d	Hat
56	-0.15	0.13	-0.25	0.93*	0.03	0.01
153	0.33	-0.13	-0.41*	0.96*	0.08	0.02
154	-0.27	0.29	0.33*	0.98	0.05	0.02
163	0.07	-0.07	-0.08	1.05*	0	0.04*
165	-0.07	0.07	0.08	1.05*	0	0.04*

* $p \leq 0.05$

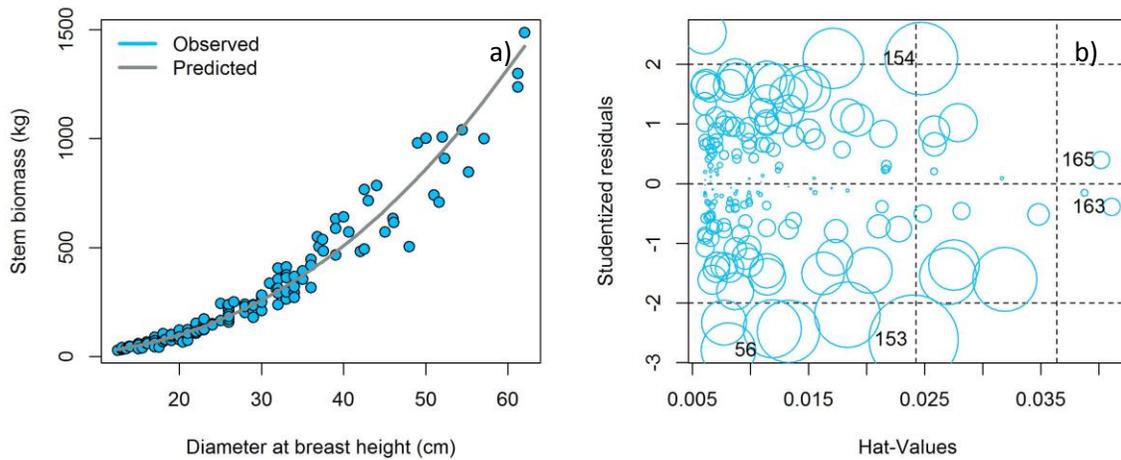


Figura 7. Valores observados ajustados y estimados (a) y observaciones influyentes potenciales (b) del modelo de biomasa de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

El coeficiente de determinación ($R^2 = 0.95$; $p = 0.002$) y el error de estimación ($RMSE = 0.1595$ y $MSE = 0.1241$) del modelo potencial lineal (Cuadro 5 y 6) indicaron que el modelo es confiable para estimar biomasa, Además, los estimadores ($\beta_0 = 1.950$, $\beta_1 = 2.357$) (Cuadro 5) fueron significativos (p -valores = 0.002). La validación del modelo mostró buen ajuste en cada método, los valores de K-Fold ($R^2 = 0.98$, $RMSE = 0.16$ y $MSE = 0.14$) es confiable para la predicción de valores no conocidos, por otro lado LOOCV al repetirse 31 veces reduce la varianza ($RMSE = 0.1767$ y $MSE = 0.1406$), si bien el mejor método de validación fue la validación cruzada repetida (K-Fold), al mostrar los menores valores de ($RMSE = 1618$ y $MSE = 0.1418$) repitiendo el proceso de la validación cruzada de K-fold tres veces.

Por otro lado, la validación del modelo permitió conocer su capacidad predictiva sobre datos de fuste no conocidos, si bien los métodos de validación mostraron un buen ajuste por los que se concluye que el modelo es eficiente y confiable

Cuadro 5. Evaluación de la capacidad predictiva del modelo para predecir biomasa de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

Validación	R ²	RMSE	MAE
Ajuste del modelo	0.9509	0.1595	0.1241
<i>Leave One Out Cross Validation</i> (LOOCV)	0.9625	0.1767	0.1406
K-fold <i>cross-validation</i> (Validación cruzada)	0.9838	0.1667	0.1438
Repeated K-fold <i>cross-validation</i>	0.9833	0.1618	0.1418

RMSE: Raíz del error cuadrático medio, MAE: error absoluto medio.

Para este estudio se obtuvieron coeficientes y sus intervalos de confianza de $\beta_0 = -1.950 \pm (-3.660)$ y $\beta_1 = 2.357 \pm (0.092)$ con significancia estadística $p < 0.0001$ (Cuadro 6), en unidades originales el valor de β_0 depende del valor mínimo de biomasa, mientras que el β_1 , es la razón de incremento de biomasa por cada unidad de diámetro normal.

Cuadro 6. Resultados del ajuste del modelo alométrico en forma logarítmica para predecir biomasa de fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham., en el Ejido de Cumbre de Muridores, Hidalgo.

Coefficientes	Estimador	Error	Valor t	Pr(> t)	R ²	KS	BP	D-W
β_0	-1.950	0.121	-16.110	<2e-16 ***	0.951	0.047	0.608	1.981
β_1	2.357	0.047	50.580	<2e-16 ***				

Signif. codes: 0 ‘***’ 0.001 ‘**’ 0.01 ‘*’ 0.05 ‘.’ 0.1 ‘ ’ 1; KS: Kolmogorov-Smirnov, BP: Breush Pagan, D-W: Durbin Watson.

En el modelo no lineal de biomasa fustal de *P. patula*, Rodríguez et al., (2019) reportaron $\beta_0 = 43.59$, $\beta_1 = 3.31$ y $R^2 = 0.98$ en unidades originales para el ajuste del modelo de predicción

de biomasa del fuste empleando el diámetro normal y altura total de 90 árboles de *P. patula* en fase de vardascal, si bien son contrastantes los estimados con el presente estudio, así como la ecuación al usar solo el diámetro normal $R^2 = 0.98$ (Ec. 9), mientras que Díaz et al. (2007) reportan valores de $\beta_0 = 0.0357$, $\beta_1 = 2.6916$ y $R^2 = 0.98$, para el ajuste del mismo modelo empleado en el presente estudio sin embargo se aplicó en su forma potencial para la estimación de biomasa aérea. Emplearon el muestro destructivo de 25 árboles *P. patula* que abarcaron las categorías de 5 a 65 cm, para el modelo tomaron como variable independiente el diámetro normal, por otro lado, el valor de los estimados no es semejante con los obtenidos en este estudio, al tratarse de biomasa fustal.

De igual manera Rodríguez et al., (2009) reportan valores de $\beta_0 = 0.407$, $\beta_1 = 2.026$ y $R^2 = 0.98$, en su modelo potencial (igual al del presente estudio) para estimar biomasa aérea de *P. patula*, la variable independiente fue el diámetro normal. El modelo se ajustó con datos de 111 árboles en pie, la biomasa se obtuvo por medio de la densidad básica obtenida de virutas de madera, de las cuales se obtuvo el volumen húmedo y el peso seco por medio del secado en estufa. Los estimados muestran poca semejanza, si bien su estimación es para biomasa aérea, mientras que el presente estudio se enfocó en la biomasa fustal.

Por otro lado, el mismo autor describe estimados para el modelo potencial aplicado en *Pinus pseudostrubus* John Lindley $\beta_0 = 0.128$, $\beta_1 = 2.364$ y $R^2 = 0.99$, *Pinus teocote* Schiede ex Schltdl. & Cham. $\beta_0 = 0.032$, $\beta_1 = 2.767$ y $R^2 = 0.99$, *Pinus montezumae* Lamb. $\beta_0 = 1.304$, $\beta_1 = 1.731$ y $R^2 = 0.99$. El ajuste del modelo fue con 208 árboles de *P. pseudostrubus*, 209 de *P. teocote* y 19 de *P. montezumae*. La obtención de la biomasa para el ajuste del modelo fue por medio de la densidad básica de la madera de cada especie. Aunque emplearon el mismo modelo, los estimados tienen poca semejanza al presente estudio al tratarse de biomasa aérea diferentes coníferas.

Razo et al., (2013) reportaron para el mismo modelo aquí empleado (potencial) para estimar biomasa y carbono aéreo en *Abies religiosa* (H.B.K.) Schl. et Cham., valores de los estimados para biomasa fueron de $\beta_0 = 0.0713$, $\beta_1 = 2.5104$ y $R^2 = 0.99$ en unidades originales y en la forma lineal valores fueron de $\beta_0 = 2.5104$, $\beta_1 = -2.6404$ y $R^2 = 0.99$. Para el ajuste del modelo se empleó en muestreo de 26 árboles, que oscilaron en las categorías diamétricas de 5 a 80

cm y alturas de 8 a 42.5 m. Por lo cual los estimados son pocos semejantes al presente estudio al tratarse de una especie diferente y dimensiones más grandes.

El modelo alométrico ajustado en su forma lineal (Ec. 9) presentó resultados satisfactorios, el diámetro normal explicó el 95.0 % de la variabilidad de la biomasa del fuste, también se presentó en su forma potencial, si bien el modelo potencial (Ec. 8) para un valor de diámetro normal de 50 cm estima 1,437.730 kg de biomasa mientras en su forma lineal (9) 1,437.468 kg.

$$Bf = 0.1423Dn^{2.357} \quad (8)$$

$$\ln(Bf) = (-1.950(\pm 3.660) + 2.357(\pm 0.092) * \ln(Dn)) \quad (9)$$

En *P. patula* se han realizado estudios que usan modelos alométricos para predicción de biomasa aérea y/o por componentes (raíz, fuste, ramas y hojas) (Cuadro 7; Fig. 6). Martínez et al., (2020) reportan 405.97 kg de biomasa total (raíz, fuste, ramas y follaje) en la categoría de 25 cm (Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México) y su modelo lineal ($R^2 = 0.98$) expresó 424 kg de biomasa en fuste a 20.18 m de altura. Al respecto, el presente estudio reportó 280.59 kg de biomasa fustal (25 cm de Dn y 19.7 m de altura), cuya evidente subestimación podría deberse a que en este estudio se consideró únicamente la biomasa del fuste, a diferencia de los autores que reportan biomasa total.

Por otro lado, Díaz et al., (2007) reportaron 206.71 kg de biomasa aérea (fuste, ramas y hojas) en la categoría de 25 cm para *P. patula* en Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala, lo cual es menor a los 280.59 kg de este estudio, si bien la diferencia está ligada al tipo de biomasa estimada en su estudio, por otro lado el autor no expresa el porcentaje de biomasa por cada componente analizado.

Así mismo Rodríguez et al., (2019) en su modelo ($R^2 = 97\%$) para estimar biomasa fustal en *P. patula*, en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México, utilizaron como variables independientes el diámetro normal y altura total, en la categoría de 25 cm, reportan 114.7 kg de biomasa fustal, el sesgo puede referirse a que el modelo utilizado incorpora el altura total y está ligado a patrones y condiciones de crecimiento en la fase de vardascal (diámetros menores a 10 cm), lo que representaría un error aplicarlo a categorías diamétricas (25 cm) para las cuales no fue ajustado.

Así también Soriano *et al.*, (2015) y Chavez *et al.*, (2016) en el modelo presentado para predecir biomasa aérea por componentes (fuste, ramas y follaje) en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, estiman 185 kg de biomasa aérea en la categoría diamétrica, lo que representa un sesgo (sobrestimación respecto al presente estudio) de 95 kg en la categoría de 25 cm, aunque esta condición puede estar asociada por la variable altura total incluida en el modelo no lineal empleado por el autor. Aunque también Rodríguez *et al.*, (2009) reportaron el uso de un modelo potencial en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México, mismo que estimó 276.78 kg de biomasa aérea para la categoría propuesta en los casos antes mencionados, la diferencia (3.81 kg) fue mínima con respecto al presente estudio de biomasa fustal.

Cuadro 7. Comparación de predicciones de biomasa de fuste en *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham.

CD	Presente estudio (kg)	Castellanos <i>et al.</i> , (1996)	Dif. (kg)	Pacheco <i>et al.</i> , (2011)	Dif. (kg)	Rodríguez <i>etal.</i> , (2019)	Dif. (kg)	Martínez <i>et al.</i> , (2020)	Dif. (kg)
25	281	209	71	129	151	415	-135	424	-143
35	620	454	166	314	306	734	-114	694	-74
45	1121	809	313	611	511	1682	-561	2173	-1052
55	1754	1251	502	1008	745	1932	-178	1970	-216
60	2387	1690	696	1424	962	3027	-640	3596	-1209

Amanera de comparación se emplearon modelos alometricos utilizados por otros autores para estimar biomasa fustal en *P. patula* (Fig. 8). Las líneas solidas representaron las categorías diamétricas empleadas por los autores, mientras que las líneas punteadas son la simulación con respecto a la información del presente estudio.

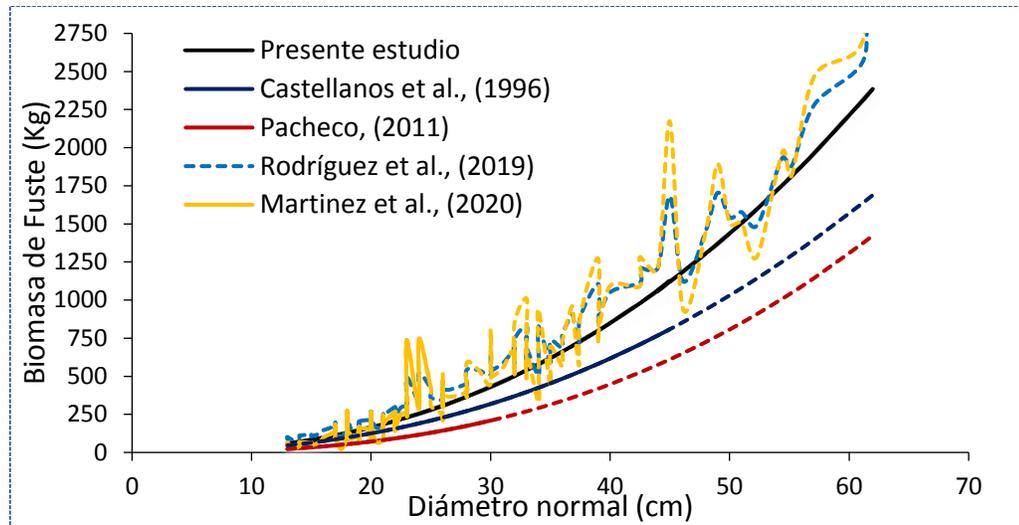


Figura 8. Modelo ajustado para estimación de biomasa en fuste de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. comparado con otros estudios en biomasa de fuste.

En *P. patula* se han ajustado modelos alométricos para la estimación de la biomasa fustal. Castellanos et al., (1996) ajustaron modelos en su forma potencial lineal para estimar biomasa aérea por componentes para la distribución e incremento de biomasa en un rodal natural de *P. patula* en Chignahuapan, Puebla. Los resultados mostraron que el 72 % de la biomasa se almacena en el fuste ($R^2 = 0.99$), de acuerdo a la predicción del modelo empleado por el autor se apreció una subestimación de 696 kg en la categoría de 60 cm y 71 kg en la categoría de 25 cm (Cuadro 7).

Por otro lado Pacheco, (2011) ajustaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea por componentes en reforestaciones de *P. patula*, el modelo de predicción de biomasa en fuste ($R^2 = 0.96$) tendió a ser el que más subestimó en comparación al presente estudio (Fig. 8), para la categoría de 60 cm se encontraron diferencias de hasta 962 kg. Rodríguez et al., (2009) emplearon modelos para la estimación de biomasa por componentes de *P. patula* en la etapa de vardascal. Emplearon como variables independientes el diámetro normal y la altura total, mientras que el resto de los autores solo emplearon el diámetro normal, por lo cual al predecir con el modelo aplicado para fuste ($R^2 = 0.97$) se encontró un comportamiento en la línea azul (Fig. 8) alcanzando diferencias (sobrestimación) (Cuadro 7) de 640 kg de biomasa fustal para la categoría de 60 kg, mientras que en la categoría de 25 cm la

sobrestimación fue de 135 kg, si bien el modelo tiende a ser bueno al emplear diámetro normal y altura.

Así mismo el modelo lineal ajustado por Martínez et al., (2020) para estimar biomasa total y por componentes de *P. patula*, ($R^2 = 0.98$), fue ajustados con diámetro normal y altura total como variables independientes, aunque en comparación el presente estudio se encontró sobreestimación de 143 kg de biomasa fustal en la categoría de 25 cm, mientras que en la categoría de 60 cm fue de 1209 kg de biomasa.

Por otro lado, al ajustar el modelo alométrico se cumplieron los requisitos (supuestos estadísticos) y la validación de los mismos aseguran que las predicciones de biomasa fustal de sean confiables y se eviten sesgos. Al respecto, las investigaciones antes mencionadas no cumplieron dichos requisitos a excepción de Martínez et al., (2020) quienes cumplieron los supuestos de normalidad de residuos y homogeneidad de varianzas, aunque faltó el supuesto de independencia de errores.

El modelo generado (Ec. 9) es válido y confiable para predecir biomasa en fuste de *P. Patula* al usar el diámetro normal en el intervalo de predicción y confianza indicado, sin embargo debe ser aplicado bajo condiciones similares de crecimiento en las que se encuentra la especie puesto que se ha observado la sub y sobreestimación de biomasa con los diferentes modelos en relación con modelo obtenido, esto da pauta para sugerir la inclusión de la altura en este mismo modelo a fin de mejorar las estimaciones, sin omitir el debido cumplimiento de los supuestos de un modelo de regresión (Flores *et al.*, 2011), dado que ha sobreestimado con los diferentes modelos en relación con el modelo aquí obtenido.

7.- CONCLUSIONES

La cuantificación de biomasa fustal por medio de modelos alométricos apoya a la cuantificación del carbono en la biomasa almacenada en el fuste, si bien la mayor cantidad se almacena este componente del árbol. Los métodos indirectos de estimación de biomasa reducen el tiempo y no generan un daño ecológico por lo que son los más recomendados para cuantificar biomasa y ajustar ecuaciones. El modelo generado en este estudio es válido, confiable y eficiente para predecir biomasa en fuste de *P. Patula* al usar el diámetro normal, sin embargo, esto da pauta para sugerir la inclusión de la altura en este mismo modelo a fin de analizar si mejoran las estimaciones. El diámetro normal demostró ser un buen estimador, ya que explicó hasta el 95 % la biomasa de fuste de *P. Patula*. Así mismo, la validación del modelo fue crucial para evidenciar las predicciones con datos nuevos.

8.- LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., Vargas, H. J., Velázquez, M. A., & Etchevers, B. J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies de arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*, 36(06), 725–736.
- Aguilar, A. H. (2011). Biomasa sobre el suelo y carbono orgánico en el suelo en cuatro estadios de sucesión de bosques en la Península de Osa, Costa Rica. *Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 1–54.
- Ajuria, P. S. (2016). Tarifas de Cubicación, para el *Pinus pinaster* Ait. y para el *Eucalyptus globulus* Labill., en el Distrito Forestal V de A Coruña, mediante el método de cubicación de Pressler-Bitterlich. *Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Forestal*, 1–609. <http://oa.upm.es/43982/>
- Amat, J. (2016). *Validación de modelos de regresión: Cross-validation, OneleaveOut, Bootstrap*. 1–17. <https://github.com/JoaquinAmatRodrigo/Estadistica-con-R>
- Antonio, R. T., Cárdenas, M. G., Rodríguez, E. A., Calderón, O. A. A., & Pérez, J. J. (2018). 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), 1–11. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431544>
- Aranda, A. R., Ley de Coss, A., Arce, E. C., Pinto, R. R., Guevera, H. F., & Raj, A. D. (2018). Captura de carbono en la biomasa aérea de la palma de aceite en Chiapas, México. *Agronomía Mesoamericana*, 29(3), 629–637. <https://doi.org/10.15517/ma.v29i3.32076>
- Bautista, C. E. A., Ordaz, C. V., Gutiérrez, C. E., & Valdez, V. E. (2016). Carbono en sistemas agroforestales de café, bosque mesófilo de montaña y potrero en Huatusco, Veracruz. *Ecosistemas Terrestres. Capítulo 5*, 454–461.

- Benavides, B. H. O., & León, A. G. E. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. *Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales*, 1–92.
- Biazatti, S. C., Môra, R., Scoti, M. S. V., Brito Júnior, J. F. de, Queiroz, N. D. S., & Curto, R. D. A. (2020). Criterion Dendrometer as a non-destructive method for dendrometric estimations of native species in Western Amazon. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*, 11(6), 59–70. <https://doi.org/10.6008/cbpc2179-6858.2020.006.0006>
- BP PLC. (2019). BP Statistical Review of World Energy. In *BP PLC. London, UK: Vol. 68th editi* (pp. 1–61). <https://doi.org/10.1001/jama.1973.03220300055017>
- Breusch, T. S., & Pagan, A. R. (1979). A simple test for heteroscedasticity and random coefficient variation. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1287–1294.
- Casiano, D. M., Paz, P. F., Rojo, M. M., Covalada, O. S., & Aryal, D. R. (2018). El carbono de la biomasa aérea medido en cronosecuencias: primera estimación en México. *Madera y Bosques*, 24, 1–22. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401894>
- Castañeda, M. A., Vargas, H. J., Gómez, G. A., Valdez, H. J. I., & Vaquera, H. H. (2005). acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*, 39(1), 107–116.
- Castellanos, J. F., Velazquez, M. A., Hernandez, V. J., Franco, R. C., & González, F. A. M. (1996). Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia*, 30, 1–24.
- Chavez, A. G., Ángeles, P. G., Pérez, S. M., López, L. M. Á., Garcia, M. E., & Wayson, C. (2016). Distribución de biomasa aérea en un bosque de *Pinus patula* bajo gestión forestal en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 22, 23–36.
- Chimbo, Y. J. (2016). Evaluación del carbono en la biomasa de dos especies forestales introducidas y una especie nativa en el bosque Aguarongo. *Universidad Politecnica Salesiana*, 1–74. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/11782>
- Ciais, P., Sabine, C., Bala, G., Bopp, L., Brovkin, V., Canadell, J., Chhabra, A., DeFries, R., Galloway, J., Heimann, M., Jones, C., Le Quéré, C., Myneni, R. B., Piao, S., & Thornton, P. (2013). Carbon and Other Biogeochemical cycles. *Climate Change 2013:*

The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1–4.
www.climatechange2013.org

- CONABIO. (2021). *Bosques templados / Biodiversidad Mexicana*.
<https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/bosqueTemplado>
- CONAFOR. (2010). *Pinus patula Schl. et Cham. 1*, 1–8.
[http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus patula.pdf](http://www.conafor.gob.mx:8080/documentos/docs/13/975Pinus%20patula.pdf)
- Cook, R. D., & Weisberg, S. (1982). Residuals and Influence in Regression. In *United States of America*. <https://doi.org/10.2307/2981746>
- Corral, R. S., & Návar, C. J. (2009). Comparación de técnicas de estimación de volumen fustal total para cinco especies de pino de Durango , Mexico. *Revista Chapingo*, 15(1), 5–13.
- Cuenca, M. E., Jadán, O., Cueva, K., & Aguirre, C. (2014). Carbono y ecuaciones alométricas para grupos de especies y bosque de tierras bajas, Amazonía Ecuatoriana. *Cedamaz*, 4(1), 21–31.
- Curto, R. D. A., Pinto, M. F., Araujo, E. J. G. de, Wink, C., Tonini, H., & Lauro, A. C. (2019). Exatidão De Métodos Para Estimativa Do Volume De Árvores Em Pé Em Sistema De Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. *Revista Brasileira de Biometria*, 37(3), 1–11.
<https://doi.org/10.28951/rbb.v37i3.399>
- De Eugenio, A., Fernández, L. A., & Merino, de M. S. (2018). Modelos 3D derivados de fotogrametría terrestre para la estimación de variables de inventario forestal. *Revista de Teledetección*, 51, 113–124. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.9174>
- Díaz, F. R., Acosta, M. M., Carrillo, A. F., Buendía, R. E., Flores, A. E., & Etchevers, B. J. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula Schl. et Cham.* *Madera y Bosques*, 13(1), 25–34.
http://www1.inecol.edu.mx/myb/resumeness/13.1/MB_2007_13-1_025-034.pdf
- Díaz, G. (2012). El cambio climatico. *Ciencia y Sociedad*, 37(2), 227–240.
<http://repositoriobiblioteca.intec.edu.do/bitstream/handle/123456789/1392/CISO2012>

3702-227-240.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Díaz, R. M. de J., Vázquez, A. A., Uribe, G. M., Sánchez, V. A., Lara, B. A., & Cruz, L. A. (2017). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en aile obtenidas mediante un método no destructivo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, *16*, 3235–3249. <https://doi.org/10.29312/remexca.v0i16.393>
- Diéguez, A. U., Castedo, D. F., Barrío, A. M., Álvarez, G. J. G., Rojo, A. A., & Ruiz, G. A. (2005). *Prácticas de Dasometría*. 1–120.
- Durbin, J., & Watson, G. S. (1971). Testing for serial correlation in least squares regression. I. *Biometrika*, *37*(3–4), 409–428. <https://doi.org/10.1093/biomet/37.3-4.409>
- Escobar, E., & Maass, M. (2008). Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas, en Capital natural de México. *CONABIO*, *1*, 161–189.
- Fernandes, D. S. G., Mendes, D. O. O., Ribeiro, D. M. A., & Filho, V. F. C. (2017). Acurácia do método de Pressler e fator de forma na estimação do volume de árvores de *Tectona grandis* L. f. *Revista Brasileira de Biometria*, *35*(2), 213–225.
- Figuroa, N. C. M., Ángeles, P. G., Velázquez, M. A., & De los Santos, P. H. M. (2019). Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* schlt. et cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *1*(1), 105–112. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.658>
- Flores, H. C. D. J., Méndez, G. J., Sánchez, P. F. D. J., Ponce, M. G., Pérez, D. C., & Méndez, E. F. M. (2021). Modelos proxy para biomasa de fuste de *Pseudotsuga menziesii* (mirb.) franco: método de Pressler. *Revista Fitotecnia Mexicana*, *44*(1), 85–94.
- Flores, N. P., López, L. M. Á., & Pérez, G. Á. (2011). Modelos para estimación y distribución de biomasa de *Abies religiosa* (Kunth) schlt. et cham. en proceso de declinación. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, *2*(8).
- Fonseca, G. W. (2017). Revisión de métodos para el monitoreo de biomasa y carbono vegetal en ecosistemas forestales tropicales. *Revista de Ciencias Ambientales*, *51*(2), 91–109. <https://doi.org/10.15359/rca.51-2.5>

- Fonseca, G. W., Alice, G. F., & Rey, B. J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*, 30(1), 36–47. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002009000100006>
- Fox, J. (2016). Applied regression analysis & generalized linear models. In Sage.
- García, E., & CONABIO. (1998). *Climas (clasificación Köppen modificado por E. García). Escala 1:1,000,000*.
- García, E. G., Hernández, R. J., García, M. J. J., García, C. X., Delgado, Valerio, P., & Rocha, Granados, M. C. (2019). Precisión de la fórmula de Pressler para la estimación del volumen de árboles en pie de *Pinus montezumae* Lamb. en Nuevo San Juan Parangaricutiro, Michoacán. *Ciencia Nicolaita # 78*, 87–101.
- García, G. D. A., Sáenz, R. J. T., Rueda, S. A., Jesús, H., Castillo, Q. D., & García, M. G. E. (2021). Tablas de volumen de *Swietenia macrophylla* en plantaciones forestales del occidente de México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 17(1), 31–39.
- Gayoso, A. J., & Guerra, C. J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque*, 26(2), 33–38. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002005000200005>
- Gillespie, A. J. R. (2000). *Pinus patula* Schiede & Deppe Pino pátula, ocote. *Bioecología de Árboles Nativos y Exóticos de Puerto Rico y Las Indias Occidentales*, 404.
- Goche, T. J. R., Velázquez, M. A., Borja, de la R. A., Capulín, G. J., & Palacios, M. C. (2011). Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* schldl. et cham. de tres localidades en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 2(7), 71–78. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v2i7.568>
- Goche, T. R., Velázquez, M. A., Borja, D. la R. A., Terrazas, T., Cervantes, M. C., & Trinidad, S. A. (2003). Densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. *Interciencia*, 28(12), 1–9.
- Gómez, D. J. D., Etchevers, B. J. D., Monterrosos, R. A. I., Campo, A. J., & Tinoco, R. J. A. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente*, 17(2),

261–272. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.11.117>

- González, J., & Zambrano, A. (2011). Implementación de cartas de control en el paquete estadístico R para el monitoreo de procesos en media con datos autocorrelacionados. *Comunicaciones En Estadística*, 4(1), 7. <https://doi.org/10.15332/s2027-3355.2011.0001.01>
- Guillen, A. M. H. B., & Acuña, Z. M. S. (2014). Aplicación de Correlación en la Investigación Correlation Application in Research. *International Journal of Good Conscience Agosto*, 9(18), 18–23.
- INIFAP-CONABIO. (1995). *Edafología*. 1–6.
- Jimenez, P. J., Telles, A. R., Alanís, R. E., Yerena, Y. J. I., García, G. D. A., & Gómez, C. M. (2020). Estimación del carbono almacenado en una plantación de *Tectona grandis* L. f. mediante ecuaciones alométricas. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(33–56). <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i57.550>
- Larrea, G. R., De los Santos, P. H. M., & Hernández, V. J. I. V. (2008). Crecimiento y rendimiento de *Cedrela odorata* L. y *Tabebuia donnell-smithii* Rose en San José Chacalapa, Pochutla, Oaxaca. *Madera y Bosques*, 14(2), 65–82. <https://doi.org/10.21829/myb.2008.1421213>
- Laura, O. L. (2019). Evaluation of Classification Algorithms using Evaluación de Algoritmos de Clasificación utilizando Validación Cruzada. *Laccei International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology*, 1–6. <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2019.1.1.471>
- León, V. A., & Guillen, M. V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construído*, 20(3), 611–625. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000300448>
- Llebot, E. J. (2018). El balanç de carboni i el canvi climàtic. *Treballs de La Societat Catalana de Biologia*, 69, 49–55. <https://doi.org/10.2436/20.1501.02.182>
- López, P. C. (2000). Utilización del relascopio de Bitterlich para la cubicación de árboles. *Forestalia*, 2, 1–8.

- Luna, F. A. D., Sanchez, A. A. W., Maza, M. J. E., & Castillo, F. J. E. (2021). Vista de Biomasa forestal y captura de carbono en el bosque seco de la Reserva Ecológica Arenillas. *Revista Científica Agroecosistemas*, 9(2), 140–146. <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/480/457>
- Marroquín, M. P. (2019). Ajuste de ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en una plantación de teca (*Tectona grandis* L. f.) en Yucatán, México. *Universidad Autónoma de Nuevo León*, 50.
- Marroquín, M. P., Méndez, G. J., Jiménez, P. J., Aguirre, C. O. A., & Yerena, Y. J. I. (2018). Estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill. en Saltillo, Coahuila. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 094–110. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v9i47.172>
- Martínez, D. A., Ruiz, A. F., Santiago, G. W., Antúnez, P., López, L. M. Á., Valenzuela, E. C., & Feria, R. R. (2020). Allometric equations to estimate aboveground and belowground biomass of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Forest Science and Technology*, 16(3), 161–170. <https://doi.org/10.1080/21580103.2020.1801526>
- Montes, D. O. C. E., Salvador, G. Á., Najera, L. J. A., Corral, R. S., Graciano, L. J. de J., & Mendez, G. J. (2020). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Trichospermum mexicanum* (DC.) Baill. *Colombia Forestal*, 23(2), 89–98. <https://doi.org/10.14483/2256201X.15836>
- Montgomery, C. D., Peck, A. E., & Vining, G. G. (2006). *Introducción al Análisis de Regresión Lineal. Tercera edición.*
- Montiel, G. C., Garcia, O. F., Bautista, F., & Sanchez, M. O. (2021). La huella del Cambio Climático Global en un ecosistema desértico mexicano: la creciente frecuencia de eventos climáticos. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 1–36. <https://doi.org/10.24850>
- Montoya, J. J. C., Mendez, G. J., Sosa, D. L., Ruíz, G. C. G., & Velázquez, R. A. S. (2018). Ecuaciones de biomasa aérea y volumen para *Pinus halepensis* mill en Coahuila, México. *Madera y Bosques*, 24(e2401880), 1–11. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2401880>

- Murillo, T. F. J. (2008). Los modelos multinivel como herramienta para la investigación educativa. *Revista Internacional de Investigación En Educación*, 1(1), 45–62.
- Núñez, C. E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. *Revista de Ciencia y Tecnología*, 9(9), 44–50.
- Nyoka, B. I. (2002). *Pinus patula* Schiede ex Schltdl. & Cham. *Pines of Silvicultural Importance*, 303–316.
- Pacheco, A. G. (2011). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea por compartimentos en reforestaciones de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Xiacuí, Ixtlán, Oaxaca. Universidad de La Sierra Juárez. Oaxaca, México*.
- Paia, L. G. C., Valerio, Kohler, S., Silvestre, R., Navroski, M. C., Bonazza, M., Allegretti, G., & Scarioti, R. (2016). Acuracidade de métodos de cubagem para estimativa do volume de *Pinus taeda* L. *BIOFIX Scientific Journal*, 1(1), 74–82. <https://doi.org/10.5380/biofix.v1i1.49101>
- Panshin, A. J., & De Zeeuw, C. (1970). *Textbook of wood technology. Structure, identification, uses, and properties of the commercial woods of the United States and Canada*. 1(3rd ed.), 1–705.
- Pedrosa, I., Juarros, B. J., Robles, F. A., Julia, B., & García, C. E. (2015). Pruebas de bondad de ajuste en distribuciones simétricas, ¿qué estadístico utilizar? *Universitas Psychologica*, 14(1), 245–254. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.upsy13-5.pbad>
- Pérez, M. R., Moreno, S. F., & González, Hernández Antonio Arreola, P. V. (2013). Escenarios de la distribución potencial de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. y *Pinus pseudostrabus* Lindl. con modelos de cambio climático en el estado de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 73–86. <http://www.scielo.org.mx/pdf/remcf/v4n15/v4n15a6.pdf>
- Picard, N. (2012). Manual de construcción de ecuaciones alométricas para estimar el volumen y la biomasa de los árboles. *FAO y CIRAD*, 213. <http://www.fao.org/docrep/018/i3058s/i3058s.pdf>
- Quiñonez, B. G., De los Santos, P. H. M., Álvarez, G. J. G., & Velázquez, M. A. (2014).

- Sistema compatible de ahusamiento y volumen comercial para las principales especies de *Pinus* en Durango, México. *Agrociencia*, 48(5), 553–567.
- R Core Team, 2021. (2021). *R: A language and environment for statistical computing. Version 4.0.4. 2021. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.*
- Ramírez, L. J. L., & Chagna, A. E. J. (2019). Secuestro de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Eucalyptus grandis* W. Hill. *Revista Cubana de Ciencias Forestales*, 7(1), 86–97.
- Razo, Z. R., Gordillo, M. A. J., Rodríguez, L. R., Maycotte, M. C. C., & Acevedo, S. O. A. (2013a). Escenarios de carbono para el bosque de oyamel del Parque Nacional El Chico, Hidalgo, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 9(1), 17–21. <http://www.itson.mx/publicaciones/rlrn/Documents/v9-n1-3-escenarios-de-carbono-para-el-bosque-de-oyamel-del-parque-nacional-el-chico-hidalgo-mexico.pdf>
- Razo, Z. R., Gordillo, M. A. J., Rodríguez, L. R., Maycotte, M. C. C., & Acevedo, S. O. A. (2013b). Estimación de biomasa y carbono almacenado en árboles de oyamel afectados por el fuego en el Parque Nacional “El Chico”, Hidalgo, México. *Madera y Bosques*, 19(2), 73–86. <https://doi.org/10.21829/myb.2013.192341>
- Riaño, M. O., & Lizarazo, I. (2017). Estimación del volumen de madera en árboles mediante polinomio único de ahusamiento. *Colombia Forestal*, 20(1), 55–62. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.1.a05>
- Rodríguez, F., & Fernández, A. (2009). Herramientas de cubicación sin necesidad de apeo de árboles. *Revista Montes*, 98, 83–88.
- Rodríguez, L. R., Jiménez, P. J., Aguirre, C. Ó. A., Treviño, G. E. J., & Razo, Z. R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la reserva de la biosfera el cielo, Tamaulipas, México. *Revista de Sociedad, Cultura y Desarrollo Sustentable*, 5, 317–328. <https://doi.org/10.35197/rx.05.03.2009.06.rr>
- Rodríguez, O. G., De Los Santos, P. H. M., González, H. V. A., Aldrete, A., Gómez, G. A., & Fierros, G. A. M. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*, 18(1), 25–41.

<https://doi.org/10.21829/myb.2012.1811116>

- Rodríguez, O. G., García, A. J. Á., Leyva, L. J. C., Ruiz, D. C., Enríquez, D. V. J. R., & Santiago, G. W. (2019). Biomasa estructural y por compartimentos en regeneración de *Pinus patula* en áreas con matarrasa. *Madera y Bosques*, 25(1), 1–11. <https://doi.org/10.21829/myb.2019.2511713>
- Rojas, G. F., De Jong, H. . B., Martínez, Z. P., & Paz, P. F. (2015). Database of 478 allometric equations to estimate biomass for Mexican trees and forests. *Annals of Forest Science*, 72(6), 835–864. <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0456-y>
- Rojas, G. F., & Villers, R. L. (2005). Comparación de dos métodos para estimar la densidad de la madera de *Pinus hartwegii* Lindl. del Volcán La Malinche. In *Madera y Bosques* (Vol. 11, Issue 1, pp. 63–71). <https://doi.org/10.21829/myb.2005.1111262>
- Salas, C., Reyes, S. M., & Bassaber, Cl. (2005). Medición de diámetros fustales con relascopio y forcípula finlandesa: efectos en la estimación de volumen. *Bosque*, 26(2), 81–90. <https://doi.org/10.4067/s0717-92002005000200010>
- Salaya, D. J. M., López, U. J., & Vargas, H. J. J. (2012). Variación genética y ambiental en dos ensayos de progenies de *pinus patula*. *Agrociencia*, 46(5), 519–534.
- Salazar, R. A. G., Murillo, C. R., Salas, R. A., & Fonseca, G. W. (2021). Distribución de productos de *Cedrela odorata* L. en un sistema agroforestal con café en Pérez Zeledón, Costa Rica. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 18(42), 74–80. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v16i42.5545>
- Schlegel, B., Gayoso, J., & Guerra, J. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. *Universidad Austral de Chile.*, 1–24.
- Segura, M., & Andrade, H. (2008). ¿Cómo construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes? *Agroforestería En Las Américas*, 46, 89–96.
- SEMARNAP. (1996). *Suelos*. 50–56.
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). Biometrika Trust An Analysis of Variance Test for

Normality (Complete Samples) Published by : Oxford University Press on behalf of Biometrika Trust Stable. *Biometrika*, 52(3), 591–611. <https://pdfs.semanticscholar.org/1f1d/9a7151d52c2e26d35690dbc7ae8098beee22.pdf>

- Silva, A. F. M., & Návar, C. J. de J. (2019). Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 1(1), 55–62. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v1i1.653>
- Soriano, L. M. de los Á., Ángeles, P. G., Martínez, T. T., Plascencia, Escalante, F. O., & Razo, Z. R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*, 49(4), 423–438.
- Spruge, D. (1983). Correcting for Bias in Log-Transformed Allometric Equations. *Wiley*, 64(1), 209–210.
- Tlaxcala, M. R. M., De los Santos, P. H. M., Hernández, D. la R. P., & López, A. J. L. (2016). Variación del factor de forma y el ahusamiento en procedencias de cedro rojo (*Cedrela odorata* L.). *Agrociencia*, 50(1), 89–105.
- Valencia, M. S., Trujillo, G. S. A., Cornejo, O. E., Heriberto, Flores, L. C., Díaz, B. J. A., González, L. H., & Darío. (2017). ecuación de pressler para estimar volumen de fuste en árboles de *Pinus patula* Schl. et Cham. var. *longepedunculata* Look. *Foresta Veracruzana*, 19(1), 29–34.
- Valencia, M. S., & Vargas, H. J. (1997). Método empírico para estimar la densidad básica en muestras pequeñas de madera. *Madera y Bosques*, 3(1), 81–87. <https://doi.org/10.21829/myb.1997.311381>
- Valencia, S., & López, F. (1999). Variación de la densidad de la madera dentro y entre árboles de *Pinus rudis* Endl. *Foresta-AN*, 1.
- Vidal, Z. R. (1990). Precipitación media anual. *Atlas Nacional de México*, II, 6–9.
- Vilá, B. R., Torrado, F. M., & Reguant, A. M. (2019). Análisis de regresión lineal múltiple con SPSS. *Revista d'Innovació i Recerca En Educació*, 12(2), 1–10.
- Villavicencio, G. E. E., Mendoza, M. S., & Méndez, G. J. (2020). Modelo para predecir

biomasa foliar seca de *Litsea parvifolia* (Hemsl.) Mez. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 113–133. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v11i58.642>

Wei, C. S., & Gutiérrez, E. E. E. (2013). Ecuación para estimar la biomasa arbórea en los bosques tropicales de Costa Rica. *Revista Tecnología En Marcha*, 26(2), 41. <https://doi.org/10.18845/tm.v26i2.1402>

Yana, M. D. M. (2019). Captura de dióxido de carbono en relación a la biomasa aérea de las especies forestales predominantes del ornato urbano en Juliaca. *Universidad Nacional de Juliaca*, 1–101.

Zeileis, A., & Hothorn, T. (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News*, 2(3), 7–10. <http://cran.r-project.org/doc/Rnews/>

Zobel, B., & Talbert, J. (1984). *Applied forest tree improvement*. John Wiley & Sons.