

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Estimación de Biomasa Aérea Mediante Modelos Alométricos en *Pinus cembroides* Zucc., y
Pinus halepensis Mill., en Saltillo, Coahuila, México

Por:

PABLO MARROQUÍN MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL

Estimación de Biomasa Aérea Mediante Modelos Alométricos en *Pinus cembroides* Zucc., y

Pinus halepensis Mill., en Saltillo, Coahuila, México

Por:

PABLO MARROQUÍN MORALES

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada por el Comité de Asesoría:


Dr. Jorge Méndez González
Asesor


M.C. Héctor Darío González López
Coasesor


Ing. Sergio Braham Sabag
Coasesor


Dr. Gabriel Callegos Morales
Coordinador de la División de Agronomía


DEPARTAMENTO FORESTAL


Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2017

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Por darme la vida y la salud, y así poder terminar mis estudios con mucha satisfacción, también por darme la sabiduría y la fortaleza durante mi carrera, gracias Dios por ayudarme a cumplir esta meta.

A mi Alma Terra Mater

Por brindarme la oportunidad de ser un Ingeniero Forestal, por medio del Departamento Forestal, la cual me llena de mucho orgullo y por las grandes experiencias que me permitió vivir en ella, lugar donde me inculcaron conocimientos para desempeñarlos en mi vida profesional si Dios me lo permite.

Al Dr. Jorge Méndez González

Por todo el apoyo recibido durante el inicio y el final de este proyecto, por darme los consejos y conocimientos que fueron y serán de gran ayuda en mi vida y sobre todo la amistad brindada.

Al M. C. Héctor Darío González López

Por darme los conocimientos, comentarios y sugerencias para poder culminar este trabajo y la amistad.

Al Ing. Sergio Braham Sabag

Por el tiempo dedicado a la revisión de este proyecto, por sus conocimientos y su apoyo.

DEDICATORIA

A mis padres:

Efraín Marroquín Gómez y Nelly Morales Guzmán

Por el gran esfuerzo y sacrificio que hicieron para lograr esta meta, por los consejos y la motivación que me daban para culminar con mis estudios, por eso les dedico un abrazo y les doy las gracias.

A mis hermanos:

José Ángel, Elías, Joel y Karen Maythe

Por brindarme consejos y darme su apoyo ya que son parte de este proyecto y de mi vida, por las cosas malas y buenas que hemos pasados, por estar siempre unidos como lo que somos una familia los quiero.

A mi compañera:

Por estar en los buenos y malos momentos de mi vida, por el cariño que me tiene y por estar siempre a mi lado María del Socorro Méndez Márquez.

A mis amigos:

Mixer, Aldren, Miguel, Isidro, Herlin y Cristian

Por ser parte de esta historia y compartir momentos de alegría, tristeza, éxitos y fracasos, por darme su amistad y apoyo en momentos difíciles.

RESUMEN

Los modelos alométricos son de gran importancia ya que estiman biomasa, carbono y dióxido de carbono, y mediante ellos es posible mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. El objetivo del presente estudio fue ajustar modelos alométricos para estimar biomasa aérea de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*. La biomasa aérea se estimó con el método indirecto (Método Adelaide) con una muestra de 50 árboles por especie. El estudio se llevó a cabo en dos ejidos en Saltillo, Coahuila, ejido Cuauhtémoc y ejido El Recreo, se ajustaron modelos de biomasa en los componentes de hojas-ramas, fuste y total usando diámetro normal y altura, seleccionando los modelos conforme a su mejor coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado). Los resultados indican que el diámetro normal estima adecuadamente la biomasa en cada componente de *Pinus cembroides* con un R^2 ajustado promedio de 0.86, en cambio en *Pinus halepensis* la biomasa es mejor estimada con diámetro normal y la altura, obteniendo así un R^2 ajustado de 0.79 en promedio. La biomasa almacenada por árbol es de 16.96 y 21.88 kg en promedio para *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*. Se observa que el método indirecto es un buen estimador de biomasa aérea en estas especies de coníferas, esos modelos pueden ser usados para cuantificar almacenes de carbono y dióxido de carbono en esta región.

Palabras clave: alometría, biomasa, carbono, *Pinus cembroides*, *Pinus halepensis*.

ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo general.....	3
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Hipótesis	3
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Cambio climático	4
2.2 Fotosíntesis	5
2.3 Dióxido de carbono.....	5
2.4 Biomasa	6
2.5 Modelos alométricos.....	7
2.6 Método de Adelaide.....	7
2.7 Almacenamiento de carbono	8
2.8 Porcentaje de carbono en componentes de especies.....	9
2.9 Trabajos afines	9
2.10 Descripción de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	13

2.11 Descripción de <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	13
3. MATERIALES Y MÉTODOS	15
3.1 Área de estudio	15
3.2 Generalidades de la especie <i>Pinus cembroides</i> Zucc y <i>Pinus halepensis</i> Mill.....	15
3.3 Muestreo de biomasa en <i>Pinus cembroides</i> Zucc. y <i>Pinus halepensis</i> Mill.	16
3.4 Tamaño de muestra y variables a medir	16
3.5 Trabajo en laboratorio.....	16
3.6 Obtención de biomasa por componente de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	17
3.6.1 Obtención de peso seco de hojas-ramas	17
3.6.2 Obtención de peso seco de fuste.....	17
3.6.3 Obtención de peso seco total del árbol	18
3.7 Ajuste y selección de modelos alométricos para estimar biomasa	18
3.8 Obtención de carbono	19
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1 Características dasométricas de los árboles muestreados de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	20
4.2 Parámetros de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de <i>Pinus cembroides</i>	22
4.3 Parámetros de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de <i>Pinus halepensis</i>	26

4.4 Representación del mejor modelo en cada componente de <i>Pinus cembroides</i>	31
4.5 Representación del mejor modelo en cada componente de <i>Pinus halepensis</i>	33
4.6 Relación en biomasa de hojas-ramas con biomasa de fuste en <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	34
4.7 Error por categoría diamétrica de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	36
4.8 Cálculo de biomasa y carbono de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	38
5. CONCLUSIONES	40
6. LITERATURA CITADA.....	41

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos para la estimación de biomasa aérea en <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	18
Cuadro 2. Características dasométricas en <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	20
Cuadro 3. Parámetros de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en <i>Pinus cembroides</i>	22
Cuadro 4. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos para estimar biomasa aérea en <i>Pinus cembroides</i>	24
Cuadro 5. Parámetros de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en <i>Pinus halepensis</i>	26
Cuadro 6. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos para estimar biomasa aérea en <i>Pinus halepensis</i>	28
Cuadro 7. Cálculo de biomasa y carbono en un árbol individual de <i>Pinus cembroides</i> y <i>Pinus halepensis</i>	38

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Biomasa observada y estimada de hojas-ramas, fuste y total en árboles provenientes de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> (A - C).....	31
Figura 2. Biomasa observada y estimada de hojas-ramas, fuste y total en árboles provenientes de una plantación de <i>Pinus halepensis</i> (D - F).	33
Figura 3. Relación en biomasa de hojas-ramas y biomasa de fuste con altura en <i>Pinus cembroides</i> (A) y con diámetro normal en <i>Pinus halepensis</i> (B).....	34
Figura 4. Error porcentual de estimación en biomasa por componente en cada categoría diamétrica de <i>Pinus cembroides</i> (A - C).	36
Figura 5. Error porcentual de estimación en biomasa por componente en cada categoría diamétrica de <i>Pinus halepensis</i> (D - F).	37

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente se reconoce la importancia de los bosques como un medio para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), causantes del cambio climático, en particular el dióxido de carbono (CO₂), para ello se preservan áreas naturales, y establecimiento de plantaciones que propician el almacenamiento de carbono por periodos prolongados, aunque en México existe muy poca información sobre estimación de biomasa, carbono y CO₂ en plantaciones forestales (Návar *et al.*, 2001; Aguirre y Jiménez, 2011).

La biomasa forestal se define como el peso de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo, y es normalmente cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco (Schlegel *et al.*, 2000). Estimar la biomasa de un árbol es de gran importancia ya que nos permite determinar los montos de carbono y la cantidad potencial que puede ser liberada a la atmósfera o conservada (Brown *et al.*, 1996).

La medición de la cantidad de biomasa aérea en cualquier componente de un árbol requiere un análisis destructivo directo o estimaciones indirectas del material vegetal para hacer las inferencias respectivas (Brown *et al.*, 1989). El método directo consiste en cortar el árbol y pesar las muestras directamente, determinando luego su peso seco, el método indirecto se puede realizar a través del volumen del fuste, utilizando la densidad básica para determinar el peso seco y un factor de expansión para determinar el peso seco total (Schlegel, 2001).

Una vez conocido los pesos de los distintos componentes es necesario ajustar un modelo alométrico que es la relación de los pesos secos (biomasa) con una o más variables representativas de los árboles (Montero *et al.*, 2005). El uso de los modelos alométricos desarrollados en diferentes regiones para la estimación de biomasa y dióxido de carbono

presentan limitaciones debido a las diferentes condiciones que rigen el crecimiento de los árboles, en las cuales se incluye la genética, el clima, suelo y las subpoblaciones locales, por eso los modelos son necesarios aplicarlos en la misma zona de estudio (Pacheco *et al.*, 2007; Álvarez, 2008).

El método Adelaide es un método indirecto para estimar biomasa, el cual consiste en tomar unas ramas a la que se le denomina unidad de mano o de referencia (Andrew *et al.*, 1979 y 1981; Cabral y West, 1986). Esta tiene que ser representativa en forma y densidad foliar a la especie de interés, con la unidad de mano se estima el número de unidades que caben en un árbol (Reyes y Foroughbackch, 1989).

Se puede afirmar que los bosques actúan como sumideros, ya que almacenan grandes cantidades de carbono durante periodos prolongados en sus tejidos (madera), al incrementar su biomasa anualmente debido al crecimiento e incremento, y también son fuentes de emisión debido a las pequeñas perturbaciones, como la mortalidad natural, a las grandes perturbaciones como los incendios y a otros procesos como la descomposición y oxidación de productos forestales (Montero *et al.*, 2005). Si se conoce la concentración de carbono y la biomasa por compartimento es factible estimar el contenido total de carbono en una especie con mayor precisión, aunque la concentración de carbono en las plantas es aproximadamente el 50 % de biomasa seca, sin embargo puede variar este valor dependiendo de la forma de crecimiento (Pompa y Yerena, 2014; Becerril *et al.*, 2014).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Ajustar modelos alométricos para estimar biomasa aérea de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

1.1.2 Objetivos específicos

- 1) Cuantificar biomasa aérea en árboles individuales de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis* mediante un método indirecto.
- 2) Ajustar modelos alométricos para estimar biomasa en hojas-ramas, fuste y total de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

1.2 Hipótesis

La biomasa aérea de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis* puede ser estimada mediante modelos alométricos usando variables dendrométricas.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Cambio climático

El cambio climático es la variación del estado del clima, que persiste durante largos periodos de tiempo, puede deberse a procesos internos naturales o a forzamientos externos tales como modulaciones de los ciclos solares, erupciones volcánicas o cambios antropógenos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso del suelo (IPCC, 2014).

El IPCC (2013) establece que las emisiones de CO₂ acumuladas determinarán el calentamiento global, la mayoría de los aspectos del cambio climático perdurarán durante muchos siglos, incluso aunque pararan las emisiones de CO₂, debido a las emisiones pasadas, presentes y futuras, las concentraciones de gases de efecto invernadero han aumentado causando mayor calentamiento y nuevos cambios en todos los componentes del sistema climático, para contener el cambio climático será necesario reducir de forma sustancial y sostenida las emisiones de gases de efecto invernadero.

Por ello los esfuerzos por disminuir los impactos que se han presentado en los diferentes ecosistemas y sectores del país relacionados con la variabilidad y el cambio climático, son el comienzo para la generación de la capacidad que conlleve la implementación de acciones que disminuyan el riesgo en zonas más vulnerables (Carmona *et al.*, 2014). En la actualidad el cambio es provocado parcialmente por el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera, principalmente el CO₂ emitido por actividades humanas (González *et al.*, 2003).

2.2 Fotosíntesis

González et al. (2008) mencionan que la fotosíntesis es el proceso por el cual las plantas convierten la energía luminosa en energía química en forma de todas las cadenas alimenticias de las que depende la vida animal y humana, se inicia cuando la luz es absorbida por los pigmentos fotosintéticos de los complejos antenas de la membrana fotosintética, parte de la energía absorbida es transferida como energía y atrapada por el centro de reacción, en donde es utilizada para hacer trabajo químicamente útil, y la otra parte es disipada principalmente como calor en menor grado reemitida como energía luminosa de menor energía (fluorescencia).

El potencial que representa el uso de especies forestales como mecanismo para la regulación del incremento en la concentración ambiental de CO₂ son orientadas hacia el conocimiento de la identificación de aquellas con mayor capacidad para la captura de carbono (fotosíntesis) para incorporarlas en sistemas de producción que permitan no solo hacer un uso más eficiente de la tierra sino también disminuir la contaminación ambiental (López *et al.*, 2001).

2.3 Dióxido de carbono

Los gases de efecto invernadero pueden distinguirse aquellos que se encuentran habitualmente en la naturaleza, cuyas emisiones son a si mismo incrementados por la actividad humana, entre los primeros gases se destacan el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso, los cuales han aumentado sus concentraciones a un 40 % desde la era preindustrial (Zilio, 2008; IPCC, 2013).

El aumento del dióxido de carbono ha sido una preocupación por eso se han implementado diferentes estrategias para capturar el carbono y así poder reducir la concentración del CO₂ en la atmósfera, ya sea a través de procesos bióticos o abióticos (Diaz *et al.*, 2007).

De La Vega (2007) nos dice que los árboles absorben dióxido de carbono (CO₂) atmosférico para convertirlos en madera, la cantidad de CO₂ que un árbol captura durante un año, consiste sólo en el pequeño incremento anual de la biomasa en el árbol.

2.4 Biomasa

Montero et al. (2005) mencionan que la biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo de la superficie del suelo, normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso seco, para la estimación de la biomasa arbórea es importante conocer la estructura, el funcionamiento y la dinámica de los sistemas forestales.

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa de un bosque, el método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando luego su peso seco y para estimar la biomasa con el método indirecto es a través de ecuaciones y modelos matemáticos calculados por medio de análisis de regresión entre las variables colectadas en terrenos por medio de inventarios forestales, por lo tanto, la estimación adecuada de la biomasa de un bosque es de gran importancia debido a que ésta permite determinar los montos de carbono (Schlegel, 2001).

2.5 Modelos alométricos

Los modelos alométricos son ecuaciones matemáticas que permiten estimar la biomasa, volumen y carbono total del árbol en función de variables de fácil medición como el diámetro normal y altura (Acosta *et al.*, 2002).

Los modelos alométricos se desarrollan para cada especie, pero si varias especies se encuentran en una misma vegetación, y presentan similitud en su morfología de crecimiento pueden tener una misma equivalencia de biomasa aérea, en este caso puede utilizarse una sola ecuación alométrica para estimar biomasa en varias especies (Rodríguez *et al.*, 2007).

Para el desarrollo de los modelos alométricos, es necesario realizar una serie de pasos los cuales son: la selección del sitio y de las especies, determinación del tamaño de la muestra, selección de los individuos por muestrear, obtención de pesos secos de los individuos muestreados, prueba de modelos y selección de los mejores modelos alométricos (Segura y Andrade, 2008).

2.6 Método de Adelaide

Reyes y Foroughbakhch (1989) compararon métodos indirectos para evaluar el potencial forrajero en un matorral tamaulipeco, donde evaluaron 15 individuos por cada una de las 10 especies leñosas de los matorrales tamaulipecos en diferentes tamaños de tal manera que se cubriera lo mayor posible el rango de variación, encontrando que el método no destructivo más adecuado para la determinación de biomasa forrajera es el método Adelaide en comparación con el método dimensional y de rama, con un coeficiente de determinación en promedio de 0.90, utilizando el modelo $y = a + b * x + c * x^2$ ($y =$ biomasa forrajera; $x =$ número de unidades contenidas en los individuos de cada especie).

Gholinejad et al. (2012) evaluaron y compararon diferentes métodos de estimación de producción forrajera en el suroeste de la ciudad de Sanandaj, Iran (en la Universidad de Kurdistan), los métodos son el método de Adelaide, método de doble muestreo, método de estimación, y método de recorte y ponderación, donde encontraron que el método Adelaide fue el mejor para estimar la producción forrajera.

2.7 Almacenamiento de carbono

Los árboles almacenan el carbono en su estructura leñosa por periodos prolongados, por lo que se le debe considerar como una opción para reservar áreas naturales de carbono, esto se debe ya que los árboles utilizan el CO₂ y liberan el oxígeno durante el proceso de la fotosíntesis, el componente aéreo constituye uno de los principales almacenes de carbono (Acosta *et al.*, 2002). Sin embargo los árboles no pueden fijar todo el CO₂ emitido por la actividad humana aunque la superficie arbórea se incrementara, los bosques juegan un papel muy importante en el ciclo del carbono, pues lo capturan de la atmósfera a medida que crecen, por eso son considerados como sumideros de carbono (Montero *et al.*, 2005).

El potencial de captura de carbono está ligado al potencial de formación de biomasa, las regiones donde resultan factibles los altos rendimientos de biomasa serán las zonas de mayor potencial de captura de carbono. En este contexto, la captura de carbono son aquellos que tienen el mayor potencial para el desarrollo de plantaciones de alto rendimiento en producción de biomasa (Rojo y Guevara, 2002).

2.8 Porcentaje de carbono en componentes de especies

Álvarez (2008) encontró en una plantación de *Centrolobium tomentosum* Guill. ex Benth, un mayor porcentaje de biomasa en el componente fuste con 53.01 % en comparación con hojas y ramas 46.99 %.

Pompa y Yerena (2014) indican que la concentración de carbono en *Pinus cembroides* Zucc., en el sur de Chihuahua es desde 51.3 % en hojas, 47.8 % en ramas y 47.7 % en el caso del fuste, una vez obtenido la concentración de carbono por componente es más factible estimar el contenido total de carbono con mayor precisión.

Becerril et al. (2014) encontraron que la concentración de carbono es aproximadamente el 50 % de la biomasa seca en *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*, sin embargo puede variar este valor dependiendo de la forma de crecimiento.

Yerena et al. (2012) realizaron un estudio en la concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México, donde encontraron que la especie *Pinus cembroides* Zucc., tiene una concentración de carbono de 50.25 %.

Montero et al. (2005) investigaron la producción y fijación de CO₂ en los bosques españoles, donde nos dicen que todas las maderas contienen aproximadamente un 50 % de carbono, para la especie *Pinus halepensis* Mill., tiene un 49.9 % de carbono.

2.9 Trabajos afines

Se realizó un estudio en Tlaxcala en *Pinus patula* Schl. et Cham, donde el mejor modelo que se ajustó fue $B = 0.0357 * Dn^{2.6916}$, en donde B es la biomasa aérea en kg y Dn es el diámetro normal en cm, obteniendo un coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$, el Dn de los 25 árboles

muestreados tienen un rango de 6.7 - 64.1 cm, obteniendo así una biomasa de 7.62 - 2,741.76 kg (Díaz *et al.*, 2007).

En una plantación de *Pinus gregii* Engelm., se seleccionaron 20 árboles en forma aleatoria, en cada árbol se midió el diámetro a la base del tallo, el diámetro normal y la altura total, los componentes de follaje se secaron a 70 °C y las ramas y fustes (madera) a 80 °C hasta alcanzar peso constante, el promedio de biomasa aérea por árbol fue de 8.0 kg distribuidos: 4.1 kg en fuste, 2.0 kg en follaje y 1.9 kg en ramas, el modelo que se ajustó tiene un $R^2 = 0.89$, el contenido de carbono promedio (en fuste, ramas y follaje) fue de 51 % (Pacheco *et al.*, 2007).

Álvarez (2008) menciona que en una plantación de *Centrolobium tomentosum* Guill. ex Benth, el diámetro normal fue la variable independiente más correlacionada con biomasa aérea (B) y un R^2 ajustada de 0.93, el modelo que más se ajustó fue lineal $B = a + b * D_n + c * D_n^2$, (D_n = diámetro normal) teniendo una biomasa aérea en promedio de 214.15 kg/árbol (en árboles entre 10.1 y 36.6 cm).

Torres (2013) dice que a los 21 años de edad en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., tuvo un diámetro promedio a la base 6.53 ± 1.38 cm y una altura de 2.62 ± 0.47 m, teniendo una biomasa promedio en ramas de 65.82 g en hojas, 31.65 g en ramas, 62.82 g en fuste, los componentes hojas y fuste (de ramas) son los más representativos en la acumulación de biomasa y por lo tanto mayor CO_2 .

Becerril *et al.* (2014) realizaron un método destructivo para estimar biomasa aérea donde encontraron valores de R^2 entre 0.62 y 0.96 en los diferentes componentes de hojas y ramas y fuste en las especies de *Prosopis laevigata* y *Acacia farnesiana*, utilizando variables independientes de altura total (m) y cobertura de copa (m^2).

Iturbide (2014) llevó a cabo un estudio para la cuantificación de biomasa mediante un modelo alométrico en *Pinus cembroides* Zucc., en tres procedencias las cuales fueron Mazapil Zacatecas (MZ), Concepción del oro, Zacatecas (CO), Santa victoria, Coahuila (SV), obteniendo (MZ) 7.18 kg de biomasa, 3.57 kg de carbono y 7.09 kg de CO₂, obtuvo (CO) una biomasa de 6.80 kg, 3.29 kg de carbono y 6.65 kg de CO₂ y (SV) una biomasa de 6.39 kg, conteniendo 3.24 kg de carbono y 6.44 kg de CO₂, la biomasa, carbono y el CO₂ que se obtuvo de cada procedencia (MZ, CO Y SV) fue por árbol con un diámetro a la base de 8 cm.

En una plantación de *Pinus halepensis* se seleccionaron 20 árboles, en cada árbol previo a su derribo se midió el diámetro normal (cm) y altura (m), los componentes (hojas, ramas y fuste) fueron secados a una temperatura de 80 °C por 8 días hasta alcanzar el peso anhidro, obteniendo una biomasa en promedio de 7.9 en hojas, 17.5 en ramas, 27.3 en fuste y 52.8 total en kg/árbol de acuerdo al modelo $\ln B = a + b * \ln D_n$, en donde B es la biomasa por componente en kg y D_n es el diámetro normal en cm, donde el mejor ajuste se obtuvo en el componente fuste y total con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.94$, mientras los ajustes más bajos se observaron en hojas y ramas (R^2 de 0.56 y 0.77) (López, 2012).

Méndez et al. (2011) utilizaron 9 ecuaciones alométricas para evaluar componentes de biomasa aérea en una plantación mixta de *Pinus pseudostrobus* y *Pinus devoniana*, obteniendo en *Pinus pseudostrobus* un R^2 promedio de 0.87 (en los componentes ramas y hojas, fuste y total) y en *Pinus devoniana* $R^2 = 0.73$, el diámetro normal fue la variable independiente que predijo eficientemente la biomasa en cada componente de ambas especies, donde obtuvieron 39.36 t B ha⁻¹, 19.68 t C ha⁻¹ y 72.02 t CO₂e ha⁻¹, a los 12 años de haberse establecida la plantación (t = toneladas, B = biomasa aérea, C = carbono, CO₂e = dióxido de carbono equivalente).

Montero et al. (2005) realizaron un estudio para producción de biomasa en *Pinus halepensis* con el modelo $\ln B = a + b * \ln D_n$, donde B es la biomasa por componente en kg y D_n es el diámetro normal en cm, indicando un R^2 ajustado en promedio = 0.85 (biomasa en ramas y hojas, fuste y total), con un diámetro normal de 15 cm se obtuvo una biomasa de 22.2 kg en hojas y ramas, 27.4 kg en fuste y 49.5 kg en total.

Xiao y Ceulemans (2004) realizaron un estudio en *Pinus sylvestris* en el campus de la universidad de Antwerpen Bélgica, donde determinaron un modelo alométrico para estimar biomasa aérea (B), donde $B = a + D_n * H^b + DC * c$, (D_n = diámetro normal, H = altura y DC = diámetro de copa) obteniendo un R^2 ajustado > 0.97, con una biomasa media total de 13.38 kg/árbol (con un error estándar de 2.61 kg) en función de las variables independientes, diámetro normal de 7.16 cm, altura de 5.06 m y 4.62 m en diámetro de copa.

Según Domingo et al. (2016) realizaron un estudio en Málaga, España, donde aplicaron un modelo alométrico y encontraron un R^2 ajustado = 0.89 y una biomasa total = 262,659.74 toneladas en un inventario de 1,870 árboles en *Pinus halepensis*, midiendo la variable diámetro normal con diámetros superiores a 7.5 cm.

Návar et al. (2001) determinaron una ecuación lineal para estimar biomasa aérea con coeficientes de determinación más bajos en biomasa de hojas y ramas ($R^2 < 0.66$, con errores $S_e < 1.57$ kg) en comparación con la biomasa de fuste ($R^2 = 0.83$, con un error $S_e = 3.12$ kg) y biomasa total ($R^2 = 0.87$, con un error $S_e = 4.15$ kg) en plantaciones de *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi* en el Salto, Durango, donde levantaron datos de 25 árboles en *Pinus durangensis* y 19 en *Pinus cooperi*.

Návar (2011) realizó un estudio en los bosques templados secos de pinos del noreste de México, los cuales muestreó 20 árboles con diámetros de 1.40 a 14.40 cm en las especies de: *Pinus cembroides* (4 árboles), *Pinus gordonii* (5 árboles), *Pinus pseudostrobus* (7 árboles), *Pinus brutia* (2 árboles) y *Cupressus arizonica* (2 árboles), obteniendo con el modelo alométrico $B = a + Dn^b$, (B = biomasa por componente y Dn = diámetro normal) un $R^2 = 0.60$, 0.87 y 0.81 en biomasa de hojas y ramas, en biomasa de fuste y en biomasa total.

2.10 Descripción de *Pinus cembroides* Zucc

CONAFOR (2001) nos dice que es originaria de México, y se extiende al sur de los Estados Unidos, es una de las más distribuidas en México, donde las mayores poblaciones se encuentran en Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Zacatecas, alcanzan alturas de 5 m hasta 15 m, con un diámetro normal de 30 hasta 70 cm, es una especie monoica de lento crecimiento, con altitudes de 400 a 3,750 msnm. CONABIO (2001) nos dice que se desarrollan en laderas de cerros y lomeríos, pendientes secas y rocosas al pie de las montañas, en clima templado seco (Bsk) hasta templado subhúmedo (Cwb) con precipitaciones de 365 a 450 mm anuales y con 7 u 8 meses secos, las temperaturas oscilan entre 7 °C hasta 40 °C con promedios de 18 °C, es una especie típica de suelos pobres, secos, pedregosos o calizos, calcáreos con alto contenido de yeso y con un pH de 4 a 8, normalmente prefieren los suelos de neutros alcalinos, estos pinos son atractivos para reforestar en zonas áridas y semiáridas, y muy resistentes a la sequía, evitan la erosión y favorecen la infiltración del agua restableciendo los mantos subterráneos.

2.11 Descripción de *Pinus halepensis* Mill

Es originaria de la zona mediterránea de Europa, Asia y África, se distribuye en varios estados de México, en áreas semiáridas, con alturas de 15 a 20 m y hasta 70 cm de diámetro normal y

una altitud desde el nivel del mar hasta 2,220 msnm, con un pH alcalino, neutro o ácido, una temperatura mínima de 2 °C a una máxima de 34 °C, precipitaciones de 400 a 800 mm, tiene una gran capacidad de adaptación a diversos climas y suelos, se adapta a zonas secas aun con sitios con 250 mm de precipitación anualmente, con ocho meses de sequía, tiene la capacidad de soportar altas temperaturas y son resistentes a las heladas, son buenos para proteger suelos deficientes de humedad, se utiliza en fijación de dunas en terrenos erosionados, además de tener un potencial para cortinas rompevientos de corta altura (CONAFOR, 2001; Fady *et al.*, 2008).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Área de estudio

En la zona del estudio existe vegetación de bosque de pino, matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo, con clima árido semicálido (BSohw) y semiárido templado (BS1kw) con lluvias de verano, con una precipitación media anual de 125 a 400 mm, con presencia de suelo litosol y xerosol cálcico, con temperatura media anual de 14 a 18 °C (García, 1998).

Este trabajo se realizó en dos ejidos en Saltillo, Coahuila. El primer ejido Cuauhtémoc, se ubica en las coordenadas 25° 16' 45.60" Norte y 100° 59' 20.49" Oeste, a una altitud de 2,162 metros sobre el nivel del mar (msnm) y el segundo ejido El Recreo con coordenadas de 25° 14' 43.94" Norte y 101° 04' 26.47" Oeste, a una altitud de 1982 msnm.

3.2 Generalidades de la especie *Pinus cembroides* Zucc y *Pinus halepensis* Mill.

Pinus cembroides Zucc., se restringe a las montañas de bajas alturas del altiplano en México, este pino se localiza desde Arizona, suroeste de nuevo México y Texas en Estados Unidos, norte y centro de México hasta Puebla, esta especie prefiere el clima seco del altiplano (BS) con una temperatura media anual de 12 a 18 °C, donde el mes más caliente es junio y el más frío diciembre o enero, con precipitaciones anuales entre 300 a 700 mm y puede habitar en suelos derivados de cualquier sustrato, preferentemente oscuro (Romero *et al.*, 1996).

Herranz (2000) menciona que el *Pinus halepensis* Mill., se da de manera espontánea en los países ribereños del mar mediterráneo y es la más extendida de esta región, los factores determinantes de su distribución parece ser las temperaturas, esta especie es heliófila, termófila y xerófila, se adapta perfectamente a la sequía, es un árbol muy representativo en las

zonas semiáridas mediterráneas, lo cual soporta 250 mm de precipitación anual y periodos secos de 1 a 5 meses, teniendo un límite altitudinal absoluto de 2600 msnm, a una temperatura media de las mínimas que oscilan entre -2 °C y 10 °C.

3.3 Muestreo de biomasa en *Pinus cembroides* Zucc. y *Pinus halepensis* Mill.

El método que se utilizó para la estimación de biomasa aérea de las especies de *Pinus cembroides* Zucc y *Pinus halepensis* Mill., es un método indirecto en el cual se seleccionó un árbol promedio en función de su diámetro y altura, el cual se dividió en tres secciones en alturas, por cada sección se cortó una rama promedio por única vez. La rama obtenida por sección se le denominó muestra representativa, que se utilizó como referencia según el método Adelaide. Después, con la muestra representativa de cada sección se cuantificó cuantas veces cabían en su respectiva sección del árbol.

3.4 Tamaño de muestra y variables a medir

El muestreo de los árboles fue selectivo, con un total de 100 árboles, 50 árboles para la especie *Pinus cembroides* Zucc. y 50 para *Pinus halepensis* Mill., en cada árbol se midió el diámetro normal (cm), diámetro menor y mayor de cada sección (cm), diámetro de copa (cm) y alturas de cada sección (m).

3.5 Trabajo en laboratorio

La rama promedio que se cortó en cada sección, se sometió a una estufa de secado Blue M. modelo POM-246F serial P6-800 a una temperatura de 70 °C por 7 días (Pacheco *et al.*, 2007). Después del secado, se obtuvo su peso seco con la báscula PZC-5 Pizza Controller Torrey con una capacidad de 5 kg, esto se realizó en el laboratorio del Departamento de Recursos Naturales Renovables de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro (UAAAN).

3.6 Obtención de biomasa por componente de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

3.6.1 Obtención de peso seco de hojas-ramas

Una vez obtenido el valor del peso seco de cada rama promedio se multiplicó por la estimación del número de ramas de la sección correspondiente del árbol, el resultado de la multiplicación es el peso seco de hojas-ramas de cada sección, la multiplicación se realizó para las tres secciones del árbol, una vez multiplicados las tres secciones los resultados de la multiplicación se sumaron y se obtuvo el peso seco de hojas-ramas del árbol individualmente.

3.6.2 Obtención de peso seco de fuste

Para obtener el peso seco de fuste se necesita el volumen del árbol y la densidad básica. Para obtener el volumen se aplicó la fórmula 1:

$$V = \left(\frac{0.7854 * (Dm)^2 + 0.7854 * (DM)^2}{2} \right) * L \quad 1)$$

Dm = diámetro menor en metros de la sección 1, 2 y 3.

DM = diámetro mayor en metros de la sección 1, 2 y 3.

L = altura en m.

La fórmula 1 se aplicó por cada sección del árbol en los 50 árboles por especie para obtener el volumen en m³, una vez obtenido el resultado de la fórmula 1, se sumaron las tres secciones y se obtuvo el volumen total del árbol, la densidad básica en *Pinus cembroides* es de 450 kg/m³ determinado por Revilla (2011) y 494 kg/m³ en la especie de *Pinus halepensis* proporcionado por Ruano (2011). Para obtener el peso seco de fuste de cada árbol en kg se multiplicó el volumen total del árbol por la densidad básica de cada especie.

3.6.3 Obtención de peso seco total del árbol

El peso seco total del árbol se obtuvo sumando el peso seco de hojas-ramas y el peso seco de fuste en unidades de kilogramos.

3.7 Ajuste y selección de modelos alométricos para estimar biomasa

La estimación de biomasa por componente (hojas-ramas, fuste y total) se realizó mediante modelos de regresión linealmente en forma logarítmica los cuales se muestran en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Modelos para la estimación de biomasa aérea en *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

M	Modelo
1	$\ln B = a + b \ln Dn$
2	$\ln B = a + b \ln (Dn^2 H)$
3	$\ln B = a + b \ln Dn + c (\ln Dn)^2$
4	$\ln B = a + b \ln Dn + c (\ln Dn)^2 + d (\ln Dn)^3$
5	$\ln B = a + b \ln Dn + c (\ln Dn)^2 + d (\ln Dn)^3 + e (\ln Dn)^4$
6	$\ln B = a + b \ln Dn + c \ln H$

Donde: M = modelo; ln = logaritmo natural; B = biomasa (kg); *a*, *b*, *c*, *d* y *e* = parámetros de regresión; Dn = diámetro normal (cm); H = altura total (m).

Los seis modelos del Cuadro 1 se ajustaron en el programa estadístico R-commander (R, 2013). Todos los modelos son logarítmicos, esta transformación es de gran utilidad ya que corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente con respecto a los datos

de la variable dependiente (Brown *et al.*, 1989). Es necesario hacer la transformación ya que la varianza es altamente inestable en unidades aritméticas y la transformación logarítmica rectifica este problema (Baskerville, 1972). Es por eso que en este estudio se utilizaron únicamente modelos logarítmicos. Los modelos se evaluaron con los siguientes estadísticos: coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) y su significancia $P \leq 0.10$ en cada uno de sus parámetros de regresión por modelo.

3.8 Obtención de carbono

La biomasa de cada componente (hojas-ramas, fuste y total) se multiplicó por el factor 0.5025 proporcionado por Yerena *et al.* (2012) en la especie de *Pinus cembroides* y 0.499 determinado por Montero *et al.* (2005) en la especie de *Pinus halepensis* transformándose así a contenido de carbono, para ambas especies los factores corresponden a la fracción de carbono (%) en la biomasa seca de la madera.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Características dasométricas de los árboles muestreados de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*

Cuadro 2. Características dasométricas en *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

Especies	n	Dn	H	Bhr	Bf	Bt
		Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx
<i>Pinus cembroides</i>	50	6.1 – 11.0	2.9 – 4.4	7.3 – 16.0	3.4 – 14.6	10.8 – 30.6
<i>Pinus halepensis</i>	50	6.9 – 22.8	3.1 – 6.7	7.8 – 37.8	7.9 – 52.6	16.7 – 90.4

Donde: n = número de árboles muestreados; Dn = diámetro normal (cm); H = altura (m); Bhr = biomasa de hojas-ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); Bt = biomasa total (kg); Mín = mínimos; Máx = máximos.

Respecto a los datos de los árboles muestreados, se puede observar que el diámetro normal y la altura son más grandes por 11.8 cm y 2.3 m de los máximos en *Pinus halepensis* a comparación de *Pinus cembroides*, la especie *Pinus halepensis* presenta mayor diferencia en biomasa de 21.8, 38 y 59.8 kg en biomasa de hojas-ramas, biomasa de fuste y biomasa total respecto a *Pinus cembroides* (Cuadro 2).

López (2012) ajustó modelos alométricos en biomasa aérea en una plantación de *Pinus halepensis*, obteniendo diámetros normales muy similares a la especie de este estudio (*Pinus halepensis*) de 5.0 a 22.0 cm y alturas mayores que van desde los 4.0 hasta los 10.0 m, con una biomasa aérea mínima de 8.0 kg y una biomasa aérea máxima de 190 kg, las cuales fueron

diferentes a lo que se encontró en este estudio (*Pinus halepensis*). Pero Návar (2011) estudió cinco especies en los bosques templados del noreste de México (*Pinus cembroides*, *Pinus pinceana*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus brutia* y *Cupressus arizonica*) encontrando diámetros normales y alturas mínimas más pequeñas a las especies de este estudio (*Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*) de 1.4 cm y 1.5 m, los diámetros normales y alturas máximas de 14 cm y 8.2 m fueron mayores a los que presentó *Pinus cembroides*, en cambio para *Pinus halepensis* fueron menores, en biomasa de hojas-ramas y fuste se obtuvo valores mínimos de 1.1 y 0.7 kg que son menores a las especies de este estudio, sin embargo la biomasa de hojas-ramas y fuste máxima fueron de 30 y 29.2 kg siendo mayor a la de este estudio en *Pinus cembroides* y menor biomasa de hojas-ramas y fuste en *Pinus halepensis*. Acosta et al. (2002) realizaron ecuaciones alométricas en *Clethra hartwegii* que es típica del bosque mesófilo de montaña, encontrando diámetros normales desde 3.5 a 14.8 cm, con una biomasa aérea de 2.2 a 40.4 kg, la cual fueron diferentes a la especies de este estudio.

En la especie de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis* de este estudio, se seleccionaron 50 árboles por cada especie para estimar biomasa aérea mediante modelos alométricos, los árboles seleccionados por cada especie fueron mayores a los árboles utilizados por Méndez et al. (2011) donde utilizaron 40 árboles en una plantación de (20 árboles) *Pinus pseudostrobus* y (20 árboles) *Pinus devoniana* para estimar biomasa aérea, carbono y carbono equivalente mediante ecuaciones alométricas en el estado de Guanajuato, México. López (2012) realizó un estudio en ecuaciones alométricas y estimación en biomasa aérea en una plantación de *Pinus halepensis*, donde utilizó 20 árboles representativos, el número de árboles es menor a los árboles utilizados en este estudio (*Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*).

4.2 Parámetros de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de *Pinus cembroides*

Cuadro 3. Parámetros de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus cembroides*.

M	a	t	b	t	c	t	d	t	e	t
Biomasa de hojas-ramas										
1	-1.055	-4.283	1.560	13.583	-	-	-	-	-	-
2	-0.916	-3.779	0.571	13.235	-	-	-	-	-	-
3	14.005	7.721	-12.775	-7.421	3.398	8.335	-	-	-	-
4	46.381	1.994	-59.239	-1.778	25.539	15.862	-3.504	2.509	-	-
5	-1140.09	-4.334	2215.13	4.398	-1604.52	-4.449	514.22	4.492	-61.490	-4.523
6	-1.058	0.261	1.571	4.936	-0.015	-0.037	-	-	-	-
Biomasa de fuste										
1	-1.685	-5.559	1.799	12.736	-	-	-	-	-	-
2	-1.566	-5.475	0.666	13.077	-	-	-	-	-	-
3	-8.103	-2.395	7.908	2.463	-1.448	-1.904	-	-	-	-
4	-95.506	-2.255	133.347	2.197	-61.223	-2.119	9.459	2.070	-	-
5	-153.955	-0.266	245.389	0.222	-141.524	-0.179	34.964	0.139	-3.029	-0.101
6	-1.555	-4.955	1.297	3.382	0.712	1.407	-	-	-	-
Biomasa total										
1	-0.613	-3.956	1.653	22.873	-	-	-	-	-	-
2	-0.484	-3.240	0.608	22.860	-	-	-	-	-	-

3	5.078	3.191	-3.764	-2.492	1.284	3.590	-	-	-	-
4	-9.265	-0.447	16.821	0.567	-8.525	-0.603	1.552	0.694	-	-
5	-655.440	-2.467	1255.48	2.468	-896.290	-2.461	283.510	2.452	-33.490	-2.439
6	-0.558	-3.454	1.439	7.291	0.303	1.161	-	-	-	-

Donde: M = modelo; a , b , c , d y e = parámetros de regresión.

En relación al Cuadro 3, los modelos 4 y 6 no fueron buenos por sus significancias ($P > 0.10$) de los parámetros en cuanto al resto de modelos si lo fueron ($P < 0.10$) en biomasa de hojas-ramas y biomasa total, aunque para biomasa de fuste los modelos 5 y 6 no tuvieron buena significancia ($P > 0.10$), los modelos del 1 al 4 si tuvieron buena significancia ($P < 0.10$), sin embargo se observa que los valores estimados de los parámetros que representan las ordenadas al origen (a) y las pendientes (b , c , d y e) tienen una cierta similitud en sus signos entre componentes.

Los parámetros de regresión obtenidos del modelo 3 en biomasa de hojas-ramas y biomasa total, y del modelo 4 en biomasa de fuste fueron diferentes al estudio de Álvarez (2008) donde utilizó el mismo modelo en biomasa total, reportando parámetros de $a = 185.149$, $b = 22.447$, y $c = 1.012$ en *Centrolobium tomentosum*. Con la misma variable independiente de diámetro normal pero con diferentes modelos en biomasa total Díaz et al. (2007) y Rodríguez et al. (2012) encontraron parámetros más pequeños que el de nuestro estudio (*Pinus cembroides*) de $a = 0.035$, 0.001 y $b = 2.691$, 1.980 en *Pinus patula*. Méndez et al. (2011) utilizaron un modelo exponencial en *Pinus pseudostrobus* donde reportaron parámetros diferentes al de nuestro estudio en *Pinus cembroides* de $a = -0.094$, $b = 0.181$ en biomasa de hojas-ramas, $a = 1.051$, $b = 0.140$ en biomasa de fuste, y $a = 1.250$, $b = 0.157$ en biomasa total.

Cuadro 4. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus cembroides*.

M	R²ajustada	Syx	CV	P > F	n
Biomasa de hojas-ramas					
1	0.81	1.07	10.58	2.20E-16	50
2	0.80	1.10	10.86	2.20E-16	50
3	0.90	0.80	7.88	2.20E-16	50
4	0.91	0.74	7.33	2.20E-16	50
5	0.86	0.93	9.21	2.20E-16	50
6	0.81	1.08	10.69	2.20E-16	50
Biomasa de fuste					
1	0.74	1.10	12.23	2.20E-16	50
2	0.75	1.09	12.12	2.20E-16	50
3	0.74	1.12	12.39	2.20E-16	50
4	0.75	1.08	11.94	2.20E-16	50
5	0.75	1.09	12.05	1.79E-15	50
6	0.74	1.11	12.25	3.21E-16	50
Biomasa total					
1	0.92	1.23	6.44	2.20E-16	50
2	0.92	1.25	6.56	2.20E-16	50
3	0.94	1.07	5.62	2.20E-16	50
4	0.93	1.10	5.75	2.20E-16	50
5	0.50	3.03	15.86	2.20E-16	50

6	0.92	1.24	6.47	2.20E-16	50
---	------	------	------	----------	----

Donde: M = modelo; Syx = error estándar (kg); CV = coeficiente de variación (%); P > F = significancia del modelo; n = número de árboles.

El modelo 3 demostró los mejores ajustes en biomasa de hojas-ramas y biomasa total con un R^2 ajustado > 0.90, mientras que el ajuste más bajo se observó en biomasa de fuste con un R^2 ajustado = 0.75 correspondiente al modelo 4, dando así un R^2 promedio de 0.86, con un error de 0.80 a 1.08 kg y un coeficiente de variación de 5.62 a 11.94 % en los componentes (Cuadro 4).

Návar et al. (2001) estimaron biomasa aérea por componente en 25 árboles de *Pinus durangensis* y 19 árboles en *Pinus cooperi* encontrando coeficientes de determinación más bajos que el de este estudio (*Pinus cembroides*) con un $R^2 < 0.66$ en biomasa de hojas-ramas y un R^2 de 0.87 en biomasa total, pero en biomasa de fuste obtuvo un mejor R^2 de 0.83 que *Pinus cembroides*, pero con mayores errores desde 1.21 hasta 4.15 kg. Schelegel (2001); Aguirre y Jiménez (2011) reportaron un R^2 ajustado de 0.94 en biomasa aérea que es similarmente al de este estudio (*Pinus cembroides*) pero con un menor error de 0.33 kg en *Drymis winteri*, *Pinus pseudostrobus* y *Pinus teocote*. Con el mismo modelo de *Pinus cembroides* del estudio (Modelo 3) Álvarez (2008) encontró un menor R^2 ajustado de 0.93 y también un menor error de 0.67 kg en biomasa aérea de *Centrolobium tomentosum*. Otros estudios, reportaron un R^2 ajustado de 0.97, y un error de 2.61 kg en *Pinus sylvestris*, el ajuste y el error fueron mayores en comparación de *Pinus cembroides* en este estudio, donde utilizaron el diámetro normal como la variable independiente para predecir biomasa total (Xiao y Ceulemans, 2004). Pacheco et al. (2007) reportaron un R^2 de 0.89 que fue menor al

ajuste de *Pinus cembroides* utilizando el modelo $B = a * Dn^2 + b * H$ (B = biomasa aérea, Dn = diámetro normal y H = altura) en biomasa aérea de *Pinus greggii*. Sin embargo Méndez et al. (2011) registraron un R² promedio de 0.87 en biomasa de hojas-ramas, biomasa de fuste y biomasa total en *Pinus pseudostrobus* que es semejante al de nuestro estudio en *Pinus cembroides*.

4.3 Parámetros de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de *Pinus halepensis*

Cuadro 5. Parámetros de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus halepensis*.

M	a	t	b	t	c	t	d	t	e	t
Biomasa de hojas-ramas										
1	0.223	0.706	1.067	8.339	-	-	-	-	-	-
2	-0.061	-0.179	0.444	8.563	-	-	-	-	-	-
3	2.598	1.160	-0.867	-0.479	0.389	1.071	-	-	-	-
4	15.745	0.909	-16.878	-0.804	6.821	0.811	-0.852	-0.766	-	-
5	154.474	1.118	-243.361	-1.083	144.351	1.060	-37.669	-1.035	3.666	1.012
6	-0.013	-0.037	0.938	5.823	0.338	1.301	-	-	-	-
Biomasa de fuste										
1	-0.759	-2.509	1.508	12.301	-	-	-	-	-	-
2	-1.198	-3.871	0.633	13.435	-	-	-	-	-	-
3	0.076	0.035	0.828	0.472	0.137	0.389	-	-	-	-

4	-18.522	-1.113	23.478	1.164	-8.962	-1.109	1.206	1.127	-	-
5	-197.831	-1.503	316.210	1.477	-186.721	-1.440	48.792	1.407	-4.739	-1.373
6	-1.193	-3.616	1.272	8.665	0.622	2.623	-	-	-	-
Biomasa total										
1	0.425	1.673	1.292	12.572	-	-	-	-	-	-
2	0.064	0.243	0.540	13.481	-	-	-	-	-	-
3	2.154	1.194	-0.116	-0.080	0.283	0.969	-	-	-	-
4	1.070	0.076	1.205	0.071	-0.247	-0.036	0.070	0.078	-	-
5	-8.289	-0.073	16.484	0.089	-9.525	-0.085	2.554	0.086	-0.247	-0.083
6	0.094	0.336	1.112	8.926	0.473	2.351	-	-	-	-

Donde: M = modelo; *a*, *b*, *c*, *d* y *e* = parámetros de regresión.

Referente al Cuadro 5, los parámetros tuvieron buenas significancias ($P < 0.10$) en los modelos 1, 2 y 6, sin embargo los modelos 3, 4 y 5 no fueron buenos porque tuvieron una significancia mayor a 0.10 en los componentes de biomasa de fuste y total, en cuanto a biomasa de hojas-ramas los modelos 1 y 2 obtuvieron buenas significancias ($P < 0.10$) en comparación con el resto de los modelos, así también el modelo 2 fue el que presentó una cierta similitud de los parámetros respecto a las pendientes de (*b*) 0.444 en biomasa de hojas-ramas, (*b*) 0.633 en biomasa de fuste y (*b*) 0.540 en biomasa total.

En *Pinus halepensis* los parámetros de regresión se obtuvieron del modelo 2 ya que fue el mejor en cada uno de sus componentes. Méndez et al. (2011) usaron las mismas variables independientes ($Dn^2 * H$) para predecir biomasa aérea, encontrando parámetros diferentes de *a* = 4.660, *b* = 0.006 en hojas-ramas, *a* = 6.183, *b* = 0.009 en fuste, y *a* = 10.843, *b* = 0.014 en

biomasa total para *Pinus devoniana*. Montero et al. (2005) en la misma especie de este estudio (*Pinus halepensis*) encontraron parámetros mayores de $a = -5.673$, $b = 2.661$ en biomasa de ramas, $a = -2.518$, $b = 2.136$ en biomasa de fuste, y $a = -2.093$, $b = 2.209$ en biomasa total, utilizando una ecuación alométrica en forma logarítmica con una sola variable de diámetro normal. En la misma especie de este estudio (*Pinus halepensis*) López (2012) encontró semejanza de los valores negativos en las ordenadas al origen y valores positivos en las pendientes de biomasa hojas-ramas y biomasa de fuste, sin embargo para biomasa total fue diferente ya que la ordenada al origen y la pendiente fueron positivas en nuestro estudio (*Pinus halepensis*). Otros autores como Acosta et al. (2002) y Rodríguez et al. (2007) utilizaron el modelo $B = a * Dn^b$ reportando parámetros mayores al de este estudio (*Pinus halepensis*) de $a = -1.900$, -3.164 , y $b = 2.150$, 2.599 en las especies de *Clethra hartwegii* y *Pinus pseudostrobus* para biomasa aérea.

Cuadro 6. Estadísticos de ajuste de los modelos alométricos para estimar biomasa aérea en *Pinus halepensis*.

M	R²ajustada	Syx	CV	P > F	n
Biomasa de hojas-ramas					
1	0.65	4.07	22.24	6.80E-01	50
2	0.67	3.99	21.81	3.14E-11	50
3	0.65	4.09	22.35	4.11E-10	50
4	0.65	4.12	22.50	2.11E-09	50
5	0.63	4.19	22.91	6.93E-09	50
6	0.66	4.03	22.00	3.15E-10	50

Biomasa de fuste					
1	0.81	4.56	21.66	2.2E-16	50
2	0.85	4.04	19.17	2.2E-16	50
3	0.81	4.57	21.67	2.73E-15	50
4	0.79	4.82	22.88	1.45E-14	50
5	0.81	4.58	21.72	4.52E-14	50
6	0.85	4.09	19.39	2.2E-16	50
Biomasa total					
1	0.82	7.14	18.13	2.20E-16	50
2	0.85	6.50	16.50	2.20E-16	50
3	0.82	7.09	18.01	8.48E-16	50
4	0.81	7.18	18.23	8.60E-15	50
5	0.81	7.23	18.35	6.78E-14	50
6	0.84	6.59	16.72	2.20E-16	50

Donde: M = modelo; Syx = error estándar (kg); CV = coeficiente de variación (%); $P > F$ = significancia del modelo; n = número de árboles.

Respecto al Cuadro 6, el modelo 2 demostró los mejores ajustes en los componentes de biomasa hojas-ramas, biomasa de fuste y biomasa total con una R^2 ajustada de 0.67 a 0.85, obteniendo un R^2 promedio de 0.79, con un error estándar < 6.50 kg y un coeficiente de variación < 21.81 %.

Návar (2011) encontró menores ajustes a nuestra especie (*Pinus halepensis*) de estudio de 0.60 y 0.81 en biomasa de hojas-ramas y biomasa total, sin embargo en biomasa de fuste obtuvo un mayor ajuste de 0.87, con mayores errores al de este estudio (*Pinus halepensis*) de 9.4 kg en cinco especies de bosques templados del noreste de México (*Pinus cembroides*, *Pinus pinceana*, *Pinus pseudostrobus*, *Pinus brutia* y *Cupressus arizonica*). En la misma especie de este estudio (*Pinus halepensis*) Domingo et al. (2016) reportaron una mayor R^2 ajustada de 0.89 en biomasa aérea. También López (2012) en esta misma especie de *Pinus halepensis* encontró aún mejores ajustes de 0.94 en biomasa de fuste y total, y 0.77 en biomasa de hojas-ramas, con un mayor error de 12.59 kg. Rodríguez et al. (2012) encontraron un mayor ajuste (que el de *Pinus halepensis*) de 0.87, pero con un menor error de 5.0 kg en biomasa aérea de *Pinus patula*. Sin embargo Montero et al. (2005) reportaron una R^2 ajustada en promedio de 0.85 teniendo un error < 0.92 kg, en la cual el ajuste es mayor y el error menor en esta misma especie (*Pinus halepensis*) del estudio. Pero Méndez et al. (2011) registraron un R^2 promedio menor al de *Pinus halepensis* de 0.73 en biomasa de hojas-ramas, biomasa de fuste y total en *Pinus devoniana*.

4.4 Representación del mejor modelo en cada componente de *Pinus cembroides*

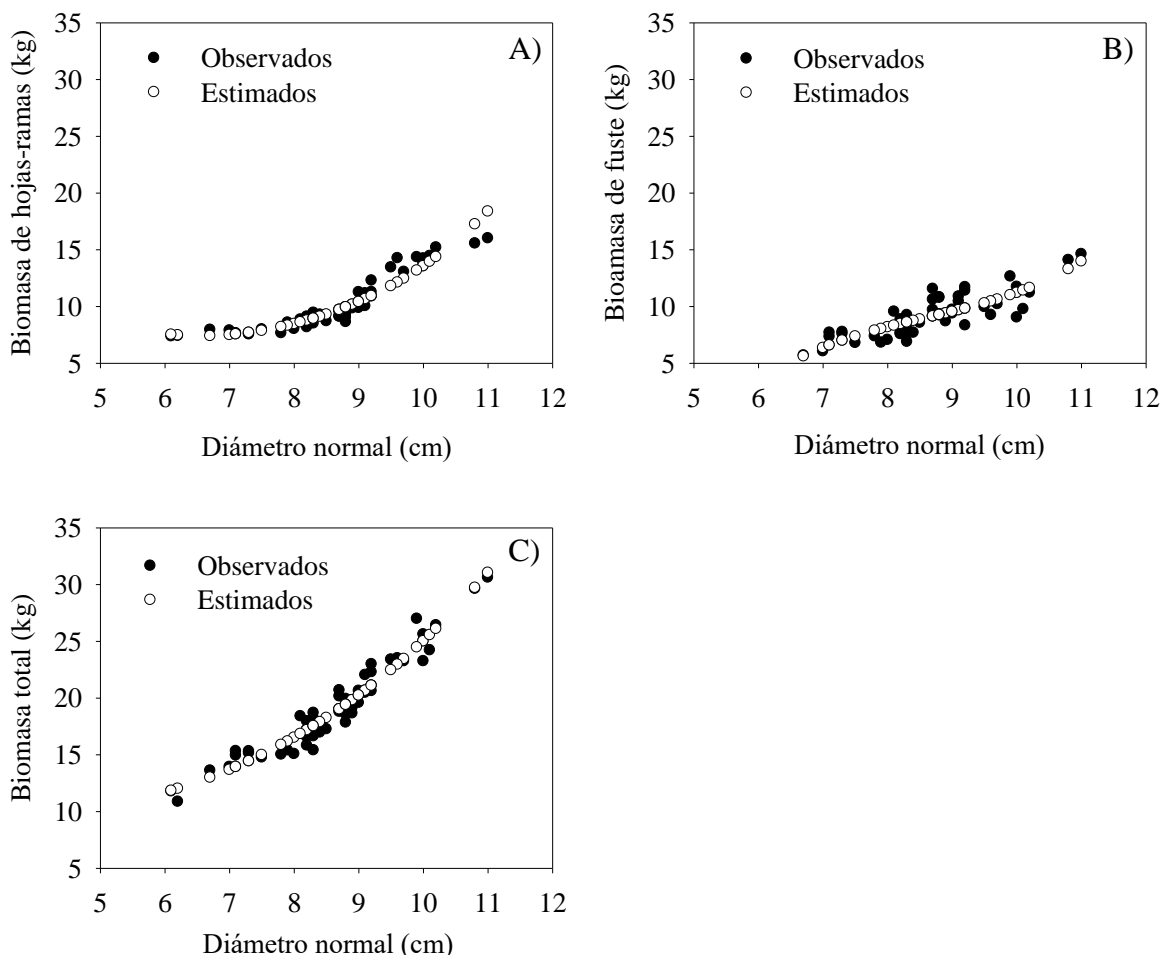


Figura 1. Biomasa observada y estimada de hojas-ramas, fuste y total en árboles provenientes de una plantación de *Pinus cembroides* (A - C).

De los 6 modelos que se probaron (Cuadro 1), el modelo 3 fue el que más se ajustó y se representó en biomasa de hojas-ramas (Figura 1A) y biomasa total (Figura 1C) en cambio para biomasa de fuste (Figura 1B) el modelo 4 fue el que se representó. Se observa una menor dispersión en los valores de biomasa total (Figura 1C) debido a su coeficiente de variación de

5.62 % y una mayor dispersión en biomasa de fuste (Figura 1B) por su coeficiente de variación de 11.94 % (Cuadro 4).

4.5 Representación del mejor modelo en cada componente de *Pinus halepensis*

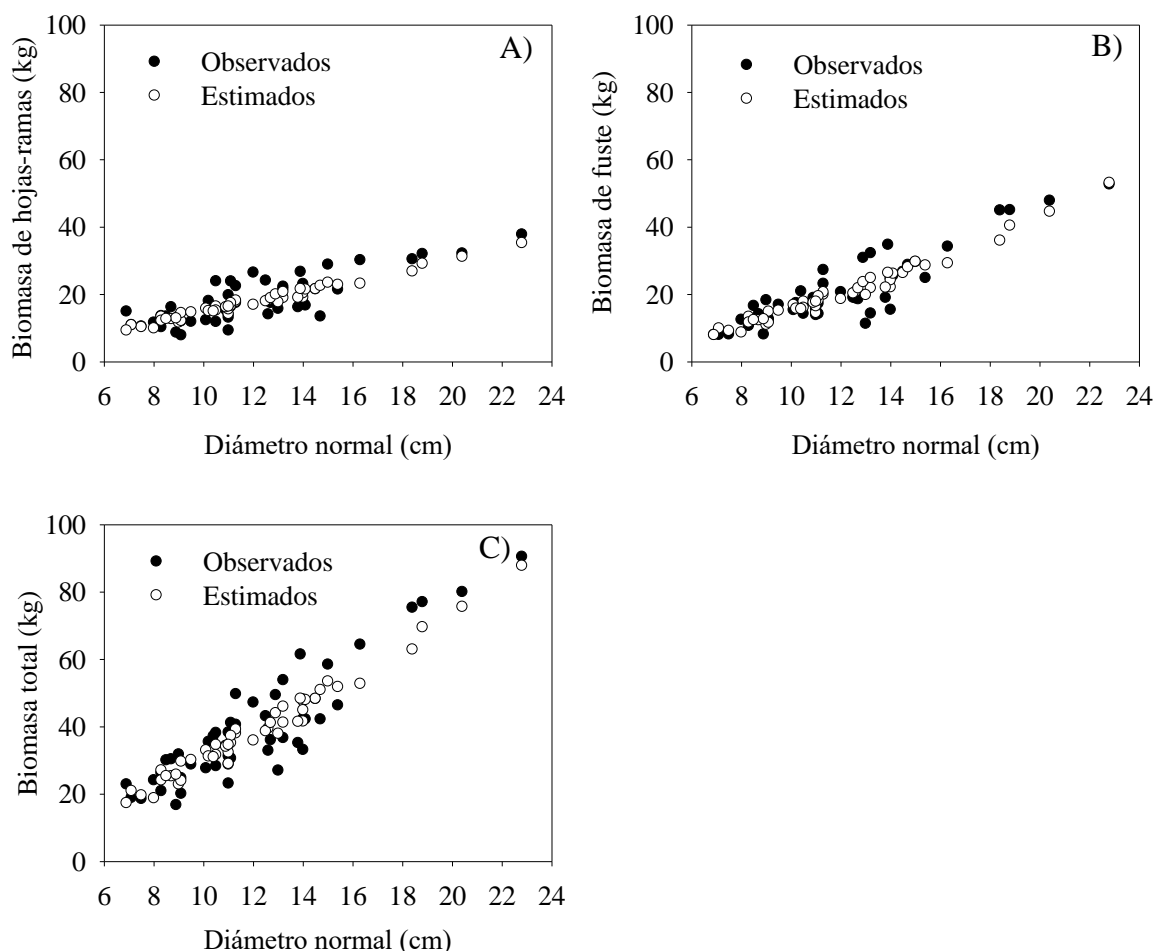


Figura 2. Biomasa observada y estimada de hojas-ramas, fuste y total en árboles provenientes de una plantación de *Pinus halepensis* (A - C).

De los seis modelos que se probaron (Cuadro 1), el modelo 2 fue el mejor y se representó para cada componente de biomasa hojas-ramas (Figura 2A), biomasa de fuste (Figura 2B) y biomasa total (Figura 2C). También se aprecia una mayor dispersión en los valores de biomasa de hojas-ramas (Figura 2A) debido a su coeficiente de variación de 21.81 % y una menor dispersión en biomasa total (Figura 2C) por su coeficiente de variación de 16.50 % (Cuadro 6).

4.6 Relación en biomasa de hojas-ramas con biomasa de fuste en *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*

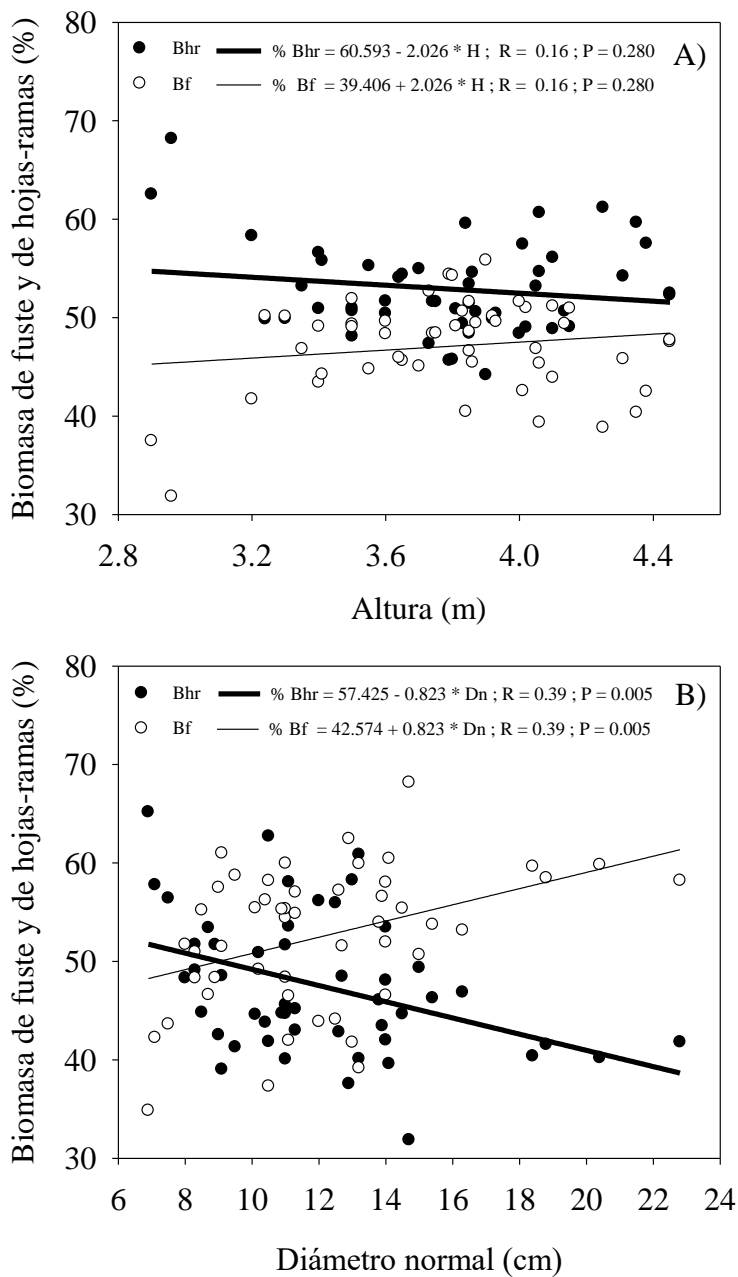


Figura 3. Relación en biomasa de hojas-ramas y biomasa de fuste con altura en *Pinus cembroides* (A) y con diámetro normal en *Pinus halepensis* (B).

En la especie de *Pinus cembroides* en este estudio, el porcentaje de biomasa hojas-ramas disminuye linealmente respecto a la altura, la tendencia no es estadísticamente significativa ($P = 0.280$) por lo contrario, el porcentaje en biomasa de fuste aumenta linealmente. Es decir, el porcentaje es mayor en biomasa de hojas-ramas al inicio de las alturas, pero al final de las alturas el porcentaje es menor en contraste con biomasa de fuste (Figura 3A). El componente biomasa de hojas-ramas y biomasa de fuste en *Pinus halepensis* tienen una mayor relación de 0.39 con respecto al primer modelo (Figura 3A), el componente biomasa de hojas-ramas es mayor al inicio conforme al diámetro normal, pero conforme aumenta el diámetro normal la biomasa en porcentaje disminuye en comparación con el componente biomasa de fuste (Figura 3B).

4.7 Error por categoría diamétrica de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*

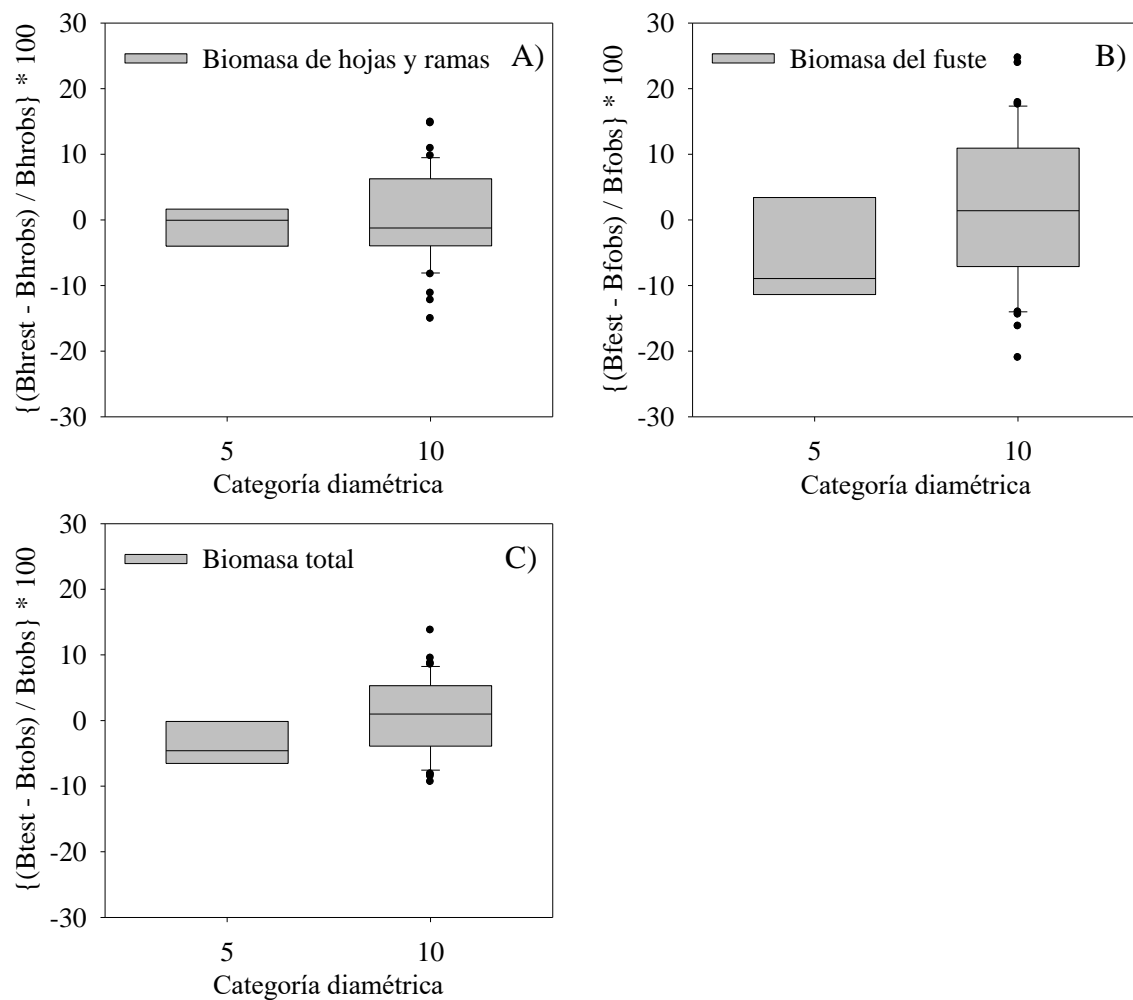


Figura 4. Error porcentual de estimación en biomasa por componente en cada categoría diamétrica de *Pinus cembroides* (A - C). En el eje de las Y: Bhr = biomasa de hojas-ramas; Bf = Biomasa del fuste; Bt = Biomasa total. Bhr y Bt = Biomasa estimada con el modelo 3; Bf = Biomasa estimada con el modelo 4.

En biomasa de hojas-ramas (Figura 4A) el modelo tiene mayor error en la categoría 10 con una mediana de -1.23 % respecto a la categoría cinco. Sin embargo los modelos de biomasa de fuste (Figura 4B) y biomasa total (Figura 4C) obtuvieron mayores errores en las categorías de cinco con medianas de -8.93 y -4.61 % en comparación con las categorías de 10. Por tanto los modelos (3 y 4) subestiman los valores estimados respecto a los observados.

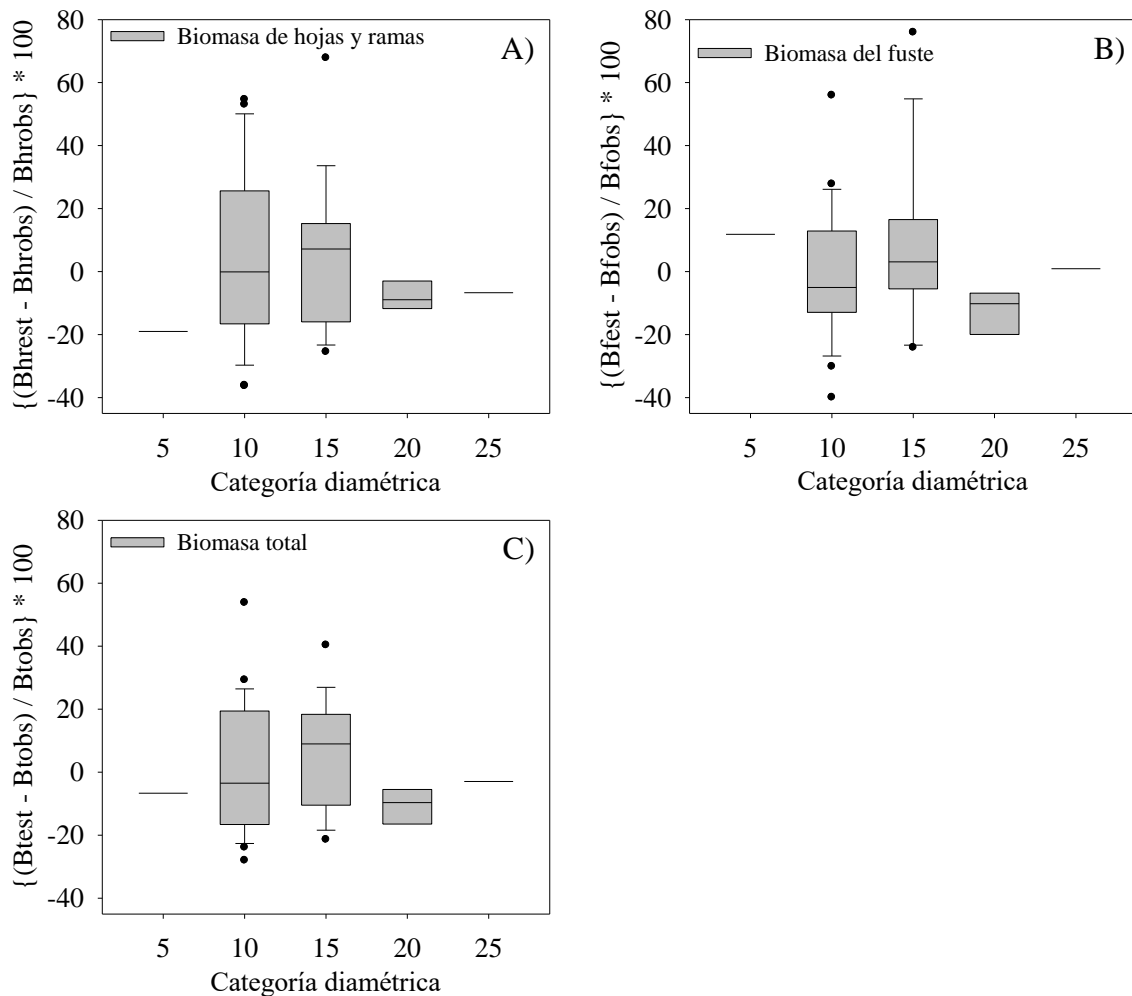


Figura 5. Error porcentual de estimación en biomasa por componente en cada categoría diamétrica de *Pinus halepensis* (A - C). En el eje de las Y: Bhr = biomasa de hojas-ramas; Bf = Biomasa del fuste; Bt = Biomasa total. Bhr, Bf y Bt = Biomasa estimada con el modelo 2.

En biomasa de hojas-ramas (Figura 5A) y biomasa total (Figura 5C) el modelo 2 subestiman los valores estimados en relación a los observados, presentando menores errores (del modelo 2) en las categorías de 10 con medianas de -0.08 y -3.49 % respecto a las categorías restantes. En cambio para biomasa de fuste (Figura 5B) el modelo (sobreestima) tiene un menor error en la categoría 15 con una mediana de 3.07 % en comparación con el resto (las categorías 5, 20 y 25 no son representativas en los datos de las) (Figuras A - C).

4.8 Cálculo de biomasa y carbono de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*

Cuadro 7. Cálculo de biomasa y carbono en un árbol individual de *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*.

Características dasométricas			Componente			
n	\overline{Dn}	\overline{H}	Elemento	Bhr	Bf	Bt
	(cm)	(m)	(kg/árbol)	(kg/árbol)	(kg/árbol)	(kg/árbol)
<i>Pinus cembroides</i>						
1	8.58	.	Biomasa	9.45	8.96	18.54
			Carbono	4.75	4.50	9.31
<i>Pinus halepensis</i>						
1	12.05	5.18	Biomasa	17.76	19.96	38.09
			Carbono	8.86	9.96	19.01

Donde: n = número de árboles; \overline{Dn} = Diámetro normal promedio; \overline{H} = Altura promedio; Bhr = Biomasa de hojas-ramas; Bf = Biomasa de fuste; Bt = Biomasa total. Bhr y Bt = Biomasa estimada con el modelo 3; Bf = Biomasa estimada con el modelo 4 en *Pinus cembroides*; Bhr, Bf y Bt = Biomasa estimada con el modelo 2 en *Pinus halepensis*.

Con el diámetro normal promedio y los modelos alométricos (2 y 3) se estimó la biomasa por componente y el carbono en kg/árbol para la especie de *Pinus cembroides*, sin embargo para estimar la biomasa por componente y el carbono en kg/árbol de *Pinus halepensis* fue con el modelo 2 donde las variables independientes fueron el diámetro normal y la altura en promedio (Cuadro 7).

5. CONCLUSIONES

El diámetro normal predice adecuadamente la biomasa en hojas-ramas, biomasa de fuste y biomasa total en *Pinus cembroides*. En cambio para estimar biomasa en cada uno de sus componentes de hojas-ramas, fuste y total de *Pinus halepensis* es necesario tener dos variables el diámetro normal y altura. Para ambas especies el mejor ajuste se encontró en el componente de biomasa total con una R^2 ajustada de 0.94 y 0.85 en *Pinus cembroides* y *Pinus halepensis*. Existe una relación en biomasa de hojas-ramas con biomasa de fuste en función de altura en *Pinus cembroides* y en diámetro normal en *Pinus halepensis*, donde los porcentajes de biomasa de hojas-ramas son mayores al inicio de los diámetros normales o alturas, pero conforme aumentan los diámetros normales o las alturas los porcentajes son menores en comparación con el componente biomasa de fuste.

6. LITERATURA CITADA

- Acosta, M. M., J. Vargas, H., A. Velázquez, M., y J. D. Etchevers, B. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736.
- Aguirre, C. O. A., y J. Jiménez, P. (2011). Evaluación de contenido en bosques del sur de Nuevo León. *Rev. Mex. Cien. For.* 32: 74-84.
- Álvarez, C. G. (2008). Modelos alométricos para la estimación aérea de dos especies nativas en plantaciones forestales del trópico de Cochabamba, Bolivia. Tesis de Maestría. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 89 p.
- Andrew, M. H., Noble, I. R., & Lange, R. T. (1979). A non-destructive method for estimating the weight of forage on shrubs. *The Rangeland Journal*. 1(3): 225-231.
- Andrew, M. H., Noble, I. R., Lange, R. T., & Johnson, A. W. (1981). The measurement of shrub forage weight: three methods compared. *The Rangeland Journal*. 3(1): 74-82.
- Avendaño, R. J. R. (2008). Modelos genéricos de biomasa aérea para especies forestales en función de la arquitectura y la ocupación del rodal. CATIE. Turrialba, Costa Rica. 114 p.
- Baskerville, G. L. (1972). Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. *Can. J. Forest Res.* 2: 49-53.
- Becerril, P. R., E. González S., y N. M. Ramos S. (2014). Contenido de carbono en un ecosistema semiárido del centro de México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*. 1 (1): 9-18.

- Brown S., A. J. R. Gillespie and A. E. Lugo. (1989). Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *Forest Science*. 35(4): 881-902.
- Brown, S., J. Sathaye, M. Cannell, and P. Kauppi. (1996). Mitigation of carbón emissions to the atmosphere management by forest. *Commonwealth Forestry Review*. 75: 80-91.
- Cabral, D. R., & West, N. E. (1986). Reference unit-based estimates of winterfat browse weights. *Journal of Range Management*. 39: 187-189.
- Carmona, M. M. E., I. Neri, F., G. Riquer, T. y F. Williams, L. (2014). Papel crucial de la gestión de riesgo en la adaptación al cambio climático. *Memorias del segundo congreso cambio climático del estado de Chihuahua*. 21 p.
- Castellano, J., M. Maass and J. Kummerow. (1991). Root biomass of a dry deciduous tropical forest in México. *Plant and Soil*. 131: 225–228.
- CONABIO (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) (2001). *Pinus cembroides*. 210 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2001). *Pinus cembroides* zucc. 7 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) (2001). *Pinus halepensis* Miller. 7 p.
- De La Vega, L. J. A. (2007). Calentamiento global, captura de carbono. *Agro-proyectos*, México. 3 p.
- Díaz, F. R., M. Acosta, M., F. Carrillo, A., E. Buendía, R., E. Flores, A., y J. D. Etchevers. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* schl. Et cham. *Madera y Bosques*. 13:25-34.
- Domingo, R. D., M. T. Lamelas, G., A. L. Montealegre, G., y J. de la Riva, F. (2016). Estimación de la pérdida de biomasa y de las emisiones de CO₂ generadas por la combustión de masas forestales de *Pinus halepensis* Mill. En el incendio de Luna

- (Aragón), mediante datos LiDAR-PNOA. XVII Congreso Nacional de Tecnología Información Geográfica, Málaga, España. 88 p.
- Fady, B., H. Semerci., y G. G. Vendramin. (2008). Guía técnica para conservación y utilización del *Pino halepensis* y el *Pinus brutia*. Foresta, Madrid, España. 6 p.
- García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Koppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.
- Gholinejad, B., H. Pourbabaei., A. Farajollahi., and E. Parvane. (2012). Assessment and Comparison of Different Methods for Estimating Forage Production (Case Study: Rangeland of Kurdistan Province). *J. of Range. Sci.* 2: 483-489.
- González, E. M., E. Jurado., S. González E., O. Aguirre, C., J. Jiménez, P., y J. Návar. (2003). Cambio climático mundial: origen y consecuencias. *Ciencia UANL.* 1: 377-386.
- González, M. S., H. Vela, P., y M. O. Álvarez, S. (2008). La fluorescencia de la clorofila como herramienta en la investigación de efectos tóxicos en el aparato fotosintético de plantas y algas. *Revista de Educación Bioquímica.* 27: 119-129.
- Herranz, S. J. M. (2000) Aspectos botánicos y ecológicos del pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.). *Cuadernos de la sociedad Española de Ciencias Forestales.* 10: 13-17.
- IPCC, 2013: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, 2014: Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de

- Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. (en árabe, chino, español, francés, inglés y ruso).
- Iturbide, A. I. (2014). Cuantificación de biomasa y carbono en *Pinus cembroides* Zucc. Mediante un modelo alométrico en los lirios Arteaga, Coahuila, México. Tesis de Licenciatura, UAAAN. Saltillo, Coahuila, México. 29 p.
- López, J. C., N. M. Riaño., y Y. López, F. (2001). Características fotosintéticas de cinco especies forestales. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. 8 p.
- López, O. L. A. (2012). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea en una plantación de *Pinus halepensis* Mill. En Saltillo, Coahuila. Tesis de Maestría. Saltillo, Coahuila. 34 p.
- Martínez, S. D., S. Gonzales, S., J. Francisco, J., y J. J. Luna, G. (2016). Ecuaciones para estimar biomasa aérea y subterránea en ares reforestadas de *Pinus cooperi* blanco en Durango, México. *Foresta Veracruzana*. 18 (1): 25-32.
- Méndez, G. J., S. L. Luckie, N., M. A. Capó, A. y J. A. Nájera, L. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl., y *Pinus pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45: 479-491.
- Montero G., R. Ruiz. P., y M. Muñoz. (2005). Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 264 p.

- Návar J., N. González., y J. Graciano. (2001). Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango, México. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. Valdivia, Chile. 12 p.
- Návar, J. (2011). Componentes de la biomasa en el matorral espinoso tamaulipeco y los bosques templados secos de pino del noreste de México. *Polibotánica*. 31:21-141.
- Pacheco, F. C., A. Andrete A., A. Gómez G., V. M. fierros G., M. Cetina A., y H. Vaquera H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus gregii* engelm. *Revista fitotecnia mexicana*. 30: 51-254.
- Pompa, G. M. y J. I. Yerena, G. (2014). Concentración de carbono en *Pinus cembroides* Zucc. Fuente potencial de mitigación del calentamiento global. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 17 (1): 133-143
- R Core Team (2013). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Revilla, G. E. (2011). Química de la madera de cuatro pinos mexicano de la subsección *Cembroides*. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, estado de México. 41 p.
- Reyes, R. G., y R. Foroughbakhch P. (1989). Comparación de métodos indirectos para evaluar el potencial forrajero en un matorral tamaulipeco. Facultad de ciencias forestales, UANL, Linares, Nuevo León. 557 p.
- Rodríguez, L. R., J. Jiménez, P., O. Aguirre, C., y E. Jurado, I. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, Nuevo León. *Rev. Mex. Cien. For.* 32: 39-56.

- Rodríguez, O. G., H. M. De los santos, P., V. A. Gonzales, H., A. Aldrete., A. Gómez, G., y A. M. fierros, G. (2012). Modelos de biomasa aérea y foliar en una plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*. 18 (1): 25-41.
- Rojo, T. J. M. y A. Guevara, S. (2002). El potencial de México para la producción de servicios ambientales: captura de carbono y desempeño hidráulico. *Gaceta ecológica*. 63: 40-59.
- Romero M. A., E. García M. & M.F. Passini (1996). *Pinus cembroides* s. l. y *Pinus johannis* del Altiplano Mexicano: una síntesis, *Acta Botánica Gallica*. 143: 681-693
- Ruano, B. I. (2011). Respuesta de la regeneración post-fuego de *Pinus halepensis* Mill. A los tratamientos selvícolas en el sureste de España. Universidad de Valladolid Campus de Palencia. 9 p.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales. 13 p.
- Schlegel, B., J. Gayoso., J. Guerra. (2000). Manual de procedimientos muestreos de biomasa forestal. Valdivia, Chile. 24 p.
- Segura, M., y H. J. Andrade. (2008). Como construir modelos alométricos de volumen, biomasa o carbono de especies leñosas perennes. *Agroforestería en las Américas*. 46: 89-96.
- Torres, V. J. E. (2013). Estimación de biomasa de ramas mediante un modelo alométrico, en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc., en Arteaga, Coahuila, UAAAN. Tesis. Saltillo, Coahuila, México. 22 p.
- Xiao, C.W. and Ceulemans, R. (2004). Allometric relationships for below and aboveground biomass of young Scots pines. *Forest Ecology and Management*. 203: 177-186.

Yerena Y. J. I., J. Jiménez P., O. A. Aguirre, C., E. J. Treviño, G. y E. Alanís R. (2012).

Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Rev. Mex. Cien. For.* 3(13). 49-56.

Zilio, I. M. (2008). Emisiones de carbono en américa latina, un aporte al estudio del cambio climático economía y sociedad. *Revista científica de américa latina, el caribe, España y Portugal.* 14: 133-161.