

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL



Estimación de Biomasa Aérea de *Pinus Cembroides Zucc.* Usando un Método Indirecto, en una Plantación en Arteaga, Coahuila

Por:

ALEJANDRO GARCÍA MARTÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Saltillo, Coahuila, México

Diciembre de 2014

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO FORESTAL

Estimación de Biomasa Aérea de *Pinus Cembroides Zucc.* Usando un Método Indirecto, en
una Plantación en Arteaga, Coahuila

Por:

ALEJANDRO GARCÍA MARTÍNEZ

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO FORESTAL

Aprobada

Dr. Jorge Méndez González

Asesor Principal

M.C. Héctor Darío González López

Coasesor

M.C. Hilda Cecilia Burciaga Dávila

Coasesor

Dr. Leobardo Bañuelos Herrera

Coordinador de la División de Agronomía

Coordinación
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México.

Diciembre, 2014

AGRADECIMIENTOS

Primeramente gracias a Dios por darme la gracia de la vida y darme la capacidad de enfrentar los retos que esta ofrece, aprendiendo que las cosas que en verdad valen la pena necesitan de esfuerzo para realizarse, y sobre todo que en los momentos más críticos está ahí para apoyarme y encontrar solución.

A mi Alma Mater, por darme la oportunidad de haberme formado como persona y como profesionalista, por los momentos que en ella pase, de alegrías, tristezas y muchas experiencias.

A mis asesores:

Dr. Jorge Méndez González: por el apoyo incondicional que siempre me brindó, por sus consejos, empeño y tiempo dedicado a este trabajo.

M.C. Hilda Cecilia Burciaga Dávila: por el empeño, apoyo y dedicación brindado en el presente trabajo.

M.C. Héctor Darío González López: por el apoyo brindado en el presente trabajo.

A mis compañeros de generación: A lo largo de mi camino universitario me demostraron que su apoyo hacia mí era sincero y sin buscar nada a cambio, lo cual estoy muy agradecido porque siempre hay malos momentos, ahí es donde se necesitan compañeros de buena fe, y yo le doy gracias a Dios por haberme dado a esos compañeros, porque sin su apoyo y su comprensión nada de esto hubiera sido posible, ahora terminamos todos una etapa más de la vida, pero iniciamos la siguiente con una sonrisa y muchas expectativas de que nos traiga mucha felicidad y espero que todos logremos nuestros objetivos profesionales, así como logramos los objetivos universitarios, logrando así graduarnos, por los momentos inolvidables que compartimos: José Gustavo Nájera, Julio César Gómez, Giovanni Aparicio, Leonel Domínguez, Gabriel E. Cervantes, Juan Pérez, Rodrigo

Montoya, Fernando Arroyo, Juan Hernández, Santos Cruz, Roberto Ramírez e Iván Roblero.

A personas que me apoyaron, Sophia Kiming, Iris, Iris del Carmen, Adriana, Carla Paola, Diana, Andrea, Dalila, Esmeralda, Liliana, Isaura, Mónica, Nayeli, Ana, y especialmente a Eva Reyna Esmeralda.

DEDICATORIA

A mis padres Alfonso García Martínez y María Cruz Martínez Fernández, por haberme apoyado durante toda mi carrera, porque cuando tropecé estuvieron ahí para levantarme y alentarme a seguir hasta ver terminado uno de mis propósitos. Por darme el privilegio y el gran apoyo de salir a estudiar a otro estado, brindarme siempre su confianza y su comprensión que en cualquier momento todos los estudiantes lo necesitamos, por todo el cariño que me siguen dando y por haberme forjado como la persona que soy. Gracias padres, **Los Amo.**

A mis abuelos: Israel García Velasco y Elena Martínez Urbina por el apoyo que me brindaron durante toda la vida además de la enseñanza que me brindaron para ser un hombre de bien. Juan Martínez Nucamendi y $\frac{1}{11}$ Romelia Fernández Alvarado por el cariño y comprensión con el cual me trataron a lo largo de la vida

Por todo el cariño, aprecio que me tienen, por todo el apoyo que me dieron tanto moral como económico y por los valiosos consejos que con tanta sabiduría me compartían, los quiero muchísimo

A mis Hermanos: Isel García Martínez y Laura García Martínez, por brindarme siempre su apoyo incondicionalmente. Por estar siempre ahí cuando más los necesité, por las palabras de aliento en los momentos difíciles. Gracias por ser mis hermanos. Los quiero mucho.

A mis tíos: Por ser parte de mi desarrollo como persona, por la paciencia que tuvieron, por los consejos que hicieron encausarme por el buen camino lo cual agradezco mucho y no encuentro como recompensarlos, especialmente a **Uberto, Israel, Alberto**, que siempre han sido para mí más que tíos y siempre me han apoyado incondicionalmente durante toda mi vida.

El presente trabajo fue financiado por la dirección de investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, mediante el proyecto denominado “Métodos directos e indirectos para cuantificar biomasa aérea en *P. cembroides* en la Sierra de Arteaga Coahuila México” Clave No. 30 38111 425103001 **2260.**

RESUMEN

La realidad sobre los recursos forestales hoy en día es que estos cada vez son más escasos debido a la extracción desmedida, es por esto que debemos de buscar alternativas de cuantificación de carbono en la cual el árbol no sufra daño alguno, una herramienta alternativa es la cuantificación de carbono por métodos indirectos. La investigación se hizo con el objetivo de: 1) cuantificar biomasa y captura de carbono en una plantación de *Pinus cembroides Zucc*, usando un método indirecto, 2) evaluar el incremento en biomasa en *Pinus cembroides Zucc*. Para la realización del estudio se usó el método de Adelaide, fueron muestreados 191 árboles al azar y se usó el muestreo estratificado en cada árbol. Se ajustaron diferentes modelos de regresión para estimar biomasa. El modelo $\ln(B) = a + b_1 \ln(D) + b_2 \ln(H) + \varepsilon$ fue el mejor para estimar biomasa de hojas y ramas de *Pinus cembroides Zucc* usando diámetro basal y altura total, el cual se obtuvo una $R^2 = 0.6689$ en hojas-ramas, biomasa total con una $R^2 = 0.8028$, volumen con una $R^2 = 0.8085$ y el modelo 2) $\ln(B) = a + b \ln(D^2H) + \varepsilon$ fue el que solo se ajustó en fuste con una $R^2 = 0.8215$. Se concluye que el método de Adelaide es eficiente para estimar biomasa aérea en *Pinus cembroides Zucc* con estas dimensiones indicados en el estudio. El método de Adelaide es eficiente para estimar biomasa, se tiene la ventaja de usar mayor número de árboles para generar modelos de biomasa. Los modelos de biomasa estiman adecuadamente la biomasa de *Pinus cembroides Zucc*.

Palabras clave: biomasa, carbono, *Pinus cembroides*, volumen, Adelaide.

INDICE

INDICE DE CUADROS	vii
INDICE DE FIGURAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos	3
3. REVISIÓN DE LITERATURA	4
3.1 Trabajos afines	4
4. MATERIALES Y MÉTODOS	8
4.1 Área de estudio	8
4.2 Características generales de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	8
4.3 Trabajo de campo para muestreo de biomasa (verde) en <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	9
4.4 Tamaño de muestra	10
4.5 Trabajo de laboratorio.....	11
4.6 Obtención de biomasa seca de <i>Pinus cembroides</i> Zucc	11
4.6.1 Obtención de peso seco de hojas y ramas.....	11
4.6.2 Obtención de peso seco de fuste	11
4.6.3 Obtención de peso seco total del árbol.....	11
4.7 Validación de método Adelaide	12
4.8 Ajuste de modelos alométricos para cuantificar biomasa	12
4.9 Obtención de carbono e incremento anual en biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc.....	13
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
5.1 Características dasométricas de los arboles muestreados de <i>Pinus cembroides</i> Zucc	14
5.2 Estadísticas descriptivas de biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc	15
5.3 Modelos para estimar biomasa en <i>Pinus cembroides</i> Zucc	16
5.3.1 Modelos con diámetro basal	16
5.3.2 Modelos con diámetro de copa	23
5.4 Comparación del método directo e indirecto para estimar biomasa	25
5.4.1 Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk	25
5.4.2 Pruebas de t de student.....	26
5.5 Incremento medio anual en biomasa de <i>Pinus cembroides</i> Zucc	30
6. CONCLUSIONES	34

7. BIBLIOGRAFÍA	35
8. ANEXOS	39

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Modelos utilizados para la cuantificación de biomasa aérea en <i>Pinus cembroides</i>	12
Cuadro 2. Estadísticos básicos de algunas características de los árboles evaluados de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila.	14
Cuadro 3. Estadísticas básicas de biomasa y volumen de los árboles evaluados de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila.	15
Cuadro 4. Estadísticas de modelos alométricos seleccionados, para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste en función de diámetro basal, en árboles de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc ubicada en Arteaga Coahuila.	17
Cuadro 5. Coeficientes de regresión de modelos alométricos seleccionados para estimar biomasa aérea y volumen de fuste en función de diámetro basal, en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila.....	18
Cuadro 6. Estadísticos de regresión (en unidades indicadas por la variable “y” del Cuadro 1) de los modelos ajustados para estimar biomasa aérea y volumen usando diámetro a la base de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila.	19
Cuadro 7. Estadísticas de modelos alométricos seleccionados para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste en función de diámetro de copa, en árboles de una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc ubicada en Arteaga Coahuila.	23
Cuadro 8. Estadísticos de regresión de los modelos seccionados para estimar biomasa aérea y volumen usando diámetro de copa en una plantación de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila.	24
Cuadro 9. Prueba de normalidad para los datos de biomasa aérea obtenida con el método directo e indirecto.	25
Cuadro 10. Pruebas de t de student de dos colas, para muestras relacionadas, para establecer diferencias estadísticas en la estimación de biomasa aérea de <i>Pinus cembroides</i> Zucc con el método directo e indirecto.	27
Cuadro 11. Incrementos medios anuales en diferentes parámetros de biomasa y volumen en Arteaga Coahuila.....	30
Cuadro 12. Estadísticos básicos de las variables en incrementos medios anuales de <i>Pinus cembroides</i> Zucc en Arteaga Coahuila, México.....	32

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribucion de <i>Pinus cembroides Zucc</i> en México y estados Unidos de America.	9
Figura 2. Estratificación de un árbol de <i>Pinus cembroides Zucc</i> a diferentes secciones para cuantificar biomasa aérea.	10
Figura 3. Biomasa estimada de hojas y ramas (A), fuste (B), total (C) y volumen (D) y observada según el modelo seleccionado, en componentes de árboles individuales usando diámetro a la base de una plantación de <i>Pinus cembroides Zucc</i> en Arteaga Coahuila.	22
Figura 4. Comparación de la estimación de biomasa de hojas ramas(A), biomas de fuste (B) y biomasa total (C) aérea de <i>Pinus cembroides Zucc</i> usando el método directo e indirecto.....	28
Figura 5. Relación entre biomasa estimada con método directo e indirecto en arboles individuales de <i>Pinus cembroides Zucc</i>	29

1. INTRODUCCIÓN

Los programas de captura de carbono en bosques son instrumentos con enorme potencial para contribuir a la transición hacia el desarrollo sustentable. El interés en ellos surge de la información cada vez más alarmante y mejor documentada, sobre el proceso de calentamiento global, debido fundamentalmente a la emisión de gases causantes del llamado efecto invernadero por actividades humanas. La evidencia sobre este fenómeno es basta y contundente y aunque el efecto invernadero es un fenómeno natural, el incremento de los gases que lo producen como resultado de las actividades humanas, se traduce en un aumento de la temperatura y los problemas asociados a éste (IPCC, 2001).

La Environmental Protection Agency (EPA, 2003), menciona que es importante considerar que la respiración vegetal y la descomposición de materia orgánica del mundo libera más de 10 veces el CO₂ del que inducen las actividades humanas, pero estas emisiones han estado durante siglos en balance con el dióxido de carbono absorbido por la vegetación terrestre y por los océanos.

Para proponer estrategias viables dirigidas a la mitigación del cambio climático es imprescindible, por un lado, conocer la dinámica del carbono en los ecosistemas forestales y, por otra, las modificaciones a los flujos de carbono derivadas de los patrones de cambio de uso de suelo. Un primer paso indispensable para lograr este objetivo, es contar con la información básica sobre los contenidos de carbono en los diferentes almacenes del ecosistema (Ordóñez, 1998).

Existen métodos directos e indirectos para estimar la biomasa de un bosque los cuales se distinguen uno por ser destructivo, por lo contrario el otro es de manera indirecta o no destructiva. El método directo consiste en cortar el árbol y pesar la biomasa directamente, determinando su peso seco. Una forma de 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 terreno y en inventarios forestales (Brown, 1997), agrega el mismo autor que también se puede estimar la biomasa 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 (biomasa total del árbol).

Una de forma estimar biomasa mediante el método indirecto es a través del método de Adelaide, este método consiste en la cubicación del árbol mediante la selección de una rama de la especie, esta rama se llama unidad de referencia (Andrew *et al.*, 1979), la cual deberá de ser representativa de las principales características, tamaño, densidad foliar de las demás ramas y deberá ser tomada a la altura media de la copa (Foroughbakhch *et al.*, 2009), se infiere el peso verde total del árbol, multiplicando la unidad de referencia por el número de veces que ésta representa el árbol completo.

Debido a esta problemática se pretende la siguiente investigación cuya inquietud es estimar biomasa y almacenes de carbono de forma más práctica y en un menor tiempo y tratando de que la vegetación se vea lo menos afectada, particularmente se pretende conocer cuánto carbono aporta una plantación de *Pinus cembroides* Zucc y evaluar si el método da resultados confiables para ser utilizado en otras especies.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Probar el método de Adelaide para estimar biomasa aérea en árboles individuales de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc, en Arteaga Coahuila, México.

2.2 Objetivos específicos

- 1) Evaluar la eficiencia del método de Adelaide con un método directo para estimar biomasa en *Pinus cembroides* Zucc.
- 2) Generar modelos para estimar biomasa aérea de árboles individuales de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc, en Arteaga Coahuila, México.
- 3) Generar modelos para evaluar el incremento en biomasa en árboles individuales de *Pinus cembroides* Zucc.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

3.1 Trabajos afines

Foroughbakhch et al. (2005,) determinaron el contenido de carbono de manera indirecta en especies típicas del Matorral Espinoso Tamaulipeco con el fin de determinar el método más apropiado en la evaluación de biomasa foliar de 10 especies leñosas en un matorral típico del Noreste de México y encontraron que a pesar de que no existe un método estándar para estimar la biomasa foliar en pie para todas las especies leñosas, dada la diversidad de formas, el método Adelaide fue el más preciso, práctico y sencillo y puede considerarse como uno de los métodos opcionales en la cuantificación de biomasa foliar para la mayoría de las especies arbustivas.

Schlegel (2001), realizó un estudio en los bosques del hemisferio norte contempla y la cuantificación de la biomasa y el carbono fijado en bosques, se realizaron mediciones directas de biomasa en 269 individuos de 12 especies. Con la información obtenida, se desarrollaron ecuaciones alométricas. Con ellas se estimó en forma indirecta la biomasa, utilizando para información de inventarios forestales. En conclusión la cantidad de carbono almacenado en los sitios estudiados es muy variable y depende del tipo y estado de desarrollo del bosque con una acumulación que fue de 662,06 TonC/ha.

Becerril (2007), desarrolló una ecuación alométrica a partir de los datos que se tenían de los muestreos destructivos, los muestreos de vegetación tipo Gentry y la información bibliográfica, con esta ecuación se puede determinar la biomasa del sitio de estudio sin tener que realizar muestreos destructivos, ya que solo es necesario determinar el diámetro a la altura del pecho (1.30 m). Esta ecuación es solo útil en el caso de árboles ya que para arbusto y herbáceas es necesario determinar el radio de la copa, los datos que deben de medirse en campo son los diámetros.

Díaz et al. (2007) determinaron biomasa y carbono en *Pinus patula* en el estrato aéreo para ajustar el modelo $Y=b*X^k$, tomando como variable independiente (X) el diámetro normal. Se obtuvieron muestras de cada uno de los siguientes componentes (fuste, ramas y follaje) de cada árbol, y en el campo se determinó el peso fresco, tanto de la muestra como del componente. Las muestras se llevaron al laboratorio para ser secadas y obtener su peso seco, para después estimar la biomasa total de cada árbol, usando para ello la relación peso seco: peso fresco de las muestras. Para determinar el carbono de los diferentes componentes se tomaron muestras de cinco árboles en total se obtuvieron 204 muestras del fuste (rodajas), 70 de ramas y 74 de follaje y fueron analizadas en el laboratorio. El diámetro normal de los árboles muestreados varió en un rango de 6.7 a 64.1 cm, y su biomasa de 7.62 a 2741.76 kg. Obteniendo así 52.21% de carbono en el follaje, 49.47% en las ramas y 49.26% en el fuste, de esta forma la concentración promedio por árbol fue de 50.31%. Para estimar la biomasa se generó la ecuación $B = 0.0357 * DN^{2.6916}$ y para estimar el carbono la ecuación fue $CC = 0.021 * DN^{2.6451}$, con los coeficientes de determinación para ambas de 0.98.

Vidal et al. (2003) talaron un total de 169 árboles a cada uno de ellos se le midió el diámetro a 1.3 metros sobre el nivel del suelo y la altura total, posteriormente fueron desramados y desfoliados (incluyendo las ramas del fuste), realizándose en cada caso el pesaje por separado de la biomasa verde, tanto del follaje (PF) como de las ramas (PR). Para obtener el peso seco de la biomasa de copa foliar y de ramas se emplearon los valores constantes 0.64 y 0.70 respectivamente, obtenidos para cada caso a partir de la relación existente entre el peso verde y el peso seco (PV/PS) determinada empleando la metodología del CATIE (1997) plantea que un modelo es satisfactorio si el valor de este coeficiente es razonablemente alto alrededor de 0.8.

Según Alder (1980) las mejores funciones pueden tener coeficientes de solamente 0.7 y 0.8. En el caso de la variable Peso Verde del Follaje, los errores estándar de estimación para todos los modelos oscilaron en una base más o menos común, o sea, entre 30.55%, el cual presenta también el coeficiente de determinación más bajo (70.22%), y 33.53 % para el modelo (3), con un coeficiente de determinación de 75.47%. ajustó a los datos trabajados es el modelo (7), el cual además de poseer un coeficiente de determinación un poco superior (82.01%), posee también un error estándar de la estimación comparable al del modelo (5) (31.13%) y una mejor distribución de los residuos. Los modelos (1) y (7) fueron los que presentaron una cierta superioridad cuando comparados con los demás modelos. Los números de los modelos citados aquí, corresponden a la numeración indicada en el estudio de Alder (1980).

La realización del estudio de Merino et al. (2001) se llevó a cabo a partir de los datos 10 plantaciones de *Pinus radiata* de entre 16 y 29 años. En cada una las parcelas se seleccionaron un número de árboles comprendido entre 3 y 6, representativos de la calidad media y con diámetro en torno al medio cuadrático. El número total de árboles seleccionados y apeados fue de 55. Para la determinación de la biomasa, cada árbol se dividió en corteza, madera (hasta un diámetro de 7 cm), ramas gruesas (2-7 cm), ramas finas (2-0.5 cm), ramillos (< 0.5 cm), acículas y piñas. Se observa que la acumulación de biomasa muestra la siguiente secuencia: madera (73 %), corteza (8 %), ramas (10 %), acículas (4 %), piñas (3 %), ramillos (2 %).

Pacheco et al. (2007) estudiaron en la plantación de *Pinus greggii*, se seleccionaron 20 árboles en forma aleatoria. A cada árbol se midió el diámetro a la base del tallo, el diámetro a 1.30 m y la altura total. Los componentes de follaje se secaron a 70 °C y los de ramas y fuste (madera) a 80 °C, hasta alcanzar peso constante. Se seleccionaron tres muestras compuestas de los 20 árboles muestreados para medir el porcentaje de carbono.

El promedio de biomasa aérea por árbol fue de 8.0 kg distribuidos como sigue: 4.1 kg en fuste, 2.0 kg en follaje y 1.9 kg en ramas biomasa aérea total en el área de la plantación fue de 1.4 t lo que es 35.2 t ha⁻¹. El modelo muestra una alta correlación ($R^2 = 0.89$). El contenido de carbono promedio en fuste, ramas y follaje fue de 51 %. La acumulación de carbono en la plantación resultó ser de 17.9 t ha⁻¹ a los seis años de edad.

Bocanegra (2013) Aplicó el método de Adelaide y contando con la muestra de referencia unitaria para cada especie vegetal del matorral espinoso tamaulipeco estas fueron secadas en una estufa de aire forzado a una temperatura de 65 °C durante 24 horas y para las especies con un mayor contenido de humedad hasta 72 horas. En el área de estudio se encontró que la producción total de biomasa aprovechable del matorral en condiciones prístinas en los tres estratos de muestreo fue de 0.578 Ton/ha, siendo el estrato alto con la mayor producción brindando 0.321 Ton /ha del total, seguido por el estrato medio y bajo consecutivamente con valores respectivos de 0.141 y 0.116 Ton/ha.

Mendoza-Ponce y Galicia (2010) estudiando la biomasa en siete bosques con diferente composición de especies demuestran que la biomasa total en los bosques varió desde 91.07 hasta 383.78 Mg ha⁻¹, en pastizales de 9.83 a 2493 Mg ha⁻¹ y en la sucesión (matorrales) 6.33 a 7.69 Mg ha⁻¹. Esto sugiere que la deforestación y cambios en el uso del suelo podrían reducir la biomasa aérea en un 90 %. Los bosques maduros tuvieron la mayor biomasa aérea y subterránea y la menor densidad (número de árboles por hectárea), pero un menor potencial para la acumulación de C en el futuro; en contraste, los bosques jóvenes y áreas reforestadas tuvieron crecimiento y el almacenamiento de carbono mayor potencial.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Área de estudio

Este trabajo fue realizado en el predio las Palmas ubicado entre las coordenadas 25.355258° latitud norte y -100.701694° longitud oeste en el municipio de Arteaga, Coahuila. El Area se ubica a una altitud de 2100 metros sobre el nivel del mar. EL clima es templado (Cb(X)(Wo)(e)g), temperatura media de 13.3 °C y precipitación anual de 521 mm (García, 1987). A 8 años de haberse establecido la plantación, se decidió hacer la investigación para cuantificar la biomasa y carbono almacenado por la plantación.

4.2 Características generales de *Pinus cembroides* Zucc

Esta especie se encuentra mayormente distribuida al sur de los estados unidos y al norte de México. Árbol de 5 a 10 m, y hasta 15 m de altura, con un diámetro normal de 30 cm y hasta 70 cm. Es de tronco corto y ramas ascendentes, delgadas y distribuidas irregularmente en el tallo. Es una especie monoica de lento crecimiento. Los árboles tardan varios años en fructificar por primera vez. En términos generales, el tiempo transcurrido entre la polinización, la maduración del cono y las semillas es de unos 30 a 36 meses. Es una de las especies de pino de mayor distribución en México, forma masas puras en la Sierra Madre Oriental al norte del Trópico de Cáncer. Las mayores poblaciones están en: Chihuahua, Durango, Coahuila, Nuevo León, Hidalgo y Zacatecas. Soporta temperaturas de -7 a 42. Una precipitación media de 365 a 800mm Bailey (2001).

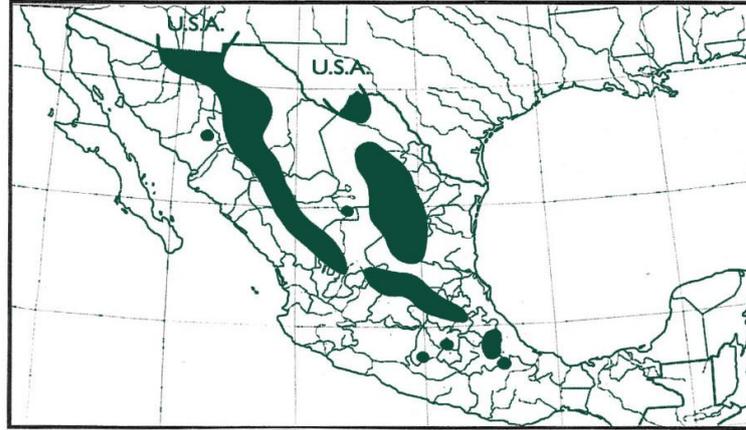


Figura 1. Distribucion de *Pinus cembroides* Zucc en México y estados Unidos de America.

4.3 Trabajo de campo para muestreo de biomasa (verde) en *Pinus cembroides* Zucc

El método utilizado para la estimación de biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc fue un método no destructivo (método de Adelaide). En este estudio se utilizó un muestreo estratificado; es decir, cada árbol seleccionado fue dividido en tres secciones (Figura 2).

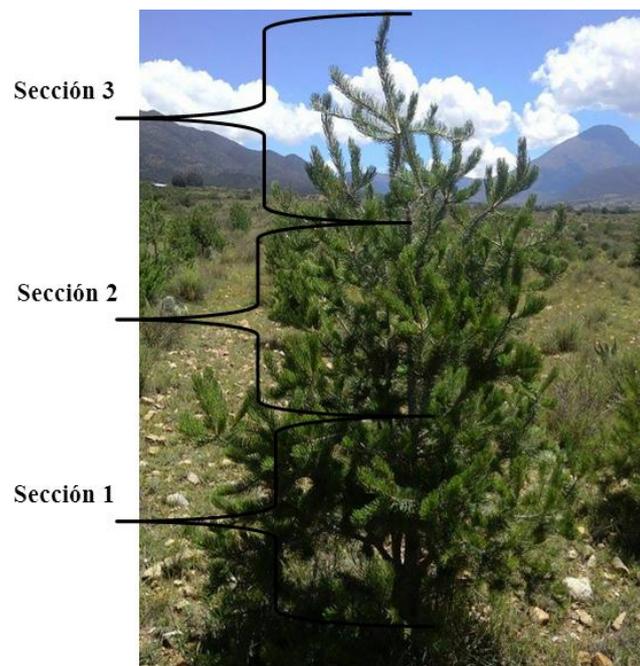


Figura 2. Estratificación de un árbol de *Pinus cembroides* Zucc a diferentes secciones para cuantificar biomasa aérea.

Se seleccionó un árbol promedio en función de su diámetro basal y altura, al cual una vez estratificado (Figura 2), se seleccionó y corto por única vez una rama representativa de cada estrato, a las cuales se le midió diámetro basal, longitud de la rama y número de verticilos. La rama obtenida fue denominada muestra representativa, que fue utilizada como referencia según el método de Adelaide. Cada una de las ramas, inmediatamente a su obtención fue pesada en fresco (verde) usando una báscula torrey sx 30.

Después de esto, se seleccionó el árbol a muestrear, se estratifico y se empleó el método de Adelaide en cada estrato del árbol, usando la rama respectiva de cada estrato cuantificando la cantidad de veces que la muestra representativa cavia en el árbol para tener una muestra referente a la biomasa del árbol.

4.4 Tamaño de muestra

En este estudio se muestrearon un total de 191 árboles, a los cuales a cada uno de ellos se les midió el diámetro del fuste a diferentes alturas las cuales las determinaba la altura total de el árbol ya que esta se dividía en tres partes para tomar los diámetros también se midió el diámetro de copa de las diferentes secciones y una rama representativa de cada sección lo cual sumaban tres ramas por árbol, a cada una de estas ramas se les determino la longitud, diámetro a la base, diámetro de copa, también fueron tomadas unas ramas de muestra de cada sección de el árbol promedio de cada sitio con la finalidad de obtener el peso seco.

4.5 Trabajo de laboratorio

En laboratorio, cada rama de referencia (muestra) fue introducida a un horno blue pom-246f sometida a una temperatura de 70° C por 7 días para obtener su peso seco, el cual se obtuvo usando una báscula Torrey sx 30.

4.6 Obtención de biomasa seca de *Pinus cembroides* Zucc

4.6.1 Obtención de peso seco de hojas y ramas

Una vez obtenido el peso seco de cada rama de referencia, este valor se multiplicó por el número total de ramas contenidas en el estrato correspondiente (método de Adelaide). Sumando el peso de ramas de cada estrato se obtuvo el peso seco de hojas y ramas de cada árbol.

4.6.2 Obtención de peso seco de fuste

Con los datos de diámetro menor (dm), diámetro mayor (DM) y longitud del fuste (Lf) de cada estrato, se obtuvo el volumen del fuste de la siguiente forma: $V = (0.7854)((dm+DM/2))^2(Lf)$. Enseguida, para obtener el peso seco del fuste, el volumen fue multiplicado por la densidad básica (0.58 g/cm³) proporcionado por Vaca (1992). Después la sumatoria de peso seco del fuste de cada estrato constituyó el peso seco total del fuste de cada árbol.

4.6.3 Obtención de peso seco total del árbol

El peso seco total del árbol se obtuvo sumando el peso seco de hojas y ramas (obtenido con el método de Adelaide) y el peso seco del fuste.

4.7 Validación de método Adelaide

En general existen dos métodos diferentes de cálculo de estimación de biomasa: el primero basado en ecuaciones matemáticas y el segundo en factores de expansión (Ketterings, 2001; Dauber, 2002). Esta investigación se basa en el de ecuaciones matemáticas usando el método de Adelaide se validó haciendo una comparación con el método directo. Para tal efecto, se utilizaron 20 árboles en un plantación de *Pinus cembroides* Zucc estudiada por Iturbide (2014). Los datos de los diferentes componentes de biomasa: hojas ramas, fuste y total de la plantación fueron sometidos a pruebas de normalidad. Después los datos fueron sujetos a pruebas de t de student, para probar la hipótesis nula de igualdad de medias.

4.8 Ajuste de modelos alométricos para cuantificar biomasa

La estimación de biomasa por componente (ramas y hojas, fuste y total) se realizó mediante modelos de regresión de forma lineal y no lineal acorde a la siguiente Tabla.

Cuadro 1. Modelos utilizados para la cuantificación de biomasa aérea en *Pinus cembroides*.

Nº	Modelo	Varianza
1	$\ln(B) = a + b \ln(D) + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
2	$\ln(B) = a + b \ln(D^2H) + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
3	$\ln(B) = a + b \ln(D) + c[\ln(D)]^2 + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
4	$\ln(B) = a + b \ln(D) + c[\ln(D)]^2 + d[\ln(D)]^3 + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
5	$\ln(B) = a + b \ln(D) + c [\ln(D)]^2 + d [\ln(D)]^3 + e[\ln(D)]^4 + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
6	$\ln(B) = a + b \ln(D) + c \ln(H) + \varepsilon$	$\text{var}(\varepsilon) = \pi^2$
7	$B = a + bD^2H + \varepsilon$ regresión lineal ponderada	$\text{var}(\varepsilon) \propto D^{2c}$

8	$B = a + bD + cD^2 + \varepsilon$ regresión lineal ponderada	$var(\varepsilon) \propto D^{2c}$
---	--	-----------------------------------

Donde: ln = logaritmo natural; a = beta uno; b = beta dos; c = beta tres; d = beta cuatro; e = beta cinco; D = diámetro normal y basal (cm); H = altura (cm).

Los modelos se ajustaron usando el programa R (R development core team 2005), resolviendo con cuadrados mínimos (Brown *et al.*, 1989; Acosta *et al.*, 2002). La transformación logarítmica corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente con respecto a los datos en la variable dependiente (Sprugel, 1983), es por eso que en este estudio se usaron modelos logarítmicos. Cuando las unidades originales son re-transformadas en los modelos logarítmicos los valores más grandes se homogenizan con los demás valores, volviéndose a una escala más pequeña (Brown *et al.*, 1989).

4.9 Obtención de carbono e incremento anual en biomasa de *Pinus cembroides* Zucc

El carbono de *Pinus cembroides* Zucc se obtuvo multiplicando la biomasa de las diferentes partes del árbol; hojas, ramas y fuste, por la constante 0.5025 determinado por Yerena *et al.* (2012) este valor corresponde al 50.25 % del biomasa seca total de cada árbol.

El incremento medio anual (IMA) en biomasa se obtiene dividiendo los diferentes incrementos la edad del árbol. La edad de cada árbol fue obtenida cuantificando el número de verticilos de cada árbol. Fueron ajustados modelos de regresión para estimar el incremento medio anual en función a la variable de diámetro basal para de esta manera obtener cual modelo tenía más confiabilidad para la estimación de los datos.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Características dasométricas de los árboles muestreados de *Pinus cembroides* Zucc

Según los árboles muestreados se tiene un mínimo en diámetro a la base de 1.40 cm y un máximo de 7.50 cm, en altura se obtuvieron un mínimo de 93 cm y máximo fue de 240 cm. En cuanto al diámetro de copa se tiene 36 cm. Como mínimo y máximo de 220 cm. De verticilos se tiene un promedio por árbol fue de 6.97. Castellanos (1993) determinó la biomasa de *Pinus patula*, para la región de Chignahuapan- Zacatlán, Puebla, tomando una muestra de 27 árboles, cuyos diámetros estuvieron en un rango de 5 a 45 cm. En este estudio se utilizaron 191 árboles, el tamaño de muestra es superior en número a estudios de biomasa similares.

Cuadro 2. Estadísticos básicos de algunas características de los árboles evaluados de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

	D (cm)	H (cm)	DC (cm)	Vert
Media	4.71	158.12	104.03	6.97
Desviación estándar	1.05	32.08	24.03	1.47
Mínimo	1.40	93.00	36.00	3.00
Máximo	7.50	240.00	220.00	12.00

Donde: D(cm) = diámetro a la base en centímetros; H (cm) = altura en centímetros; DC (cm) = diámetro de copa en centímetros; Vert = número de verticilos.

5.2 Estadísticas descriptivas de biomasa de *Pinus cembroides* Zucc

Los resultados arrojados en este estudio indican que la biomasa de hojas y ramas fue en promedio 1145.22 gr, en cuanto a la biomasa promedio de fuste fue de 599.89 gr, finalmente la biomasa total por árbol varió de un mínimo de 255.93 gr así como un máximo de 4178.55 gr. En promedio un árbol tiene un volumen de 1034.29 cm^3 en el fuste.

Cuadro 3. Estadísticas básicas de biomasa y volumen de los árboles evaluados de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

	Bhr	Bf	Bt	Vol	Bhr %	Bf %
Media	1145.22	599.89	1745.10	1034.29	65.23	34.77
Desviación estándar	609.59	329.41	874.13	567.94	9.28	9.28
Mínimo	161.98	92.22	255.93	158.99	32.80	12.86
Máximo	2968.01	1899.84	4178.55	3275.59	87.14	67.20

Donde: Bhr (gr) = biomasa de hojas y ramas en gramos; Bf (gr) = biomasa de fuste en gramos; Bt (gr) = biomasa total en gramos; Vol (cm^3) = volumen de fuste en centímetros cúbicos; Bhr (%) =biomasa de hojas ramas en porcentaje; Bf (%) = biomasa de fuste en porcentaje.

La biomasa de hojas y ramas representa un total de 65.23 %, mientras que el fuste constituye el 34.77 % de la biomasa total (Cuadro 3). No obstante, en algunos árboles analizados la biomasa llega a representar hasta 87.14 %. En árboles maduros, Muñoz et al, (2005) indican que la biomasa total promedio por árbol de *Pinus radiata* dominante alcanzó a 2.090 kg, lo que equivale a 1.5 veces la biomasa de los árboles codominantes (1.388 kg) que a su vez poseen 2.2 veces la biomasa de los árboles intermedios (627 kg). Como puede observarse, la mayor parte de biomasa en la plantación la plantación

estudiada se encuentra albergada en hojas y ramas y el resto en el fuste del árbol. Estas observaciones se aproximan a otras estimaciones realizadas en otros ecosistemas, por ejemplo Luna (1999), encontró que la biomasa de diez especies del matorral espinoso tamaulipeco se encuentra distribuida como sigue: el 6 % pertenece a hojas, 54 % a ramas y 40 % a fustes.

En otros estudios relacionados Pacheco *et al*, (2007) nos dice que la biomasa promedio por árbol fue de 8.0 kg distribuidos como sigue: 4.1 kg en fuste, 2.0 kg en follaje y 1.9 kg en ramas en una plantación joven de 6 años de edad, de *Pinus greggii*, los cuales tuvieron 25% de hojas, 23.75% de ramas y 51.25% de fuste.

Méndez *et al*. (2011) demuestran que en *Pinus devoniana* y *Pinus pseudostrabus*, la biomasa de hojas, ramas y fuste representan el 60.2 y 58.4 % de la biomasa aérea total fue registrada en el fuste; 39.8 y 41.6 % en las hojas y ramas. En este sentido indican que en promedio a los 12 años la *Biomasa* fue de 31-6 a 71-2 kg en *Pinus devoniana*, y de 29-4 a 122.1 kg en *Pinus pseudostrabus*, con una diferencia de 50.8 kg entre los máximos de ambas especies.

5.3 Modelos para estimar biomasa en *Pinus cembroides* Zucc

5.3.1 Modelos con diámetro basal

El modelo que mejor se ajustó a los datos de biomasa aérea y a volumen de fuste de *Pinus cembroides* Zucc fue el 6, este modelo tienen en su estructura como variables independientes el diámetro basal (cm) y la altura total (m) (Cuadro 1). De acuerdo a la R^2 ajustada, el modelo se ajustó mejor a volumen de fuste, ya que se obtuvo una R^2 de 0.8109; no obstante el modelo 6 se ajustó muy bien a biomasa de fuste (R^2 de 0.8050), sin embargo y como en la mayoría de los estudio de biomasa se ha evidenciado, la irregularidad en la

distribución de biomasa de hojas y ramas a nivel de árboles es la que registra menor ajuste, en este sentido el diámetro basal y la altura solo explicaron 64.86 % de la biomasa de hojas y ramas.

En este mismo tenor se observa que la mayor varianza estimada por el modelo (representada por el coeficiente de variación) se registra en biomasa de hojas y ramas (coeficiente de variación de 31.55 %), mientras que la menor varianza se observa en biomasa total (coeficiente de variación de 21.74 %). (Cuadro 4)

Cuadro 4. Estadísticas de modelos alométricos seleccionados, para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste en función de diámetro basal, en árboles de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc ubicada en Arteaga Coahuila.

Estadísticas de la regresión	Bhr (6)	Bf (2)	Bt (6)	Vf (6)
Coefficiente de correlación múltiple	0.8041	0.8972	0.8929	0.9005
Coefficiente de determinación R^2	0.6465	0.8050	0.7972	0.8109
R^2 ajustado	0.6486	0.7958	0.8116	0.7961
Error típico	0.36	0.15	0.38	256.44
Media	1.1452	0.5999	1.7451	1034.288
Observaciones	182	182	182	182
Coefficiente de Variación	31.55	24.81	21.74	24.79

Donde: Donde: Bhr(6) = biomasa de hojas y ramas; Bf(2)= biomasa de fuste; Bt(6) = biomasa total; Vf(6)= volumen de fuste. Entre paréntesis se indica el modelo seleccionado.

Luna (1999) realizó un estudio para estimar biomasa aérea en el matorral desértico Tamaulipeco nos indica que las R^2 fueron de 0.59 y 0.66 para diez especies multifustales,

estas especies son: *Cordia boissieri* DC, *Helietta parvifolia* Benth, *Condalia hoockeri* Johnst, *Diospyros texana* eastw, *Acacia rigidula* Benth, *Celtis pallida* Torr, *Acacia berlandieri* Benth, *Acacia farnesiana* (L), *Pithesellobium pallens* standl, *eysenhardtia texana* scheele.

Según Rodríguez *et al*, (2007) el modelo potencial dio mejor ajuste según los criterios de bondad, los coeficientes de determinación R^2 fueron superiores a 0.97 en todas las especies evaluadas, los valores más altos de este coeficiente ($R^2= 0.99$) los registró *Junipeus flacida* seguido de *Pinus pseudostrobus* y *Quercus laceyi* estos últimos con una $R^2=0.98$.

Méndez *et al*, (2011) estudiando la biomasa aérea de *Pinus devoniana* y *Pinus pinus seudostrobus* encontraron que los ajustes, según la R^2 ajustada promedio son de: son de 0.87 y 0.73 en hojas, en ramas y en fuste. En árboles de similares dimensiones de *Pinus greggii*, Pacheco *et al*, (2007) encontraron que el ajuste para estimar biomasa aérea es de $R^2= 0.88$, aunque este fue otro tipo de modelo.

Cuadro 5. Coeficientes de regresión de modelos alométricos seleccionados para estimar biomasa área y volumen de fuste en función de diámetro basal, en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Variable	Modelo	Coficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Biomasa		<i>a</i>	-7.4956	0.6873	-10.905	< 2e-16 ***
Hojas		<i>b</i>	1.1716	0.1423	8.231	3.75e-14***
ramas	6	<i>c</i>	1.1294	0.1620	6.970	5.88e-11***
Biomasa		<i>a</i>	-7.5664	0.2394	-31.610	<2e-16 ***
de Fuste	2	<i>b</i>	0.8523	0.0295	28.880	<2e-16 ***
Biomasa	6	<i>a</i>	-6.7005	0.4996	-13.412	< 2e-16 ***

total		<i>b</i>	1.3360	0.1035	12.913	< 2e-16 ***
		<i>c</i>	1.0090	0.1178	8.566	4.82e-15***
Volumen		<i>a</i>	-0.4945	0.5249	-0.942	< 2e-16 ***
de fuste	6	<i>b</i>	1.6302	0.1087	14.998	< 2e-16 ***
		<i>c</i>	0.9503	0.1237	7.679	1.01e-12***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres.

De acuerdo al Cuadro 5, se concentran los estadísticos de los coeficientes de los modelos seleccionados usando el diámetro a la base, en los cuales se observa tienen cierta similitud únicamente en los ajustados de biomasa total (a) -6.7005, (b) 1.336, (c) 1.009 y biomasa de hojas ramas (a) -7.4956, (b) 1.1716, (c) 1.1294 y los coeficientes menos parecidos fueron los de volumen (a) -0.4945 (b) 1.6302 (c) 0.9503 y biomasa de fuste (a) -7.56636 (b) 0.8523. También se puede apreciar que el modelo que tuvo mejor ajuste en la mayor parte de las variables fue el modelo 6, contrariamente el modelo 2 fue el que solo se ajustó una vez.

Cuadro 6. Estadísticos de regresión (en unidades indicadas por la variable “y” del Cuadro 1) de los modelos ajustados para estimar biomasa aérea y volumen usando diámetro a la base de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Modelo	E.E.	Gl	R ²	R ² aj.	Valor de F	Valor de p
Biomasa de hojas y ramas						
1	0.3759	180	0.5837	0.5814	252.4	< 2.2e-16
2	0.3392	180	0.6611	0.6592	351.1	< 2.2e-16

3	0.3653	179	0.6091	0.6047	139.5	< 2.2e-16
4	0.3597	178	0.6232	0.6169	98.14	< 2.2e-16
5	0.3606	177	0.6234	0.6148	73.24	< 2.2e-16
6	0.3343	179	0.6726	0.6689	183.8	< 2.2e-16
7	0.1614	180	0.6631	0.6612	354.2	< 2.2e-16
8	0.0175	179	0.6458	0.6418	163.2	< 2.2e-16
Biomasa de fuste						
1	0.2936	180	0.7649	0.7636	585.6	< 2.2e-16
2	0.2551	180	0.8225	0.8215	834	< 2.2e-16
3	0.2901	179	0.7717	0.7692	302.6	< 2.2e-16
4	0.2853	178	0.7804	0.7767	210.8	< 2.2e-16
5	0.2847	177	0.7825	0.7776	159.2	< 2.2e-16
6	0.2553	179	0.8231	0.8212	416.6	< 2.2e-16
7	0.0681	180	0.7946	0.7934	696.3	< 2.2e-16
8	0.0075	179	0.8106	0.8085	383	< 2.2e-16
Biomasa total						
1	0.2878	180	0.725	0.7235	474.6	< 2.2e-16
2	0.2455	180	0.7999	0.7988	719.4	< 2.2e-16
3	0.2775	179	0.7458	0.7429	262.5	< 2.2e-16
4	0.2702	178	0.7603	0.7563	188.2	< 2.2e-16
5	0.2703	177	0.7614	0.7561	141.2	< 2.2e-16
6	0.2430	179	0.805	0.8028	369.4	< 2.2e-16
7	0.1878	3	0.8172	0.7563	13.41	0.03518
8	0.0198	179	0.7947	0.7924	346.4	< 2.2e-16
Volumen						

1	0.0199	179	0.7947	0.7924	346.4	< 2.2e-16
2	0.2936	180	0.7649	0.7636	585.6	< 2.2e-16
3	0.2551	180	0.8225	0.8215	834	< 2.2e-16
4	0.2901	179	0.7717	0.7692	302.6	< 2.2e-16
5	0.2853	178	0.7804	0.7767	210.8	< 2.2e-16
6	0.2847	177	0.7825	0.7776	159.2	< 2.2e-16
7	0.2553	179	0.8231	0.8212	416.6	< 2.2e-16
8	12.96	179	0.8106	0.8085	383	< 2.2e-16

Donde: E.E. = error estándar; Gl = grados de libertad; R^2 = coeficiente de determinación; $R^2_{aj.}$ = R^2 cuadrada ajustada.

El ajuste de los modelos seleccionados para estimar biomasa de hojas ramas, fuste, total y volumen se observa en la Figura 3. Según los modelos seleccionados (Cuadro 5), se puede observar un mejor ajuste en biomasa total (Figura 3C) y en biomasa de fuste (Figura 3 B), ya que se observa menor dispersión de los valores estimados, Contrario a lo que ocurre con la estimación de biomasa de hojas y ramas (Figura 3A) cuyos resultados fueron obtenidos de los 8 modelos corridos en las diferentes variables de biomasa de hojas y ramas, biomasa de fuste, biomasa total y volumen (Cuadro 6). Otros estudios, por ejemplo Méndez *et al*, (2011), también reporta que el mejor ajuste se observa en el componente biomasa de fuste (Bf) y en contraste el componente biomasa de hojas y ramas (Bhr).

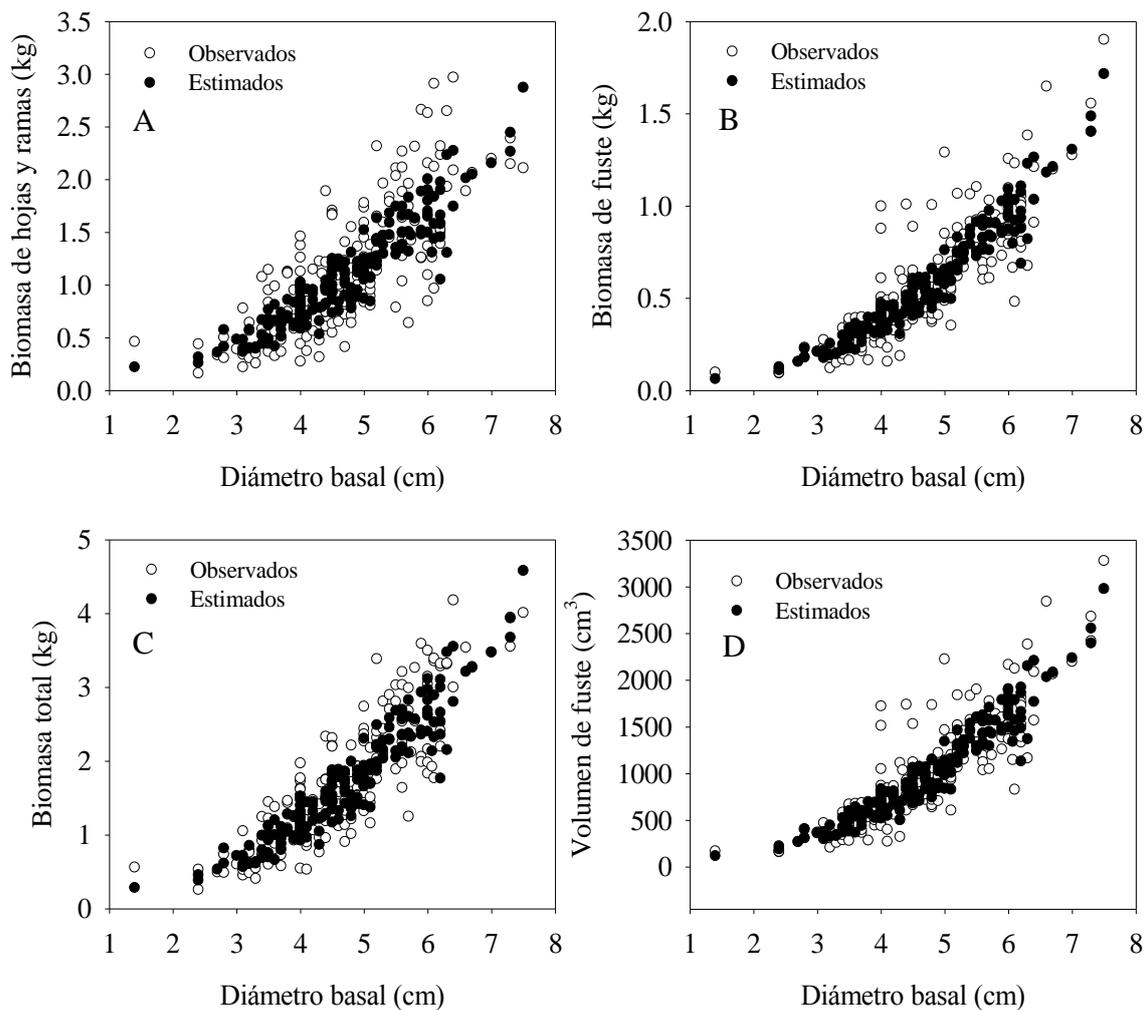


Figura 3. Biomasa estimada de hojas y ramas (A), fuste (B), total (C) y volumen (D) y observada según el modelo seleccionado, en componentes de árboles individuales usando diámetro a la base de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Deans *et al.*, (1996) obtuvieron valores de $R^2 > 0.97$ en modelos de biomasa usando 5 especies tropicales. Acosta *et al.*, (2003) presentó resultados en los que la $R^2 > 0.97$ de su modelo de biomasa de 6 especies nativas del bosque mesofilo de montaña en la sierra norte de Oaxaca, estas especies fueron *Alnus*, *Quercus*, *Rapanea*, *Clethra*, *Liquidámbar*, *Inga*, en cada uno ellos en su estudio utilizaron 10, 8, 6, 6, 10, 12 un total de 52 árboles.

5.3.2 Modelos con diámetro de copa

En este estudio se construyeron modelos alométricos para cuantificar biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc en función de diámetro de copa, lo anterior debido a que es más práctico usar esta variable, para estimar biomasa. Los resultados de este análisis se observan en el Cuadro 7.

Los ajustes variaron, según la R^2 ajustada desde 0.4100 (volumen de fuste) hasta 0.6483 (biomasa total). Los resultados demuestran que los ajustes con estas variables son mucho menores que cuando se usa el diámetro basal, ya que con diámetro basal los ajustes llegan a ser de hasta 0.8116 según la R^2 ajustada (Cuadro 4). Estos resultados nos indican que es recomendable usar los modelos alométricos usando diámetro basal.

Cuadro 7. Estadísticas de modelos alométricos seleccionados para cuantificar biomasa aérea y volumen de fuste en función de diámetro de copa, en árboles de una plantación de *Pinus cembroides* Zucc ubicada en Arteaga Coahuila.

Estadísticas de la regresión	Bhr (6)	Bf (6)	Bt (6)	Vf (2)
Coefficiente de correlación múltiple	0.7305	1.8773	0.7850	0.6887
Coefficiente de determinación R^2	0.5336	3.5241	0.6162	0.4742
R^2 ajustado	0.5330	-1.8711	0.6483	0.4100
Error típico	0.42	0.56	0.5200	436.2600
Media	1.1452	0.5999	1.7451	1034.2858
Observaciones	182	182	182	182
Coefficiente de Variación	36.37	93.04	29.70	42.1800

Donde: Bhr(6) = biomasa de hojas y ramas; Bf(6)= biomasa de fuste; Bt(6) = biomasa total; Vf(2) = volumen de fuste. Entre paréntesis se indica el modelo seleccionado.

Según Luna (1999) los mejores modelos de biomasa deben ser seleccionados en base a los estadísticos de ajuste: a) coeficiente de determinación; b) error estándar; c) aplicabilidad en el rango de arbustos observados en la parcela experimental. Covalada et al. (2010) nos dicen que en el estudio realizado para estimar biomasa aérea en diferentes ecosistemas con distinto grado de degradación encontraron una correlación de $R^2 = 0.87$, lo cual su ajuste es muy similar al ajuste registrado en nuestros modelos de biomasa con diámetro basal como variable independiente.

Cuadro 8. Estadísticos de regresión de los modelos seccionados para estimar biomasa aérea y volumen usando diámetro de copa en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Variable	Modelo	Coefficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Biomasa	6	<i>a</i>	-10.4256	0.5963	-17.483	< 2e-16 ***
		<i>b</i>	0.4889	0.1337	3.658	0.000334 ***
		<i>c</i>	1.7034	0.1492	11.414	< 2e-16 ***
Volumen	2	<i>a</i>	-2.89931	0.73099	-3.966	0.000105 ***
		<i>b</i>	0.67781	0.05115	13.252	< 2e-16 ***
hojas ramas	6	<i>a</i>	-10.874	0.6958	-15.628	< 2e-16 ***
		<i>b</i>	0.5373	0.156	3.445	0.000711 ***
		<i>c</i>	1.6611	0.1741	9.539	< 2e-16 ***
Fuste	6	<i>a</i>	-10.4256	0.5963	-17.483	< 2e-16 ***
		<i>b</i>	0.4889	0.1337	3.658	0.000334 ***
		<i>c</i>	1.7034	0.1492	3.658	< 2e-16 ***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres.

Los coeficientes de regresión obtenidos por los modelos seleccionados tienen mucha similitud entre sí, siendo la más notoria entre biomasa total (a) -10.4256, (b) 0.4889, (c) 1.7034, biomasa de hojas ramas (a) -10.874, (b) 0.5373, (c) 1.6611 y biomasa de fuste(a) -10.4256, (b) 0.4889, (c) 1.7034 el único que tuvo diferencia fueron los coeficientes arrojados en volumen (a) -2.89931, (b) 0.67781, pero esto se debe a que los valores en la variable dependiente (volumen de fuste) es diferente a las unidades de biomasa (Cuadro 8).

5.4 Comparación del método directo e indirecto para estimar biomasa

5.4.1 Pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk

Para verificar la eficiencia del método indirecto (Adelaide) fue necesario compararlo con el método directo (Iturbide 2012). Para este caso se utilizaron 20 árboles, usados para estimar biomasa aérea con ambos métodos.

El primer paso fue probar la hipótesis de normalidad de los datos de ambas muestras de árboles, para esto se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Esta prueba tiene la finalidad de verificar si los datos tienen una distribución normal o no, en caso de tener una distribución normal da certeza de realizar una prueba de “t” de dos colas, para probar la hipótesis nula de que la biomasa estimada con ambos métodos es igual.

Los resultados de la prueba de normalidad demuestran que la biomasa de hojas ramas, obtenida con ambos métodos muestra una distribución normal ($0.1495 < p < 0.3218$). La biomasa de fuste y total al menos en el método directo muestran distribución normal ($0.3043 < p < 0.6994$) (Cuadro 9).

Cuadro 9. Prueba de normalidad para los datos de biomasa aérea obtenida con el método directo e indirecto.

Variable	Valor de t	G.l.	Valor de p
Biomasa de Hojas y ramas (Método Directo)	0.9403	16	0.3218
Biomasa de Hojas y ramas (Método Indirecto)	0.9203	16	0.1495
Biomasa de Fuste (Método Directo)	0.9388	16	0.3043
Biomasa de Fuste (Método Indirecto)	0.8998	16	0.0675
Biomasa Total (Método Directo)	0.9636	16	0.6994
Biomasa Total (Método Indirecto)	0.8929	16	0.0518

Donde: Gl= grados de libertad.

5.4.2 Pruebas de t de student

Los resultados de la prueba de “t” de student para aceptar o rechazar la hipótesis nula de igual medias en la biomasa obtenida con ambos métodos indicó que a un nivel de significancia del 95 %, la biomasa de hojas y ramas obtenida con ambos métodos es estadísticamente igual ($p = 0.5429$), lo mismo se puede observar en la Figura 4A. A un nivel de significancia menos holgado (90 %), se puede decir la biomasa total (sumatoria de biomasa de hojas, ramas y fuste) estimada con ambos métodos, esta estadísticamente igual ($p = 0.0478$) (Figura 4C). Sin embargo la biomasa de fuste, estimada con el método indirecto (Adelaide), resulta ser estadísticamente más alta que en el método directo (Figura 4B); lo anterior puede deberse a que la densidad básica de la especie no fue obtenida en el área de estudio, sino que fue obtenida de árboles de la misma especie pero de edades muy superiores a la de aboles estudiados y en otra área de estudio (Cuadro 10).

Cuadro 10. Pruebas de t de student de dos colas, para muestras relacionadas, para establecer diferencias estadísticas en la estimación de biomasa aérea de *Pinus cembroides* *Zucc* con el método directo e indirecto.

Variable	Valor de t	G.l.	Valor de p
Biomasa de Hojas y ramas	0.6217	16	0.5429
Biomasa de Fuste	-4.6815	16	0.0002
Biomasa Total	-2.1435	16	0.0478

Donde: Gl = grados de libertad.

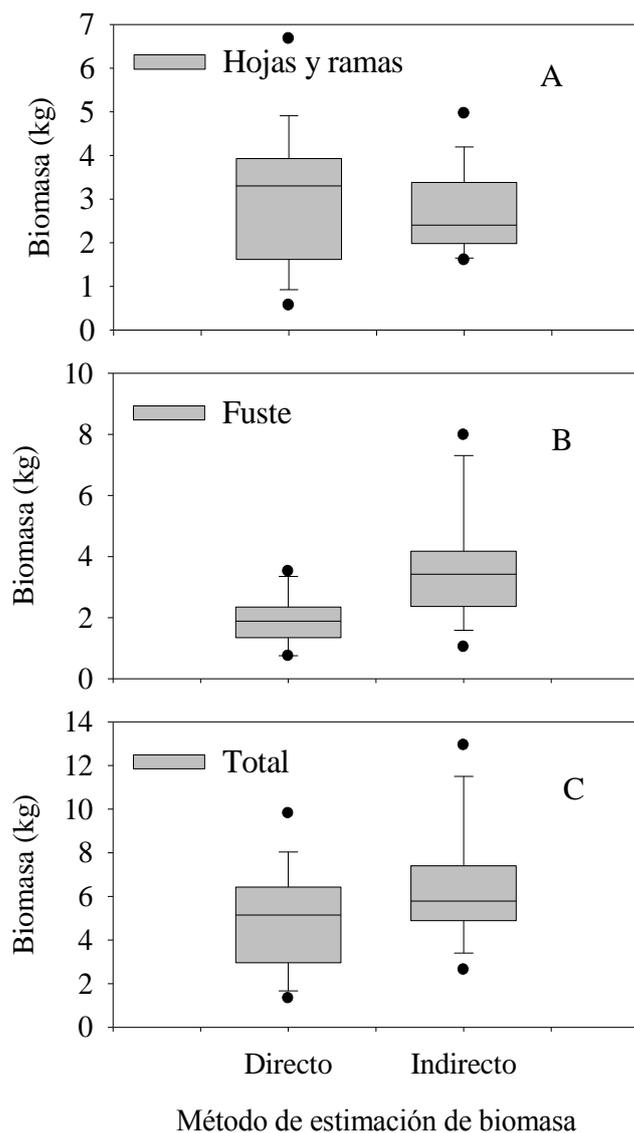


Figura 4. Comparación de la estimación de biomasa de hojas ramas(A), biomas de fuste (B) y biomasa total (C) aérea de *Pinus cembroides* Zucc usando el método directo e indirecto.

Gráficamente también se puede observar la relación estadística que se guarda entre la biomasa de los diferentes componentes A, B Y C, estimada con el método directo e indirecto (Figura 5). También se puede observar la distribución normal de algunos componentes de biomasa, (biomasa total método directo y de biomasa de hojas y ramas en ambos métodos) citados anteriormente, según la prueba de normalidad.

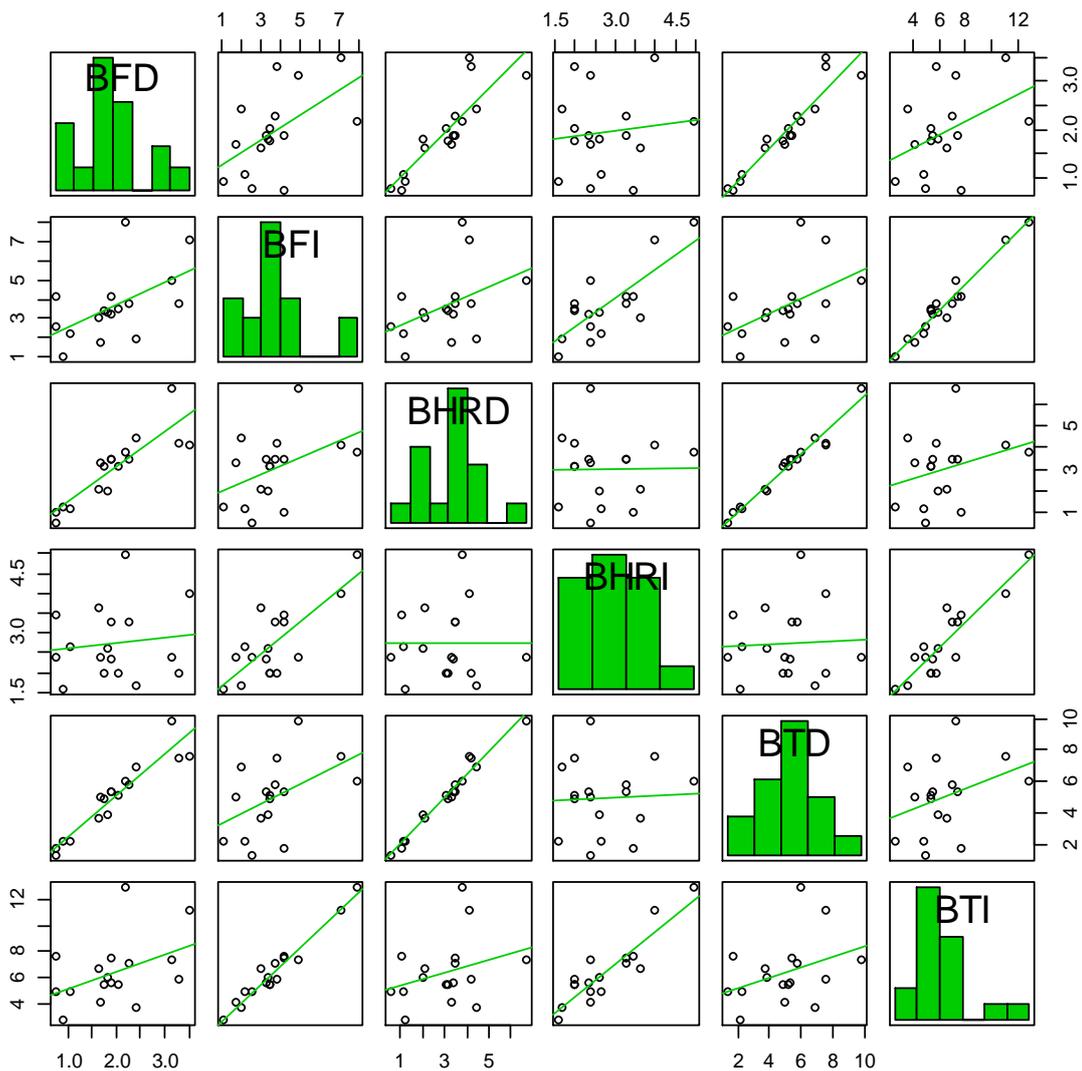


Figura 5. Relación entre biomasa estimada con método directo e indirecto en arboles individuales de *Pinus cembroides* Zucc

Donde: BFD = biomasa de fuste método directo; BFI biomasa de fuste método indirecto; BHRD = biomasa de hojas y ramas método directo; BHRI = Biomasa hojas ramas método indirecto; BTD = biomasa total método directo; BTI = biomasa total método indirecto.

También se observa buena relación entre variables, donde las variables mejor relacionadas fueron la biomasa de hojas y ramas (método indirecto) y biomasa total (método directo); biomasa de fuste (método indirecto) con biomasa total método indirecto, por citar algunos

ejemplos. Esta última relación resulta interesante ya que según los resultados, se puede construir un modelo de regresión altamente confiable para que a partir de la biomasa de fuste estimada con el método indirecto (de forma muy rápida y práctica), se estime la biomasa total del árbol, en el área y especie estudiada.

5.5 Incremento medio anual en biomasa de *Pinus cembroides* Zucc

Los incrementos medios anuales de biomasa de hojas y ramas de *Pinus cembroides* Zucc fue de 161.61 gr por año. La biomasa de fuste tuvo un incremento de 85.34 gr por año, lo cual nos da una biomasa total promedio por árbol de 246.95 gr por año. Similarmente el incremento en volumen de fuste de *Pinus cembroides* Zucc resulta en 147.14 cm³ por año.

Cuadro 11. Incrementos medios anuales en diferentes parámetros de biomasa y volumen en Arteaga Coahuila.

	IMA Bhr	IMA Bf	IMA Bt	IMA Vol
Media	161.61	85.34	246.95	147.14
Desviación estándar	74.77	42.63	106.59	73.50
Mínimo	27.00	13.17	42.66	22.71
Máximo	462.40	257.82	652.43	444.52

Donde: IMA Bhr = incremento medio anual en biomasa de hojas ramas; IMA Bf = incremento medio anual en biomasa de fuste; IMA Bt = incremento medio anual en biomasa total; IMA Vol = incremento medio anual en volumen.

En bosques maduros, Muro (1978) evaluó una plantación experimental de *Pinus patula* dentro del rango natural en la comunidad de San Pablo Macuilianguis, Ixtlán, Oaxaca, reportando incrementos de 11.623 metros cúbicos por hectárea por año, y un volumen medio por hectárea de 162.716 metros cúbicos.

Los modelos de regresión generados para estimar incremento de biomasa de *Pinus cembroides* Zucc en función del diámetro basal fueron estadísticamente muy buenos ($p < 0.0001$). La mejor estimación se observa en incrementos de biomasa total ($R^2 = 0.5537$) (Cuadro 12, Figura 5, C) y la peor estimación se registra en incrementos de biomasa de hojas y ramas ($R^2 = 0.4307$) (Cuadro 12, Figura 5, A).

Cuadro 12. Estadísticos básicos de las variables en incrementos medios anuales de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila, México.

Variable	Coficiente	Valor	Error estándar	Valor de t	Pr(> t)	Error de estim.	R ²	Valor de p
IMA Bhr	a	-58.218	19.300	-3.016	0.00293	56.57	0.4307	< 2.2e-16
	b	46.694	4.001	11.669	2.00e-16			
IMA Bf	a	-50.180	10.280	-4.883	2.29e-06	30.12	0.5035	< 2.2e-16
	b	28.780	2.130	13.512	2.e-160			
IMA Bt	a	-108.394	24.359	-4.449	1.50E-05	71.40	0.5537	2.30E-33
	b	75.477	5.050	14.944	2.30E-33			
IMA vol	a	-86.511	17.715	-4.883	2.29e-06	51.93	0.5035	< 2.2e-16
	b	49.628	3.673	13.512	2.0e-16			

Donde: IMA Bhr = incremento medio anual en biomasa de hojas y ramas; IMA Bf = incremento medio anual en biomasa de fuste; IMA Bt = incremento medio anual en biomasa total; IMA vol = incremento medio anual en volumen; Pr(>|t|) = probabilidad de t; R²= coeficiente de determinación; a= beta uno; b= beta dos; c= beta tres;

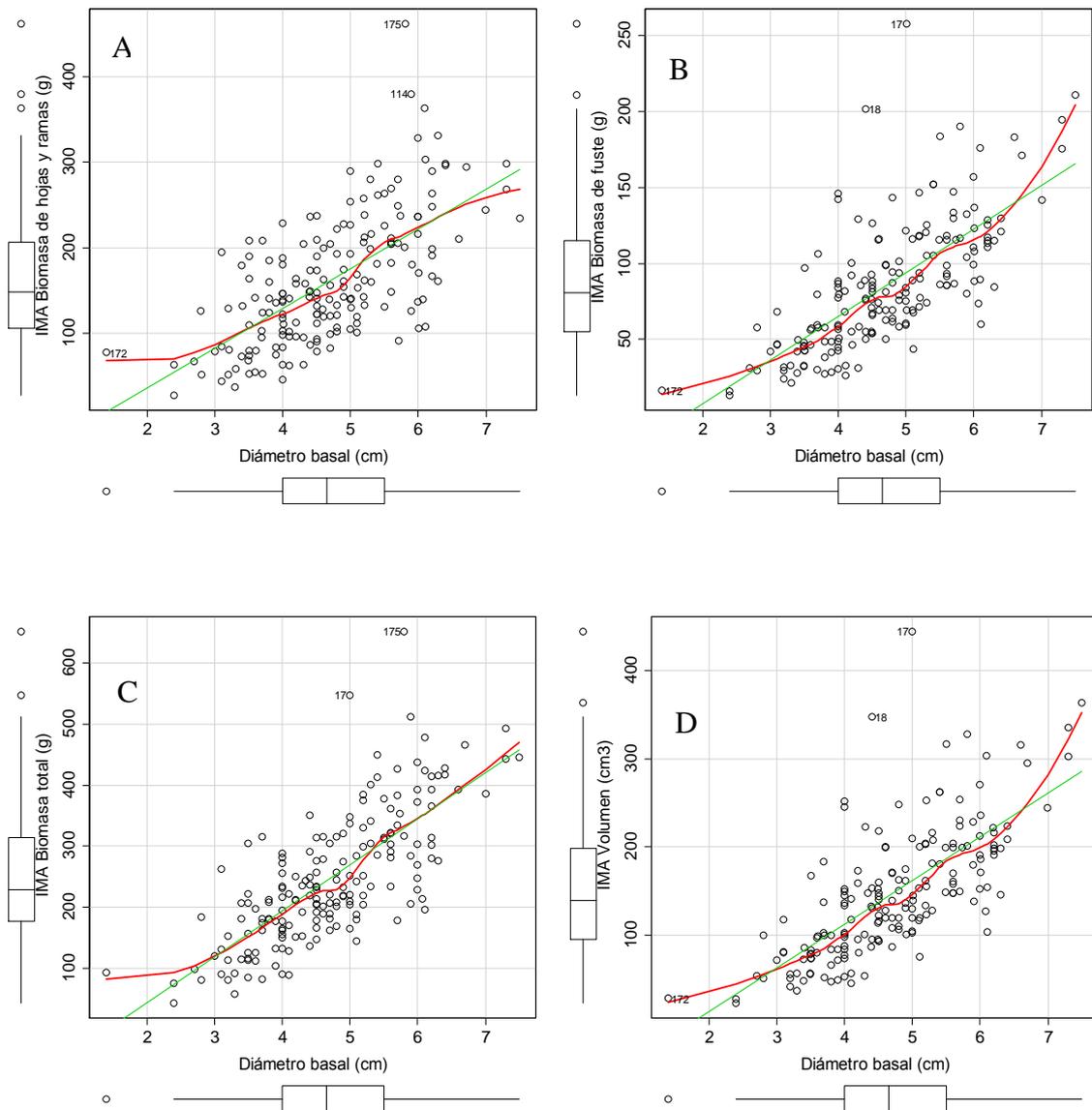


Figura 5. Incremento medio anual de biomasa de hojas ramas (A), biomasa de fuste (B), Biomasa total (C) y volumen (D), de árboles individuales de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila, México.

6. CONCLUSIONES

El método de Adelaide resultó ser eficiente para estimar biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc, especialmente para biomasa de hojas y ramas, pero también para biomasa total, no así para biomasa de fuste. Los modelos probados se ajustaron para estimar biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc, utilizando como variable independiente el diámetro basal del árbol. Por el contrario, el diámetro de copa del árbol no se ajustó para estimar biomasa aérea de *Pinus cembroides* Zucc. El diámetro basal del árbol resulta confiable para estimar incrementos medios anuales en biomasa de hojas, ramas fuste y total; en los árboles estudiados de *Pinus cembroides* Zucc, se registra un incremento medio anual de casi 250 gr por año. También es posible estimar biomasa de fuste con el método indirecto (adelaide) y mediante regresión; estimar biomasa total del árbol sin cuantificar el resto de los componentes (hojas y ramas) del árbol. Es recomendable usar el método de Adelaide para estimar biomasa aérea en el género *Pinus*, pero siguiendo la metodología propuesta en esta investigación así como considerar alturas del árbol no mayor a 2 m.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta M. M., Vargas H. J., Velázquez M. A. y Etchevers B. J. D. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia*. 36: 725-736.
- Acosta M., M 2003, Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícola de ladera en México. Tesis doctoral, colegio de postgraduados. Montecillo, Texcoco, México. 89 p.
- Alder, D. 1980. Estimación del volumen forestal y predicción del rendimiento con referencia especial a los trópicos. *Estudios FAO Montes 22/2*. Roma, Italia. 118 p.
- Andrew M. H., I. R. Noble, R. T. Lange. 1979. A non-destructive method for estimating the weight of forage shrubs. *Australian rangeland journal* 1(3): 225 - 231.
- Bailey, D. K. (2001). *Pinus cembroides* Zucc, (1), 1–7.
- Becerril P. R. 2007. Estimación del contenido y captura del carbono en zonas semiáridas microcuenca “El Carmen”, Gto. Tesis de Maestro en Gestión Integrada de Cuencas, Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ciencias Naturales, 82 p.
- Bocanegra, V. (2013). Caracterización producción de biomasa del matorral espinoso tamaulipeco, en el municipio de linares, nuevo león, México. fcf.uanl.mx. Retrieved from http://www.fcf.uanl.mx/sites/default/files/web/documents/narepp/Tesis_Victor_de_Leon.pdf.
- 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. . http://www.winrock.org/ecosystems/files/Brown_Gillespie_et_al_1989.pdf
- Brown, S. 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests. A primer. FAO Roma. Forestry Paper 135.
- Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento Madera y Bosques 13(1), 2007:25-34 en rodales de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Posgraduados. Montecillos, México. 66 p.

- CATIE. 1997. Resultado de 10 años de investigación silvicultural del proyecto Maledeña en Nicaragua. Serie Técnica. Informe Técnico No 292. Turrialba, Costa Rica. 145 p.
- Covaleda, S., Paz, F., & Jong, B. De. (2010). Modelos de estados y transiciones para los almacenes de carbono de biomasa aérea y suelo de las principales regiones de Chiapas, (recopilación de información) conservation international, kibeltik, programa mexicano del carbono 85p.
- Deans.J.D,J Mora and J.Grace 1996 Biomass relationships for tree species in regenerating semidesiduos tropical moist forest in cameroon. Forest ecology and management 88:215-225.
- Díaz-Franco, R., Acosta-Mireles, M., Carrillo-Anzures, F., Buendía-Rodríguez, E., & Etchevers-Barra, E. F. J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula Schl . et Cham*, 13(1), 25–34.
- EPA (Environmental Protection Agency) 2003. Página en internet: www.epa.gov.
- Foroughbakhch R., G. Reyes., M. A. Alvarado V., J. Hernández P., A. Rocha E. 2005. Use of quantitative methods to determine leaf biomass on 15 woody shrub species in northeastern of México. Forest ecology and management 216: 259 - 366.
- Foroughbakhch R., J. L. Hernández P., M. A. Alvarado V., E. Céspedes C., A. Rocha E., M. L. Cárdenas A. 2009. Leaf biomass determination on woody shrub species in semiarid zones. Agroforest systems 77: 181 - 192.
- García E. (1987). Modificación al sistema de clasificación climática de Köppen, para adaptarla a las condiciones de la República Mexicana. UNAM. México. 213 p.
- Iturbide Andres, I. (2014). Cuantificación de Biomasa y Carbono en *P.Cembroides Zucc.*, Mediante un Modelo Alometrico en los Lirios Arteaga, Coahuila, México. (Tesis de ingeniería). Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.
- IPCC (2001). Consenso Científico sobre el Cambio Climático: Evaluación 2001. <http://www.greenfacts.org/es/cambioclimatico/n-3/index.htm>.
- Ketterings, Q. M, Coe, R, van Noordwijk, M., Ambagau, Y. y Palm, A. 2001.Reducing uncertainty in the use of allometric biomass equations for predicting above-ground

tree biomass in mixed secondary forests. *Forest Ecology and Management* 146(1-3):199-209.

Luna, J. A. (1999). Ecuaciones para estimar Biomasa, Volumen y Crecimiento en Biomasa y Captura de Carbono en diez especies típicas del Matorral Espinoso Tamaulipeco del nordeste de México. (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León.

Méndez G. J., Luckie N. S. L., Capo A. M. A. y Nájera L. J. A. (2011). Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia*. 45: 479-491.

Mendoza-Ponce, a., & Galicia, L. (2010). Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry*, 83(5), 497–506. doi:10.1093/forestry/cpq032.

Merino, C. R. J. B. R. R.-S. A. (2001). Biomasa y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata*. don del norte de España, 1–4.

Muñoz C. R, J Cancino C., M. E. B. (2005). Análisis de biomasa del vuelo de un rodal adulto de *Pinus radiata*, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de concepción, chile 26(3), 33–44.

Nowak J. D., Hoehn R., Crane E. D. (2007). Oxygen Production by Urban Trees in the United States. *Arboriculture & Urban Forestry*. 33 (3):220–226.

Ordóñez, A. 1998. Estimación de la captura de carbono en un estudio de caso para bosque templado: San Juan Nuevo, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ciencias. UNAM. México D.F.

Pacheco F. C., Adrete A, A. Gomez G, A. M Fierros G, V. M Cetina A, H. Vaquera H, (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *pinus greggii engelm.* (artículo científico). *Revista fitotecnia mexicana*, 30(3), 251–254.

R Development Core Team. 2005. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

- Rey C., J. Brañas; R. Rodríguez; A. Merino (2001). Biomasa y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata*. Don del norte de España. (artículo científico) Escuela politécnica superior. Universidad de Santiago de Compostela. 1–4.
- Rodríguez, R. (2007). Ecuaciones alométricas para estimar biomasa aérea en especies de encino y pino en Iturbide, N.L. Facultad de Ciencias Forestales. Universidad Autónoma de nuevo león. Revista ciencia forestal en México. Vol. 32. Núm. 101
- Schlegel B. 2001. Estimación de biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempre verde. Universidad Austral de Chile. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile. 13p.
- Sprugel, D. G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. Ecology. 64 (1):209-210.
- Vaca, G.A. 1992. Variación del peso específico de la madera y longitud de traqueidas dentro de árboles de *Pinus cembroides* Zucc., de la región de Santiago Papasquiaro Durango. Tesis Prof. Universidad Autónoma de Chapingo, México. 88 p.
- Vidal (2003). Estimación de la biomasa de copa para árboles en pie de. (Instituto de investigaciones forestales) revista ciencias forestales, siboney, ciudad de la habana, cuba. 60–66.
- Yerena Yamallel, J. I., Jiménez Pérez, J., Aguirre Calderón, O. A., & Treviño Garza, E. J. (2012). Contenido de carbono total en los componentes de especies arbóreas y arbustivas en áreas con diferente uso, en el matorral espinoso tamaulipeco, en México. Bosque (Valdivia), 33(2).

8. ANEXOS

Anexo 1. Estadísticos de regresión de los modelos para estimar biomasa de hojas y ramas usando diámetro de basal en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Modelo	Coficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Biomasa de Hojas y ramas					
	<i>a</i>	-2.8364	0.1796	-15.79	<2e-16 ***
1	<i>b</i>	1.8515	0.1165	15.89	<2e-16 ***
2	<i>a</i>	-5.9644	0.3184	-18.73	<2e-16 ***
	<i>b</i>	0.7354	0.0393	18.740	<2e-16 ***
3	<i>a</i>	-1.1986	0.5110	-2.346	0.020082 *
	<i>b</i>	-0.5409	0.7106	-0.761	0.447566
	<i>c</i>	0.8440	0.2475	3.410	0.000802 ***
	<i>a</i>	0.5980	0.8581	0.697	0.48678
4	<i>b</i>	-5.9059	2.1907	-2.696	0.00769 **
	<i>c</i>	5.5112	1.8223	3.024	0.00286 **
	<i>d</i>	-1.2476	0.4827	-2.584	0.01056 *
5	<i>a</i>	1.0025	1.8508	0.542	0.589
	<i>b</i>	-7.8119	8.0272	-0.973	0.332
	<i>c</i>	8.2575	11.2741	0.732	0.465
	<i>d</i>	-2.8277	6.4193	-0.441	0.66
	<i>e</i>	0.3181	1.2886	0.247	0.805
6	<i>a</i>	-7.4956	0.6873	-10.905	< 2e-16 ***
	<i>b</i>	1.1716	0.1423	8.231	3.75e-14 ***

	<i>c</i>	1.1294	0.1620	6.970	5.88e-11 ***
7	<i>a</i>	0.2876	0.0471	6.106	6.13e-09 ***
	<i>b</i>	0.0002192	0.00001165	18.821	< 2e-16 ***
8	<i>a</i>	0.7781	0.0956	8.137	6.59e-14 ***
	<i>b</i>	-0.3692	0.0645	-5.726	4.27e-08 ***
	<i>c</i>	0.0909	0.0098	9.285	< 2e-16 ***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres; **E.E.**= error estándar; **P > F**= probabilidad de f

Anexo 2. Estadísticos de regresión de los modelos para estimar biomasa de fuste usando diámetro de basal en una plantación de *Pinus cembroides Zucc* en Arteaga Coahuila.

Modelo	Coefficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Biomasa de Fuste					
	<i>a</i>	-4.0269	0.1403	-28.710	<2e-16 ***
1	<i>b</i>	2.2023	0.0910	24.200	<2e-16 ***
2	<i>a</i>	-7.5664	0.2394	-31.610	<2e-16 ***
	<i>b</i>	0.8523	0.0295	28.880	<2e-16 ***
3	<i>a</i>	-3.1422	0.4057	-7.745	6.82e-13 ***
	<i>b</i>	0.9100	0.5642	1.613	0.1085
	<i>c</i>	0.4559	0.1965	2.320	0.0215 *
	<i>a</i>	-1.6834	0.6807	-2.473	0.01434 *
4	<i>b</i>	-3.4462	1.7379	-1.983	0.04890 *
	<i>c</i>	4.2455	1.4456	2.937	0.00375 **
	<i>d</i>	-1.0130	0.3830	-2.645	0.00889 **

5	<i>a</i>	0.0297	1.4613	0.020	0.9838
	<i>b</i>	-11.5178	6.3378	-1.817	0.0709 .
	<i>c</i>	15.8758	8.9013	1.784	0.0762 .
	<i>d</i>	-7.7047	5.0683	-1.520	0.1302
	<i>e</i>	1.3472	1.0174	1.324	0.1872
6	<i>a</i>	-7.9470	0.5249	-15.141	< 2e-16 ***
	<i>b</i>	1.6302	0.1087	14.998	< 2e-16 ***
	<i>c</i>	0.9503	0.1237	7.679	1.01e-12 ***
7	<i>a</i>	0.09207	0.01986	4.635	6.83e-06 ***
	<i>b</i>	0.0001296	0.000004913	26.387	< 2e-16 ***
8	<i>a</i>	0.1606	0.0409	3.918	0.000127 ***
	<i>b</i>	-0.1072	0.0277	-3.877	0.000148 ***
	<i>c</i>	0.0407	0.0042	9.695	< 2e-16 ***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres; **E.E.**= error estándar; **P > F**= probabilidad de f

Anexo 3. Estadísticos de regresión de los modelos para estimar biomasa total usando diámetro de basal en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Modelo	Coficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Biomasa total					
1	<i>a</i>	-2.5381	0.1375	-18.460	<2e-16 ***
	<i>b</i>	1.9435	0.0892	21.790	<2e-16 ***

	<i>a</i>	-5.7400	0.2304	-24.910	<2e-16 ***
2	<i>b</i>	0.7618	0.0284	26.820	<2e-16 ***
	<i>a</i>	-1.1437	0.3881	-2.947	0.003638 **
	<i>b</i>	-0.0935	0.5397	-0.173	0.862729
3	<i>c</i>	0.7186	0.1880	3.823	0.000182 ***
	<i>a</i>	0.5722	0.6446	0.888	0.375898
	<i>b</i>	-5.2174	1.6456	-3.170	0.001792 **
	<i>c</i>	5.1760	1.3689	3.781	0.000213 ***
4	<i>d</i>	-1.1915	0.3626	-3.286	0.001225 **
	<i>a</i>	1.7035	1.3873	1.228	0.2211
	<i>b</i>	-10.5477	6.0167	-1.753	0.0813
	<i>c</i>	12.8565	8.4503	1.521	0.1299
	<i>d</i>	-5.6107	4.8115	-1.166	0.2451
5	<i>e</i>	0.8897	0.9659	0.921	0.3583
	<i>a</i>	-6.7005	0.4996	-13.412	< 2e-16 ***
	<i>b</i>	1.3360	0.1035	12.913	< 2e-16 ***
6	<i>c</i>	1.0090	0.1178	8.566	4.82e-15 ***
7	<i>a</i>	158.73467	34.24616	4.635	6.83e-06 ***
	<i>b</i>	0.22351	0.00847	26.387	< 2e-16 ***
8	<i>a</i>	0.93867	0.10829	8.668	2.57e-15 ***
	<i>b</i>	-0.47643	0.07303	-6.523	6.81e-10 ***
	<i>c</i>	0.13158	0.01109	11.869	< 2e-16 ***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres; **E.E.**= error estándar; **P > F**= probabilidad

de f

Anexo 4. Estadísticos de regresión de los modelos para estimar volumen de fuste usando diámetro de basal en una plantación de *Pinus cembroides* Zucc en Arteaga Coahuila.

Modelo	Coficiente	Valor	E.E.	Valor de t	P > F
Volumen de fuste					
	<i>a</i>	3.4256	0.140	24.430	<2e-16 ***
1	<i>b</i>	2.2023	0.091	24.200	<2e-16 ***
2	<i>a</i>	-0.1139	0.029	10.624	0.1085
	<i>b</i>	0.8523	0.406	1.613	0.0215 *
3	<i>a</i>	4.3102	0.406	10.624	<2e-16 ***
	<i>b</i>	0.9100	0.564	1.613	0.1085
	<i>c</i>	0.4559	0.196	2.300	0.0215 *
	<i>a</i>	5.7691	0.681	8.475	8.7e-15 ***
4	<i>b</i>	-3.4463	1.738	-1.983	0.04890 *
	<i>c</i>	4.2455	1.445	2.937	0.00375 **
	<i>d</i>	-1.0130	-1.013	-2.645	0.00889 **
5	<i>a</i>	7.4820	1.461	5.120	7.91e-07 ***
	<i>b</i>	-11.5180	6.338	-1.817	0.0709 .
	<i>c</i>	15.8760	8.901	1.784	0.0762 .
	<i>d</i>	-7.7050	5.068	-1.520	0.1302
	<i>e</i>	1.3470	1.017	1.324	0.1872
6	<i>a</i>	-0.4945	0.5249	-0.942	0.347
	<i>b</i>	1.6302	0.1087	14.998	< 2e-16 ***
	<i>c</i>	0.9503	0.1237	7.679	1.01e-12 ***
7	<i>a</i>	158.73467	34.24616	4.635	6.83e-06 ***

	<i>b</i>	0.22351	0.00847	26.387	< 2e-16 ***
8	<i>a</i>	276.9400	70.676	3.918	0.000127 ***
	<i>b</i>	-184.8130	47.667	-3.877	0.000148 ***
	<i>c</i>	70.1510	7.236	9.695	< 2e-16 ***

Donde: *a*= beta uno; *b*= beta dos; *c*= beta tres; **E.E.**= error estándar; **P > F**= probabilidad de f