

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE AGRONOMÍA

DEPARTAMENTO FORESTAL



Estimación de Biomasa Aérea Mediante Modelos Alométricos en *Pinus pinceana* Gordon y  
*Cupressus arizonica* Greene, en el Ejido Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila

Por:

**MIXER MEJÍA 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 pinceana* Gordon y

*Cupressus arizonica* Greene, en el Ejido Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila

Por:

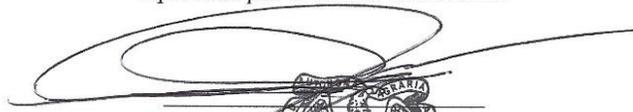
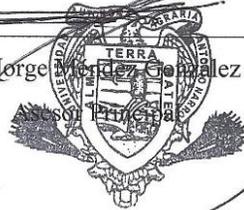
**MIXER MEJÍA MORALES**

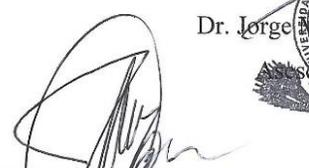
TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el título de:

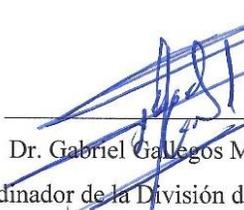
**INGENIERO FORESTAL**

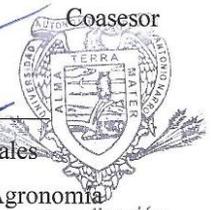
Aprobada por el comité de asesoría:

  
Dr. Jorge Méndez González  
  
Coasesor

  
M.C. José Armando Nájera Castro  
Coasesor

  
Ing. Sergio Braham Sabag  
Coasesor

  
Dr. Gabriel Gallegos Morales  
Coordinador de la División de Agronomía

  
Coordinación  
División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México

Junio de 2017

## AGRADECIMIENTOS

A **Dios** primero que nada por permitirme estar aquí y haberme dado la fuerza y las herramientas necesarias para poder salir adelante y cumplir esta meta, por haberme dado la sabiduría y la fortaleza en cada momento de mi carrera y mi vida.

A mi **Madre** que ha sacrificado gran parte de su vida por formarme y educarme, gracias a su cariño, guía y apoyo he llegado a realizar uno de los anhelos más grandes de mi vida. “por lo que soy y por todo el tiempo que le robé pensando en mi...Gracias con amor y respeto su hijo”.

A **mi Alma Mater** porque es y será una gran institución, que brinda gran cantidad de apoyo a nosotros los estudiantes.

**A mis asesores:**

**Dr. Jorge Méndez Gonzales:** por darme la oportunidad de formar parte de sus proyectos, por su apoyo y paciencia para la realización del trabajo, por ser una persona comprometida y responsable.

**M.C. José Armando Nájera Castro:** por brindarme su apoyo y dedicación en la revisión del presente trabajo.

**Ing. Sergio Braham Sabag:** Por su apoyo en la realización y revisión del presente trabajo.

A **todos los maestros del departamento forestal**, por contribuir a mi formación y desarrollo profesional al brindarme las herramientas necesarias y ser una persona competitiva en el trabajo laboral.

**Gracias a mis amigos** que conocí durante mi estancia en la Universidad por compartir de sus conocimientos y me apoyaron en momentos difíciles de mi vida, me ayudaron a seguir adelante

**Pablo, Aldren, Derli, Daniel, Miguel, Obed, Quique, Chilo, Herlin, Luisa, Soco, Milo, Ricardo, Osni, Royli,**

Solo me queda agradecerles por su tiempo, por su amistad, por su confianza, por los alegres y tristes momentos que compartimos y las lecciones aprendidas.

## DEDICATORIA

### **A mis padres:**

**Evodio Mejía Ramírez** † a pesar de que te fuiste de mi vida desde que yo era muy pequeño, siento que estas con migo siempre y aunque nos faltaron muchas cosas por vivir juntos, sé que este momento hubiera sido tan especial para ti como lo es para mí.

**Roselía Morales Velázquez** por ser el pilar más importante en mi vida y porque gracias a el amor, cariño y confianza que ella deposito en mi he logrado un sueño más en mi vida. Quien a base de trabajo, esfuerzo, sacrificio y ejemplo a hecho de mí una persona de bien, con mucho amor para ti mama.

### **A mis hermanos:**

**Otoniel Mejía Morales**

**Artemio Mejía Morales**

**Evodio Mejía Morales**

**Arisleni Mejía Morales**

Sabiendo que jamás encontraré la forma de agradecer su constante apoyo y confianza, solo espero que comprendan que mis ideales, esfuerzos y logros han sido también suyos e inspirados en ustedes porque juntos hemos enfrentado tristezas y alegrías, malos y buenos momentos, gracias por estar siempre a mi lado por ser mis hermanos los quiero mucho.

**A toda mi familia**, gracias por todos los consejos, todas las palabras de amor y apoyo que siempre he recibido de ustedes, son algo muy especial en mi vida.

## RESUMEN

Los árboles ayudan a reducir los niveles de CO<sub>2</sub> atmosférico, sin embargo para poder determinar los montos de carbono es necesario estimar la biomasa aérea. Se han propuesto diferentes metodologías para estimar la cantidad de biomasa y carbono, pero solo se han realizado para algunas especies de interés. Los objetivos de este trabajo fueron: 1) estimar biomasa aérea en árboles individuales de *Pinus pinceana* y *Cupressus arizonica*, utilizando el método indirecto (Adelaide) en una plantación del Ejido Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. 2) Ajustar y generar modelos alométricos para biomasa total, biomasa de fuste y biomasa de hojas y ramas en *Pinus pinceana* y *Cupressus arizonica*. Para realizar este estudio, se seleccionaron 50 árboles por especie, se utilizó el método Adelaide, se ajustaron diferentes modelos de regresión para estimar biomasa y para aquellos que no tuvieron buenos ajustes se procedió a generar con variables transformadas de: diámetro normal, altura, y diámetro de copa. En árboles de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana* se encontraron valores de biomasa aérea total de 14.27 a 80.34 y 11.11 a 33.52 respectivamente. Los mejores modelos probados en biomasa total, fuste, hojas y ramas de *Cupressus arizonica*, presentaron un R<sup>2</sup> ajustada de 0.653, 0.827 y 0.340. Al generar modelos se obtuvo un R<sup>2</sup> ajustada de 0.754 en biomasa total de *Cupressus arizonica*, y en *Pinus pinceana* de 0.372, 0.256 y 0.579 en biomasa total, fuste, hojas y ramas. Los modelos generados pueden ser utilizados para estimar almacenes de carbono en plantaciones forestales de esta región y en estas especies.

**Palabras clave:** modelos, biomasa, carbono, Adelaide, *Cupressus arizonica*, *Pinus pinceana*.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
2.1 Objetivo general.....	12
2.2 Objetivos específicos .....	12
2.3 Hipótesis .....	12
<b>3. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>13</b>
3.1 Cambio climático .....	13
3.2 Importancia de los ecosistemas forestales para captura de carbono .....	14
3.3 Métodos para estimar biomasa.....	14
3.4 Trabajos afines .....	16
<b>4. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>21</b>
4.1 Área de estudio .....	21
4.2 Generalidades de la especie <i>Cupressus arizonica</i> .....	21
4.3 Generalidades de la especie <i>Pinus pinceana</i> .....	22
4.4 Trabajo de campo para muestreo de biomasa (verde) de ambas especies .....	22
4.5 Número de árboles a muestrear y datos dasométricos obtenidos en campo .....	23
4.6 Trabajo de laboratorio.....	24

4.7 Obtención de peso seco en las dos especies .....	24
4.7.1 Obtención del peso seco de hojas y ramas .....	24
4.7.2 Obtención del peso seco del fuste.....	24
4.7.3 Obtención del peso seco total .....	25
4.8 Modelos alométricos para cuantificar biomasa aérea .....	25
4.9 Generación de modelos alométricos para cuantificar biomasa aérea .....	26
<b>5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>28</b>
5.1 Características de los árboles muestreados de <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> ..	28
5.2 Coeficientes de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de <i>Cupressus arizonica</i> .....	29
5.3 Modelos alométricos generados para cuantificar biomasa aérea de <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> .....	33
5.4 Representación gráfica de mejores modelos para estimar biomasa aérea en <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> .....	37
5.5 Representación gráfica de porcentajes de biomasa por componentes, en <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> .....	39
5.6 Error porcentual de biomasa estimada por categoría diamétrica en componentes de biomasa aérea en <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> .....	41
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>44</b>
<b>7. LITERATURA CITADA.....</b>	<b>45</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 1.</b> Modelos utilizados para la cuantificación de biomasa aérea.....	25
<b>Cuadro 2.</b> Características de los árboles muestreados en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	28
<b>Cuadro 3.</b> Coeficientes de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	29
<b>Cuadro 4.</b> Estadísticos de regresión de modelos ajustados para estimar biomasa aérea en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	31
<b>Cuadro 5.</b> Modelos generados para la cuantificación de biomasa aérea de <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> . ....	33
<b>Cuadro 6.</b> Coeficientes y estadísticos de regresión de modelos generados para estimar biomasa aérea en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> y <i>Pinus pinceana</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estratificación del árbol a diferentes secciones para cuantificar biomasa aérea.....	23
<b>Figura 2.</b> Biomasa estimada total (A), hojas y ramas (B) y fuste (C), según el modelo seleccionado, en componentes de árboles individuales en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	37
<b>Figura 3.</b> Biomasa estimada total (A), hojas y ramas (B) y fuste (C), según el modelo generado, en componentes de árboles individuales en una plantación de <i>Pinus pinceana</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	38
<b>Figura 4.</b> Correlación entre diámetro normal y porcentajes de biomasa por componentes, hojas, ramas y fuste, en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> (A) y <i>Pinus pinceana</i> (B) en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	39
<b>Figura 5.</b> Error porcentual de biomasa por categoría diamétrica, estimada en biomasa total (A), biomasa de hojas y ramas (B) y biomasa de fuste (C) en una plantación de <i>Cupressus arizonica</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	41
<b>Figura 6.</b> Error porcentual de biomasa por categoría diamétrica, estimada en biomasa total (A), biomasa de hojas y ramas (B) y biomasa de fuste (C) en una plantación de <i>Pinus pinceana</i> en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila. ....	42

## 1. INTRODUCCIÓN

Uno de los mayores desequilibrios ecológicos que la tierra experimenta actualmente es el llamado cambio climático global debido precisamente a la contaminación por el aumento constante de los gases que causan el efecto invernadero (GEI), los cuales se han incrementado a partir de la era industrial (Carrillo *et al.*, 2014). Las concentraciones atmosféricas mundiales de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, siendo el (CO<sub>2</sub>) es el GEI antropógeno más importante ya que contribuye notablemente al calentamiento global del planeta (IPCC, 2013).

Ante la preocupación por el constante aumento de este gas, se han implementado diferentes estrategias para capturar el carbono y así reducir la concentración del CO<sub>2</sub> en la atmósfera, ya sea a través de procesos bióticos o abióticos (Díaz *et al.*, 2007). Por lo tanto Montero *et al.* (2005) señalan que la composición de la madera y todos los demás tejidos necesarios para el desarrollo de la planta necesitan de la incorporación del CO<sub>2</sub> para sus procesos metabólicos que realizan mediante la fotosíntesis, en definitiva 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.

Schlegel *et al.* (2000), definen a biomasa forestal como el peso de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Mientras que biomasa aérea total se refiere al peso seco del material vegetal de los árboles incluyendo fustes, corteza, ramas y hojas (Dauber *et al.*, 1999).

Conocer la cantidad de biomasa de las especies arbóreas es importante para estimar la cantidad de carbono que capturan los bosques y plantaciones, proceso que representa actualmente un servicio ambiental y también para la obtención de algún bien para los propietarios de tales recursos (Hernández *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2009).

Existen métodos para estimar la biomasa y carbono los cuales se clasifican en: métodos directos e indirectos. Método directo es denominado también método destructivo y consiste en medir los parámetros básicos de un árbol, derribarlo y calcular la biomasa pesando cada uno de los componentes (González, 2008). Mientras que en el método indirecto se cubica y estima el volumen del árbol con fórmulas dendrométricas, se toman muestras de esta y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad o densidad específica (Segura, 1997).

Otra forma de estimar biomasa mediante el método indirecto es con ecuaciones alométricas de biomasa las cuales permite conocer de forma simple, la cantidad de biomasa de un árbol por medio de la medición de otras variables de fácil obtención (Ruiz *et al.*, 2014).

El método Adelaide es también una forma de estimar biomasa de forma indirecta, el cual consiste en la selección de una rama de cada especie, esta rama se denomina unidad de referencia (Andrew *et al.*, 1979), de tal forma que sea representativa en forma y densidad foliar a la especie de interés (Reyes y Foroughbackch, 1989), para después estimar el número de unidades de cada árbol a muestrear.

En México existen algunos trabajos sobre captura de carbono en diferentes ecosistemas, por lo tanto no se encuentra mucha información relativa de acuerdo a especies en particular, aunado a esto es necesario iniciar trabajos tendientes a la medición de biomasa y carbono almacenado

en las mismas. En base a lo expuesto se planteó realizar dicho trabajo con la finalidad de estimar biomasa aérea con un método indirecto probando y generando modelos alométricos en *Pinus pinceana* Gordon y *Cupressus arizonica* Greene.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo general

Ajustar y generar modelos alométricos de biomasa en componentes de *Pinus pinceana* Gordon y *Cupressus arizonica* Greene utilizando el método indirecto Adelaide, en una plantación ubicada en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

### 2.2 Objetivos específicos

1) Ajustar modelos alométricos para estimar biomasa total, biomasa de fuste y biomasa de hojas y ramas en *Pinus pinceana* Gordon y *Cupressus arizonica* Greene.

1) Generar modelos alométricos para cuantificar biomasa total, biomasa de fuste y biomasa de hojas y ramas en *Pinus pinceana* Gordon y *Cupressus arizonica* Greene.

### 2.3 Hipótesis

Las variables dendrométricas de árboles individuales estiman adecuadamente la biomasa aérea de *Pinus pinceana* Gordon y *Cupressus arizonica* Greene, mediante el uso de modelos alométricos.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3.1 Cambio climático**

Por cambio climático se entiende un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables (EIRD, 2008).

El calentamiento del sistema climático es inequívoco, como evidencian ya los aumentos observados del promedio mundial de la temperatura del aire y del océano, el deshielo generalizado de nieves y hielos, y el aumento del promedio mundial del nivel del mar, sin embargo bien sabemos que esto es provocado debido a las emisiones mundiales de GEI (gases de efecto invernadero) siendo el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) el GEI antropógeno más importante, sin embargo los aumentos de la concentración mundial de CO<sub>2</sub> se deben principalmente a la utilización de combustibles de origen fósil, a la deforestación y transformación de terreno virgen para usos agropecuarios, industriales y urbanos (IPCC, 2013).

Para México este fenómeno es de importancia, ya que se encuentra entre los 20 países con mayores emisiones de GEI, así como también se encuentra entre las regiones más vulnerables a los impactos asociados al cambio climático (Ordóñez, 1998).

### **3.2 Importancia de los ecosistemas forestales para captura de carbono**

Mediante la fotosíntesis los árboles necesitan de la incorporación del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para sus procesos metabólicos, necesarios para la composición de la madera y todos los demás tejidos indispensables para su desarrollo (Montero *et al.*, 2005). Sabiendo que biomasa se refiere al peso de la materia orgánica que existe en un bosque (Dauber *et al.*, 1999; Schlegel *et al.*, 2000), se puede decir que los bosques, incluyendo las plantaciones forestales, cumplen un importante papel en el ciclo del carbono global, dado que gran parte de la biomasa está conformada por carbono (aproximadamente el 50 %) (Gonzales, 2008). En definitiva los ecosistemas forestales aportan un servicio ambiental al capturar y fijar el carbono atmosférico como biomasa y por consiguiente, liberando oxígeno a la atmósfera a través de la respiración, contribuyendo al flujo anual de carbono (Ordóñez y Masera, 2001).

De aquí nace la importancia de estimar biomasa en los bosques ya que representa un proceso clave para el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de carbono forestal (Fonseca *et al.*, 2009; Soriano *et al.*, 2015).

### **3.3 Métodos para estimar biomasa**

Método directo: es denominado también método destructivo y consiste en medir los parámetros básicos de un árbol (entre los más importantes el diámetro a la altura del pecho - dap, altura total, diámetro de copa y longitud de copa); derribarlo y calcular la biomasa pesando cada uno de los componentes (fuste, ramas y follaje) (Gonzales, 2008).

Díaz et al. (2007) estimaron biomasa aérea con el método directo, derribando y pesando 25 árboles de *Pinus patula*, así como también Pacheco et al. (2007) utilizaron este mismo método con 20 árboles de una plantación de *Pinus greggii*. Otros autores que han utilizado este método en *Pinus hartwegii* y *Pinus patula* (Figuroa et al., 2010; Carrillo et al., 2014).

El método indirecto: consiste en utilizar métodos de cubicación del árbol donde se suman los volúmenes de madera, se toman muestras de ésta y se pesan en el laboratorio para calcular los factores de conversión de volumen a peso seco, es decir, la gravedad o densidad específica (Segura, 1997).

Rodríguez et al. (2009) estimaron biomasa con el método indirecto en un bosque de pino encino con un total de 1084 individuos, al igual que Zamora (2003) estimó el contenido de carbono en biomasa aérea en un bosque de pino en una superficie de 1010 ha.

Método Adelaide: es otra forma de estimar biomasa de forma indirecta el cual consiste en la selección de una rama de cada especie, esta rama se denomina unidad de referencia de tal forma que sea representativa en forma y densidad foliar a la especie de interés para después estimar el número de unidades de cada árbol a muestrear (Andrew et al., 1979). Reyes y Foroughbackch (1989) utilizaron este método para evaluar el potencial forrajero en un matorral tamaulipeco, así como también García (2014) estimó biomasa aérea en una plantación de *Pinus cembroides* aplicando el método Adelaide en 191 árboles.

### 3.4 Trabajos afines

Reyes y Foroughbackch (1989) compararon métodos indirectos para evaluar el potencial forrajero en un matorral tamaulipeco. Realizaron el trabajo en un predio de 200 ha, cubierto del matorral tipo subinerme/espinoso, utilizando los métodos: Adelaide, dimensional y de rama en 10 especies leñosas. Obtuvieron que el método Adelaide fue el que obtuvo mejor coeficiente de determinación para casi todas las especies variando de 0.707 a 0.985.

Pacheco et al. (2007) evaluaron el potencial de *Pinus greggii* Engelm, para almacenar carbono en la biomasa aérea, en una plantación de seis años de edad establecida en Cuaunepantla, Acaxochitlán, Estado de Hidalgo, México. En el cual seleccionaron 20 árboles en forma aleatoria, a cada árbol le midieron el diámetro a la base del tallo, el diámetro a 1.30 m y la altura total. Posteriormente, derribaron los árboles y los separaron en componentes para llevarlos al proceso de secado, el follaje a 70 °C y las ramas y fustes (madera) a 80 °C hasta alcanzar peso constante. Seleccionaron tres muestras compuestas de 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 en fuste, 2.0 en follaje y 1.9 kg en ramas. El estimado de la biomasa aérea total en el área de plantación fue de 1.4 t, lo que equivale a 35.2 t ha<sup>-1</sup>. El modelo muestra una alta correlación en función del diámetro y altura ( $D^2H$ ),  $Bt = 6426.6a + 291.42b$  con un  $R^2 = 0.89$ . El contenido de carbono promedio en fustes, ramas y follajes fue de 51 % y la acumulación de carbono en la plantación resultó ser de 17.9 t ha<sup>-1</sup> a los seis años de edad.

Fonseca et al. (2009) construyeron modelos para estimar biomasa en plantaciones de *Hieronyma alchorneoides*, *Vochysia guatemalensis* y para un grupo de 35 especies en bosque

secundario, en la zona Caribe de Costa Rica. En el cual seleccionaron nueve sitios con plantaciones forestales de *Hieronyma alchorneoides* Fr. Allem. y de *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. y siete con bosque secundario. En cada sitio instalaron parcelas o unidades de muestreo rectangulares de área fija (500 m<sup>2</sup>), midiendo el diámetro a la altura del pecho (D) de cada árbol, una vez conocido el intervalo de diámetro en cada parcela escogieron un árbol de diámetro promedio para cuantificar su biomasa utilizando el método directo de muestreo destructivo, obteniendo directamente en el campo y por separado el peso fresco de hojas (Bh), de ramas (Br), del fuste (Bf) y de la raíz (Bra). Los modelos que ensayaron fueron aproximadamente 25 para cada componente y eligieron el de mejor ajuste. Obtuvieron que los modelos seleccionados presentan buenos ajustes ( $R^2_{aj}$  superior al 82.6 %, con una  $P < 0.05$ ) para todos los componentes de biomasa. Por lo tanto el fuste, la raíz y la biomasa total fueron las variables que mostraron mejor ajuste, con  $R^2_{aj} > 91.3$  %, mientras las hojas y ramas entre 82.6 y 94.1 %, en cuanto a las plantaciones los menores ajustes en los modelos se observaron para bosque secundario.

Schlegel (2001), realizó un estudio en donde contempla la cuantificación de la biomasa y el carbono fijado en bosques templados lluviosos en la región centro-sur de Chile, en donde a base de ensayos destructivos realizó mediciones directas de biomasa en 269 individuos de 12 especies, con la información obtenida desarrollo ecuaciones alométricas. Con ellas se estimó en forma indirecta, utilizando para información de inventarios forestales, la biomasa aérea total de los árboles con un  $D \geq 5$  cm. Los modelos que mejor estimaron biomasa son del tipo alométrico uno de ellos  $\ln(Bt) = -1.835 + 2.291 * \ln(D)$  con una  $R^2$  ajustada de 0.98. Finalmente encontró que la cantidad de carbono almacenado en los sitios estudiados son muy

variable y depende del tipo y estado de desarrollo del bosque, presentando una acumulación más alta de  $662.06 \text{ t C ha}^{-1}$ .

Díaz et al. (2007) determinaron ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham, en el Ejido Mariano de Matamoros, Tlaxco, Tlaxcala. En este estudio seleccionaron 25 árboles, de los cuales obtuvieron muestras de cada uno de los siguientes componentes (fuste, ramas y follaje) y en el campo determinaron el peso fresco, tanto de la muestra como del componente. Las muestras las llevaron al laboratorio para ser secadas y obtener su peso seco, después estimaron 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 tomaron muestras de cinco árboles y fueron analizadas en el laboratorio. Finalmente obtuvieron que el diámetro 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 ajustando así la ecuación  $B = 0.0357 * D^{2.6916}$  para determinar la biomasa en función del diámetro normal y para carbono  $CC = 0.021 * D^{2.6451}$  presentando para ambos un coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0.98$ ).

Rodríguez et al. (2009) realizaron un estudio que tuvo como objetivo estimar y conocer la distribución del carbono almacenado en un bosque de pino-encino que se encuentra resguardado dentro de la Reserva de la Biosfera el Cielo, Tamaulipas, México. Dado que no fue posible derribar el árbol para ser pesado en cada uno de sus componentes, ellos optaron por calcular el volumen por árbol por especie, utilizando datos del coeficiente de forma que reporta la Memoria del Inventario Forestal del estado de Hidalgo (1985). El volumen individual por especie se multiplicó por la densidad básica respectiva de cada especie obteniendo el peso de biomasa, enseguida desarrollaron funciones de regresión en donde

probaron ocho modelos matemáticos de los cuales se seleccionó el modelo que presentó el mejor ajuste, el cual fue un no lineal de la forma  $B = a * D^b$  (Potencial), para cada una de las especies presentes en el bosque de pino-encino, obteniendo coeficientes de determinación por arriba de 0.95, indicando una alta confiabilidad. Después que contaron con los datos de biomasa por individuo se multiplicó por la concentración de carbono que contiene cada especie obteniendo el carbono total almacenado en la parte aérea. Como resultado final obtuvieron que la biomasa aérea total fue de  $186.3 \text{ t ha}^{-1}$ , presentándose la mayor parte de la biomasa en los fustes, ramas y hojas (88.6 %) y en cuanto al carbono obtuvieron una cantidad de  $110 \text{ t C ha}^{-1}$ .

Soriano et al. (2015) estimaron biomasa aérea por componente estructural para *Pinus patula* y para 11 especies de latifoliadas con importancia ecológica en el bosque mesófilo de montaña en Zacualtipán, Hidalgo, México. Hicieron muestreos destructivos de 25 árboles de *P. patula* y 46 árboles de latifoliadas, obtuvieron la biomasa de cada componente multiplicando el peso fresco por el factor peso seco: peso fresco, después sumaron la biomasa de los componentes estructurales (fuste, corteza, ramas y follaje) para la biomasa aérea total de cada árbol. Los modelos de biomasa por componentes fueron de la forma  $B = \text{Exp}(-a) * (D^2 * H)^b$  donde B es la biomasa por árbol (kg), D es el diámetro normal (cm), H es la altura total (m), a y b son los parámetros estimados. Presentaron un  $R^2$  ajustada de 0.633 a 0.925 en *Pinus patula* y de 0.757 a 0.893 en latifoliadas. Finalmente obtuvieron que la biomasa total por árbol en *Pinus patula* fue de 1.35 a 4074.6 kg teniendo proporciones promedio de biomasa: fuste (68.2 %), ramas (14.3 %), corteza (9.3 %) y follaje (8.2 %). Por lo tanto para latifoliadas la biomasa total por árbol varió de 0.2 a 1449.9 kg, presentando la mayor proporción de biomasa en el fuste con 49.1 %.

Hernández et al. (2009) estimaron biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa* en San Felipe Hidalgo Nanacumilpa, Tlaxcala, México. Generaron dos ecuaciones para determinar biomasa y carbono, tales ecuaciones fueron de la forma  $B = a D^b$  para estimar los valores  $a$  y  $b$  del modelo utilizaron datos de 26 árboles de un área de aprovechamiento forestal, determinando de forma directa la biomasa de sus componentes (fuste, ramas y follaje); de este material se seleccionaron al azar 10 submuestras de cada componente para determinar la concentración de carbono. Obtuvieron que la concentración promedio por árbol fue de 46.5 % y en cuanto a la biomasa el mayor porcentaje lo obtuvieron en el fuste con (84.5 %). Con la biomasa y el D de los 26 árboles obtuvieron el ajuste de los parámetros del modelo propuesto ( $B = 0.0713 D^{2.5104}$ ) presentando un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.99.

Carrillo et al. (2014) estimaron biomasa y carbono en dos especies arbóreas en la Sierra Nevada, México. Generaron dos ecuaciones para determinar biomasa y carbono en *Pinus montezumae* y *Alnus jorullensis* H. B. K. *ssp. Jorullensis*, realizando un muestreo destructivo. En *Pinus montezumae* ajustaron el modelo propuesto ( $B = 0.013 DN^{3.0462}$ ) con una  $R^2 = 0.9909$ , el mayor porcentaje de biomasa (77.07 %) se estimaron en el fuste incluido el tocón, mientras que en las ramas y el follaje presentó 8.45 y 9.01%, respectivamente. Para *Alnus jorullensis ssp. Jorullensis* ajustaron el modelo propuesto ( $B = 0.0195 DN^{2.7519}$ ) con una  $R^2 = 0.9311$ , el mayor porcentaje de biomasa (63.77%) se estimó en el fuste incluido el tocón, mientras que en las ramas y el follaje presentó 20.99 y 11.46 %, respectivamente.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1 Área de estudio

El presente trabajo se realizó en una plantación ubicada en el ejido Cuauhtémoc, municipio de Saltillo, Coahuila. Geográficamente la plantación está situada entre las coordenadas 25° 16' 40.29" latitud norte y 100° 59' 03.56" longitud oeste y a una altitud de 2206 msnm. Presenta la siguiente vegetación: bosque de pino, matorral desértico micrófilo y matorral desértico rosetófilo, con clima árido semicálido (BS0hw) y semiárido templado (BS1KW) con lluvias de verano, con precipitación media anual de 125 a 400 mm, con presencia de suelo litosol y xerosol cálcico, con temperatura media anual de 14 °C 18°C (Vidal-Zepeda, 1990; García, 1998).

### 4.2 Generalidades de la especie *Cupressus arizonica*

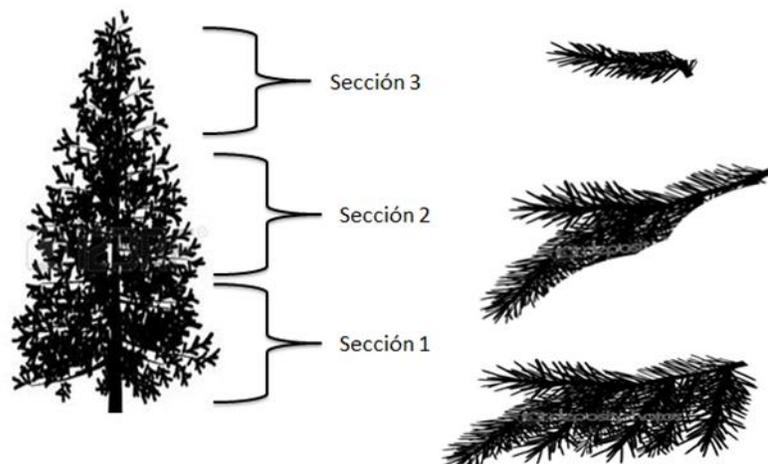
Esta especie se encuentra en el suroeste de los Estados Unidos (California, Arizona, Nuevo México, Texas) y México (Baja California, California Norte, Sonora, Chihuahua, Coahuila, Durango, Zacatecas, Nuevo León, San Luis Potosí, Tamaulipas), el rango altitudinal está entre 750 y 2700 msnm, el clima se caracteriza por veranos cálidos, calurosos, secos y lluvias invernales (Farjon, 2013).

### **4.3 Generalidades de la especie *Pinus pinceana***

*Pinus pinceana* está distribuida en varios estados del norte y este de México: Durango, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas, San Luis Potosí, Querétaro e Hidalgo, en la mayoría de su gama es encontrada en altitudes entre 1700 y 2600 msnm, en Nuevo León, recientemente se ha encontrado en altitudes de 1100 a 1700 msnm, esta especie se encuentra en zonas áridas con una precipitación entre 350 y 600 mm, por año con mayores en la parte sur de su distribución (Favela y Thomas, 2013).

### **4.4 Trabajo de campo para muestreo de biomasa (verde) de ambas especies**

Para la estimación de biomasa se utilizó el método indirecto (método Adelaide), consistió en seleccionar un árbol el cual se estratificó en tres secciones es decir tres partes similares en altura respecto al árbol, para después identificar una rama promedio por cada estrato, estas ramas se cortaron por única vez para tenerlas como muestras representativas (Figura 1).



**Figura 1.** Estratificación del árbol a diferentes alturas para cuantificar biomasa aérea.

Una vez obtenidas las ramas representativas se procedió a seleccionar el árbol a muestrear, se estratificó en tres secciones y usando las ramas respectivas de cada estrato se estimó el número de unidades de cada sección.

#### **4.5 Número de árboles a muestrear y datos dasométricos obtenidos en campo**

El tamaño de muestra de *Pinus Pinceana* y *Cupressus arizonica* fue de 50 árboles por cada especie, a cada uno de ellos se midió: el diámetro normal (cm), diámetro de copa (cm) y edad por medio del número de verticilos. De cada sección del árbol se midió: altura (m) y diámetro (cm), a modo de poder obtener la altura total del árbol y posteriormente el volumen fustal ( $m^3$ ).

## **4.6 Trabajo de laboratorio**

Las ramas de los árboles fueron recolectadas en campo, se colocaron en bolsas de papel a modo que se pudieran identificar correspondientemente al estrato y a la especie, para posteriormente introducirlas a una estufa de secado BLUE M. Modelo No. Pom-246F serial No. P6-800, sometida a una temperatura de 70 °C por 7 días, para después obtener su peso seco el cual se obtuvo usando una báscula Torrey p2c-s pizza controller.

## **4.7 Obtención de peso seco en las dos especies**

### **4.7.1 Obtención del peso seco de hojas y ramas**

El peso seco de hojas y ramas se obtuvo de la siguiente manera: se multiplicó del número de ramas de la sección por el peso seco de la rama promedio correspondiente a esta sección, realizando este mismo procedimiento para las tres secciones, los resultados de cada una se sumaron para así obtener el peso seco total de hojas y ramas del árbol.

### **4.7.2 Obtención del peso seco del fuste**

Para obtener el peso seco del fustes se calculó el volumen (V) por sección con los datos de: diámetro menor (dm), diámetro mayor (DM) y longitud (L). Para cada diámetro se calculó el Área basal (AB) para después poder utilizar la siguiente fórmula:

$$V = \left( \frac{AB \text{ de } dm + AB \text{ de } DM}{2} \right) (L) \quad 1)$$

La fórmula del volumen se aplicó para las tres secciones, el resultado de cada una se sumaron para obtener el volumen fustal de cada árbol. Enseguida para obtener el peso seco del fuste el volumen fue multiplicado por la densidad básica de la especie, (0.48 g/cm<sup>3</sup>) para *Cupressus arizonica* (Rodríguez *et al.*, 2014) y (0.43 g/cm<sup>3</sup>) para *Pinus pinceana* (Revilla, 2011).

#### 4.7.3 Obtención del peso seco total

Finalmente el peso seco total del árbol se obtuvo de la sumatoria del peso seco de hojas y ramas y el peso seco del fuste.

#### 4.8 Modelos alométricos para cuantificar biomasa aérea

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

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

N°	modelo
1	$Ln(B) = a + b \ln(D)$
2	$Ln(B) = a + b \ln(D^2H)$
3	$Ln(B) = a + b \ln(D) + c(\ln(D))^2$
4	$Ln(B) = a + b \ln(D) + c(\ln(D))^2 + d(\ln(D))^3$
5	$Ln(B) = a + b \ln(D) + c(\ln(D))^2 + d(\ln(D))^3 + e(\ln(D))^4$

---

$$6 \quad \ln(B) = a + b \ln(D) + c \ln(H)$$

---

Donde: Ln = logaritmo natural;  $a, b, c, d, e$  = coeficientes de regresión; D = diámetro normal (cm); H = altura total (m).

Los modelos se ajustaron usando el programa R-commander. Resolviendo con cuadrados mínimos (Brown *et al.*, 1989; Acosta *et al.*, 2002). La transformación logarítmica en la ecuación corrige la heterogeneidad de la varianza de la variable independiente “X” con respecto a los datos en la variable dependiente “Y” (Sprugel, 1983; Brown *et al.*, 1989), cuando las unidades originales son re-transformadas en el modelo, los valores más grandes se homogenizan con los demás valores, volviéndose a una escala más pequeña (Brown *et al.*, 1989). Para elegir el mejor modelo se evaluaron los siguientes estadísticos: coeficiente de determinación ajustada ( $R^2$  ajustada), error típico (Syx) y el valor de significancia  $\geq 10\%$  (p) de cada coeficientes de regresión.

#### **4.9 Generación de modelos alométricos para cuantificar biomasa aérea**

Para aquellos modelos probados que no tuvieron buenos ajustes se procedió a generar ecuaciones alométricas con el programa Microsoft Office Excel 2013 utilizando el complemento Regress versión 2.210, en donde se probaron las variables transformadas de: diámetro normal, altura, y diámetro de copa en las formas: lineal, lineal más interacción, cuadrático completo, cuadrado más interacción, cúbico completo, segundo orden sin interacción y tercer orden sin interacción, generando así diferentes modelos de los cuales se eligieron los mejores de acuerdo a su  $R^2$  ajustada. Para *Pinus pinceana* se generaron modelos

de biomasa total, biomasa de fustes, biomasa de hojas y ramas, sin embargo para *Cupressus arizonica* solo se generó para biomasa total.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 5.1 Características de los árboles muestreados de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*

**Cuadro 2.** Características de los árboles muestreados en una plantación de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Esp.	N	Diámetro		Altura		Bt		Bf		Bhr	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Ca	50	16.5	6.7	6.3	3.6	80.34	14.27	33.24	5.24	49.61	7.84
Pp	50	10.2	3.3	4.55	2.5	33.52	11.11	13.82	2.91	22.35	7.20

Donde: Esp = especie; N = número de árboles Ca = *Cupressus arizonica*; Pp = *Pinus pinceana*; Bt = biomasa total (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); Bhr = biomasa de hojas y ramas (kg); Max = máximos; Min = mínimos

Se puede observar en el Cuadro 2 que se presentan árboles más grandes en diámetro y altura en *Cupressus arizonica* que en *Pinus pinceana*, así como en biomasa en sus diferentes componentes. Comparando los valores máximos en biomasa total existe una diferencia de 46.82 kg en cuanto a *Pinus pinceana* y *Cupressus arizonica*. La biomasa de hojas y ramas de *Cupressus arizonica* es más alta que la de fustes teniendo una diferencia de 16.37 en valores máximos, el mismo caso se presenta para *Pinus Pinceana* con una diferencia de 8.53.

El número de árboles de *Pinus pinceana* y *Cupressus arizonica* utilizados para estimar biomasa en el presente estudio, es mayor en comparación con estudios que utilizaron 25 árboles para estimar biomasa aérea en *Pinus patula* (Díaz *et al.*, 2007; Soriano *et al.*, 2015), similar a Gudiel, (2015) quien utilizó 29 árboles en *Pinus oocarpa*, a diferencia de otros estudios que utilizaron mayor a 50 árboles para estimar biomasa en *Pinus cembroides*, *Pinus maximinoi* y *Pinus oocarpa* (Gonzales, 2008; García, 2014).

Los diámetros encontrados en el presente estudio presentaron un rango de 6.7 a 16.5 para *Cupressu arizonica* y de 3.3 a 10.2 en *Pinus pinceana* a diferencia de Díaz *et al.* (2007) que encontraron diámetros mayores en *Pinus patula* variando en un rango de 6.7 a 64.1 cm, al igual que su biomasa encontrando valores de 7.62 a 2741.76 kg, sin embargo Díaz *et al.* (2007) reportaron diámetros menores en sus estadísticos medidos en muestreo de *Quercus laurina* Humb. & Bonpl. y *Q. crassifolia* Humb. & Bonpl, en diámetro (Ql) 6 a 31cm, (Qc) 5 a 31 cm, y en biomasa (Ql) 8.37 a 675.35 kg, (Qc) 7.24 a 604.18 kg.

## 5.2 Coeficientes de regresión y estadísticos de ajuste de los modelos alométricos de *Cupressus arizonica*

**Cuadro 3.** Coeficientes de regresión de modelos alométricos para estimar biomasa aérea en una plantación de *Cupressus arizonica* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

N°	<i>a</i>	<i>t</i>	<i>b</i>	<i>t</i>	<i>c</i>	<i>t</i>	<i>d</i>	<i>t</i>	<i>e</i>	<i>t</i>
Biomasa total										

---

1	0.264	0.62	1.403	7.95						
2	-0.201	-0.46	0.600	8.93						
3	3.486	0.87	-1.338	-0.40	0.577	0.81				
4	67.371	1.85	-83.643	-1.79	35.668	1.79	-4.952	-1.76		
5	380.980	1.07	-622.870	-1.02	381.410	0.97	-102.950	-0.93	10.360	0.88
6	-0.459	-1.01	0.895	3.94	1.225	3.19				

---

Biomasa de hojas y ramas

---

1	0.578	1.01	1.064	4.51						
2	0.127	0.21	0.470	5.07						
3	2.958	0.55	-0.961	-0.21	0.427	0.45				
4	84.917	1.73	-106.551	63.18	45.444	26.89	-6.353	3.79		
5	397.080	0.82	-643.280	-0.78	389.590	0.73	-103.890	-0.69	10.310	0.65
6	-0.277	-0.45	0.463	1.49	1.448	2.75				

---

Biomasa de fuste

---

1	-2.093	-5.98	1.976	13.69						
2	-2.610	-7.55	0.824	15.36						
3	1.443	0.45	-1.031	-0.38	0.634	1.10				
4	43.940	1.46	-55.781	-1.45	23.976	1.46	-3.294	-1.42		
5	221.868	0.75	-361.714	-0.71	220.138	0.68	-58.892	-0.64	5.878	0.61
6	-2.683	-7.24	1.562	8.40	1.000	3.18				

---

Donde: t = valor de t; a, b, c, d, e = coeficientes de regresión.

Los valores mayores de coeficientes de regresión se presentan en biomasa de hojas y ramas, mientras que los menores se pueden observar en biomasa de fustes, en el parámetro  $a$  del modelo 1 se nota la diferencia en sus valores que va de 0.578 a -2.093, en el modelo 2 de 0.127 a -2.610 y así siendo mayor para hojas y ramas en todos los modelos.

Los coeficientes de regresión de los modelos probados en este estudio son diferentes con los de Ruiz et al. (2014) donde presentaron valores para biomasa total  $a = 4.337$ ,  $b = 1.076$ , biomasa de fustes  $a = 4.277$   $b = 1.049$  y biomasa de ramas  $a = 7.358$ ,  $b = 1.196$ , en *Quercus laurina*, similares a los de Soriano et al. (2015), donde reportaron valores en biomasa total  $a = 4.554$ ,  $b = 1.047$ , fustes  $a = 4.682$   $b = 1.033$  y en ramas  $a = 5.510$ ,  $b = 0.951$  en *Pinus patula*. Sin embargo en otras especies se presentan valores parecidos al modelo 1 de biomasa total, en *Juniperus flácida*  $a = 0.209$ ,  $b = 2.123$ , *Pinus teocote*  $a = 0.032$ ,  $b = 2.766$ , *Pinus pseudostrobus*  $a = 0.128$ ,  $b = 2.364$ , *Pinus patula*  $a = 0.407$ ,  $b = 2.026$  y *Pinus montezumae*  $a = 1.304$ ,  $b = 1.730$ , (Rodríguez et al., 2009). Otros autores reportaron coeficientes de regresión con valores de  $a = 0.013$ ,  $b = 3.046$  en *Pinus montezumae* (Carrillo et al., 2009) y en *Pinus patula*  $a = 0.035$ ,  $b = 2.691$  (Díaz et al., 2007).

**Cuadro 4.** Estadísticos de regresión de modelos ajustados para estimar biomasa aérea en una plantación de *Cupressus arizonica* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

N°	R <sup>2</sup> aj.	Syx	N	CV	Valor p
Biomasa total					
1	0.546	11.420	50.000	27.245	2.66E-10
2	0.625	10.381	50.000	24.765	8.96E-12

3	0.527	11.657	50.000	27.810	1.95E-09
4	0.552	11.350	50.000	27.077	2.87E-09
5	0.412	12.991	50.000	30.993	1.05E-08
6	0.653	9.990	50.000	23.834	2.71E-11

---

Biomasa de hojas y ramas

---

1	0.269	8.956	50.000	35.156	4.25E-05
2	0.340	8.507	50.000	33.392	6.32E-06
3	0.246	9.095	50.000	35.701	0.00023
4	0.276	8.913	50.000	34.987	0.00023
5	0.219	9.257	50.000	36.338	0.00061
6	0.398	8.124	50.000	31.892	7.52E-06

---

Biomasa de fuste

---

1	0.778	3.700	50.000	22.507	< 2.2e-16
2	0.827	3.263	50.000	19.844	< 2.2e-16
3	0.766	3.799	50.000	23.104	< 2.2e-16
4	0.777	3.712	50.000	22.580	< 2.2e-16
5	0.769	3.773	50.000	19.927	1.01E-15
6	0.826	3.276	50.000	19.927	< 2.2e-16

Donde:  $R^2_{aj} = R^2$  ajustada;  $S_{yx}$  = error típico (kg); N = número de árboles; CV = coeficiente de variación (%).

El modelo 6 presenta mejor ajuste en biomasa total ( $R^2_{aj}$  0.653) y el modelo 2 en biomasa de fustes, hojas y ramas ( $R^2_{aj}$  0.827 y 0.340), teniendo significancias estadísticas de sus

parámetros de  $a$  0.316,  $b$  0.0002,  $c$  0.002,  $a$   $1.05e^{-09}$   $b$   $2e^{-16}$  y  $a$  0.833,  $b$   $6.32e^{-06}$  respectivamente. En general los modelos se ajustan mejor para la biomasa de fuste con un  $R^2$  aj de 0.766 a 0.827, presentándose en este componente los menores valores de coeficiente de variación (19.84 a 22.58 %).

En comparación con las  $R^2$  ajustadas del presente estudio, Soriano et al. (2015) encontraron valores más altos en biomasa aérea total de 0.925, biomasa de fuste 0.929 y biomasa de ramas 0.735 en *Pinus patula*, así como también García (2014) presentó valores de  $R^2$  ajustada, en biomasa total de 0.802, biomasa de hojas y ramas de 0.668 y en biomasa de fuste 0.821 siendo similar con la  $R^2$  ajustada del mejor modelo en biomasa de fuste en *Cupressus arizonica*. Otros estudios reportaron coeficientes de determinación  $R^2 > 0.97$  en biomasa aérea total de *Pinus patula* (Díaz et al., 2007; Figueroa et al., 2010). Por lo tanto también Rodríguez et al. (2009) obtuvieron buenos ajustes en modelos de biomasa para especies de bosque de pino-encino presentando  $R^2$  ajustadas mayores a 0.95.

### 5.3 Modelos alométricos generados para cuantificar biomasa aérea de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*

**Cuadro 5.** Modelos generados para la cuantificación de biomasa aérea de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*.

N°	Especie	Comp.	Modelos
1	<i>Cupressus arizonica</i>	Bt	$Ln(B) = a + b \ln(D) \ln(H) \ln(DC) + c \ln(DC)$

2	<i>Pinus pinceana</i>	Bt	$Ln(B) = a + b \ln(D)(\ln(DC))^2 + c \ln(H) (\ln(DC))^2$
3	<i>Pinus pinceana</i>	Bhr	$Ln(B) = a + b (\ln(DC))^3$
4	<i>Pinus pinceana</i>	Bf	$Ln(B) = a + b (\ln(D))^2 + c (\ln(H))^3$

Donde: Bt = biomasa total (kg); Bhr = biomasa de hojas y ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); ln = logaritmo natural; a, b, c, = coeficientes de regresión; D = diámetro normal (cm); H = altura (m); DC = diámetro de copa (cm).

**Cuadro 6.** Coeficientes y estadísticos de regresión de modelos generados para estimar biomasa aérea en una plantación de *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

N°	a	t	b	t	c	t	R <sup>2</sup> aj.	Syx	N	CV
<i>Cupressus arizonica</i> (Bt)										
1	-2.082	-1.691	0.072	7.858	0.679	3.026	0.754	8.414	50.000	20.074
<i>Pinus pinceana</i> (Bt, Bhr y Bf)										
2	1.546	5.946	0.011	2.746	0.015	2.015	0.372	4.330	50.000	22.396
3	0.820	2.012	0.009	4.161			0.256	3.263	50.000	25.459
4	0.639	4.357	0.234	5.673	0.146	2.282	0.579	1.573	50.000	24.134

Donde: Bt = biomasa total (kg); Bhr = biomasa de hojas y ramas (kg); Bf = biomasa de fuste (kg); t = valor de t; a, b, c, = coeficientes de regresión; R<sup>2</sup> aj = R<sup>2</sup> ajustada; Syx = error típico (kg); N = número de árboles; CV = coeficiente de variación (%).

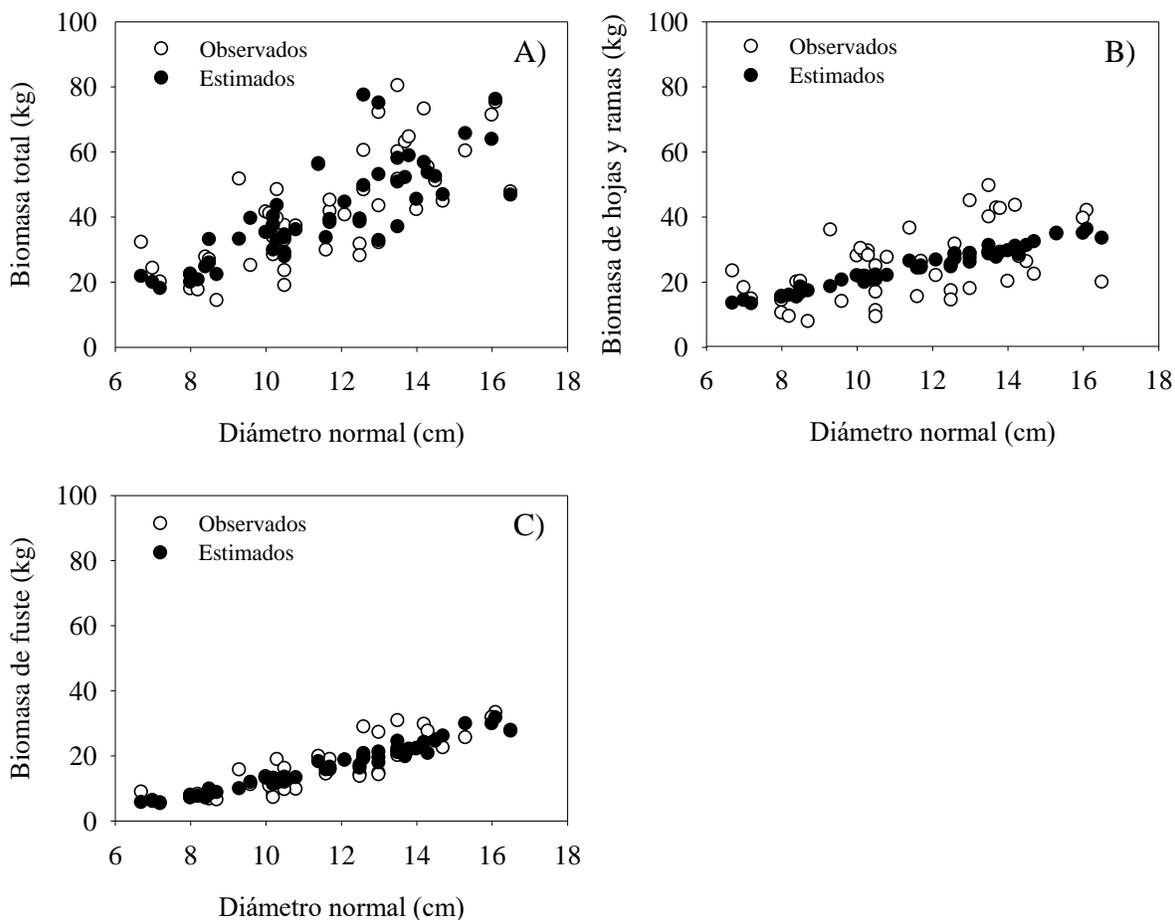
El modelo 1 para estimar biomasa total en *Cupressus arizonica* (Cuadro 5) presentó un  $R^2$  ajustada de 0.754 y un coeficiente de variación de 20.07 %, agregando las variables de diámetro normal (cm), altura (m) y diámetro de copa (cm), mejorando así estos valores en comparación con el modelo 6 (Cuadro 4), con un  $R^2$  ajustada de 0.653 y un coeficiente de variación de 23.83 (%). De los modelos generados en *Pinus pinceana*, (Cuadro 5), la mejor  $R^2$  ajustada (0.579) se presentó en el modelo 4 (biomasa de fuste) con las variables de diámetro (cm) y altura (m), sin embargo para el modelo 2 de biomasa total se observa el menor coeficiente de variación con un valor de 22.39 %.

El valor de  $R^2$  ajustada del modelo generado de biomasa total en *Cupressus arizonica* es menor respecto a el coeficiente de determinación encontrado en *Pinus oocarpa* con un valor de  $R^2$  de 0.988 (Gudiel, 2015). Similar a ecuaciones alométricas para seis especies forestales del bosque mesófilo de montaña y bosque de encino (*Quercus spp*) obtuvieron un  $R^2 > 0.97$  (Acosta *et al.*, 2002).

Los modelos generados para *Pinus pinceana* mostraron  $R^2$  ajustadas bajas a comparación con las de Ruiz *et al.* (2014) quienes generaron ecuaciones alométricas con las variables de diámetro normal y altura, con coeficientes de determinación ( $R^2$ ) altos en *Quercus laurina* y *Quercus crassifolia*, en biomasa total de 0.991, 0.982, biomasa de fustes 0.99, 0.97 y en biomasa de ramas 0.98, 0.95 respectivamente, similar a Gonzáles (2008) quien obtuvo coeficientes de determinación ( $R^2$ ) entre 0.95 a 0.99 en ecuaciones alométricas generadas con variables como el diámetro normal, altura total en pie, altura al inicio de la copa y diámetro de copa en *Pinus maximinoi*, *Pinus oocarpa* var. *Ochoterenai* y *Quercus* sp. Por lo tanto Figueroa *et al.* (2010) registraron un  $R^2$  promedio de 0.986 en biomasa total, biomasa de fuste y

biomasa de ramas de *Pinus patula*, en la misma especie Soriano et al. (2015) presentaron un  $R^2$  promedio más bajo de 0.863.

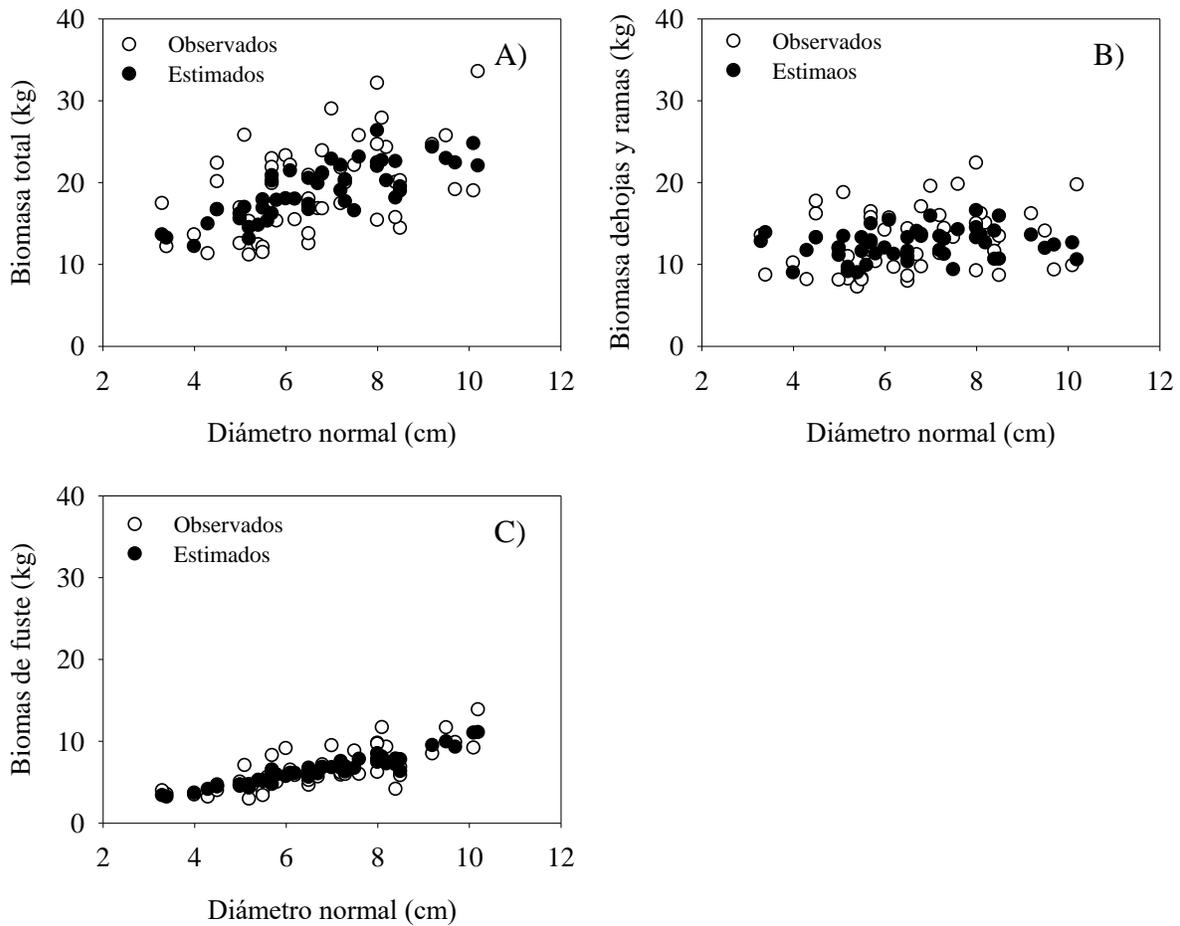
## 5.4 Representación gráfica de mejores modelos para estimar biomasa aérea en *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*



**Figura 2.** Biomasa estimada total (A), hojas y ramas (B) y fuste (C), según el modelo seleccionado, en componentes de árboles individuales en una plantación de *Cupressus arizonica* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Para estimar biomasa total (Figura 2A), se utilizó el modelo 1 de los que se generaron (Cuadro 5), mientras que para biomasa de fustes, hojas y ramas (Figura 2C, 2B) se utilizó el modelo 2

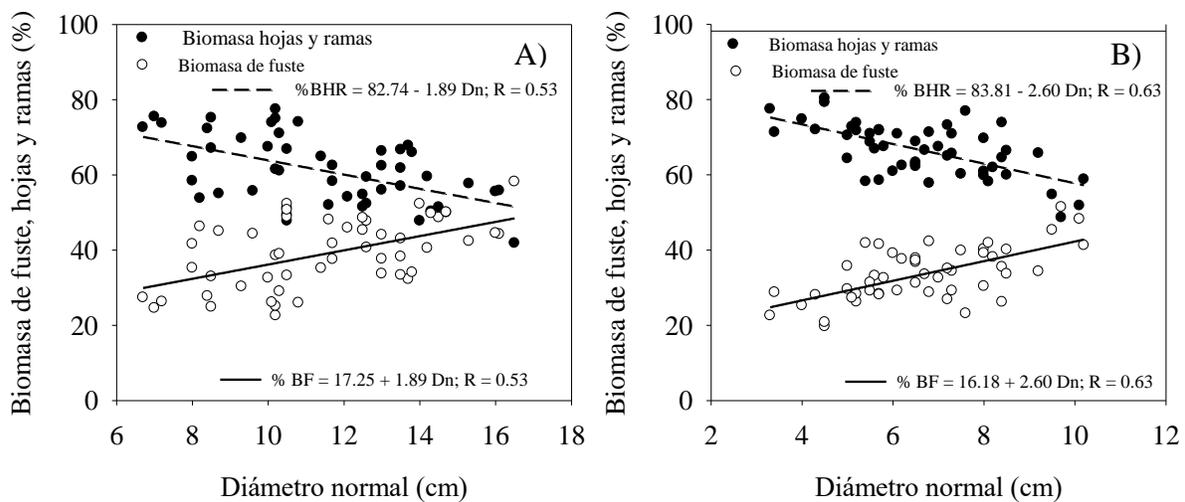
(Cuadro 1). Se puede apreciar que se tiene mayor coeficiente de variación en biomasa de hojas y ramas (33.39 %) a diferencia de biomasa total (20.07 %) y de fustes (19.84 %), y que la biomasa aérea de ambas especies puede ser estimada adecuadamente utilizando diámetro normal.



**Figura 3.** Biomasa estimada total (A), hojas y ramas (B) y fuste (C), según el modelo generado, en componentes de árboles individuales en una plantación de *Pinus pincea* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Los modelos generados (2, 3 y 4) para *Pinus pinceana* (Cuadro 5) se utilizaron para estimar biomasa total, biomasa de hojas y ramas y biomasa fuste, (Figura 3A, 3B y 3C) se observa un menor coeficiente de variación en biomasa total (22.39 %) a diferencia de biomasa de fustes (24.13 %) y hojas y ramas (25.45 %).

### 5.5 Representación gráfica de porcentajes de biomasa por componentes en *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*

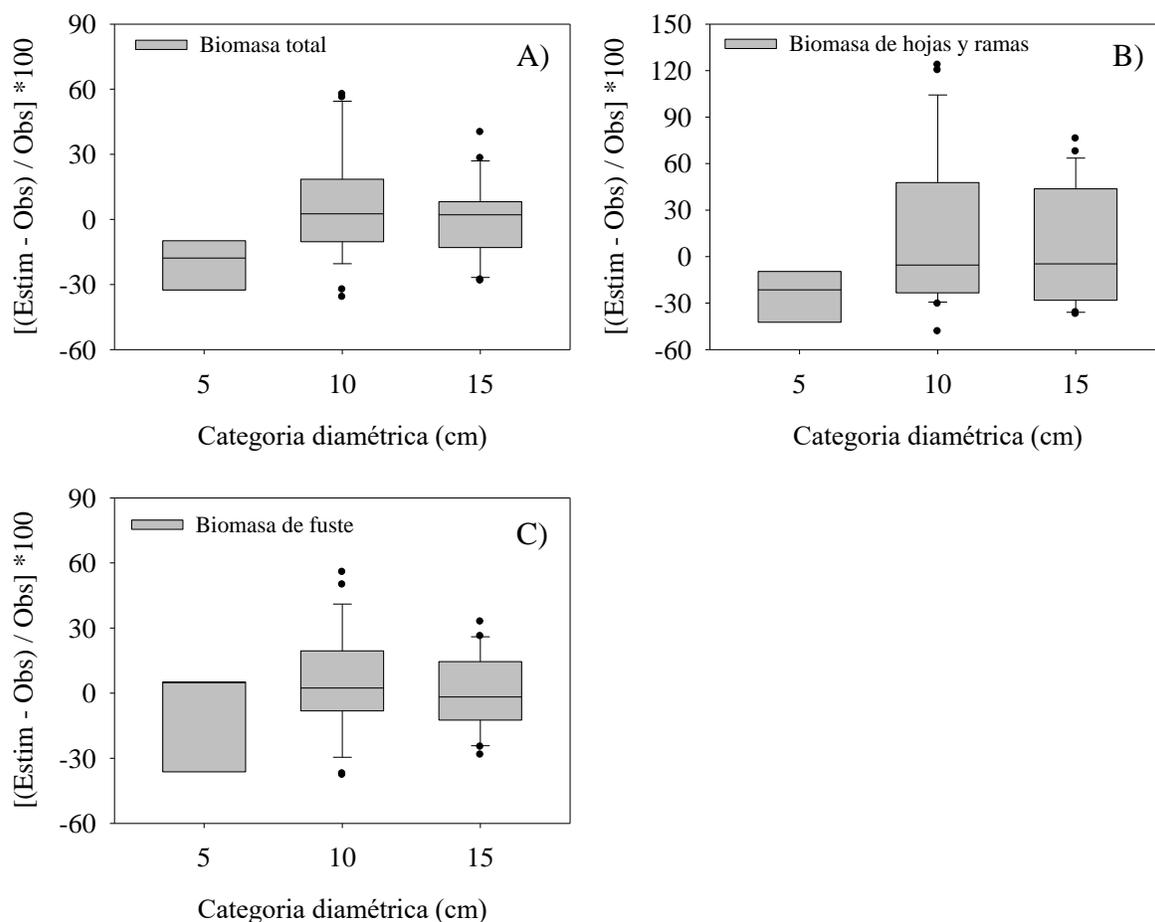


**Figura 4.** Correlación entre diámetro normal y porcentajes de biomasa por componentes, hojas, ramas y fuste, en una plantación de *Cupressus arizonica* (A) y *Pinus pinceana* (B) en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Las correlaciones realizadas nos indican las tendencias en biomasa porcentual para cada componente, se puede observar que en cuanto la biomasa del fuste aumenta la de hojas y

ramas disminuye (Figura 4A y Figura 4B. Aplicando las fórmulas en *Cupressus arizonica* (Figura 4A) y *Pinus pinceana* (Figura 4B) con un diámetro de 10 cm para ambos, se obtiene en biomasa de fustes y hojas y ramas los siguientes porcentajes, 63.84 - 36.15 % y 57.81 - 42.18 % respectivamente, esto demuestra que cuando los árboles son jóvenes, existe mayor biomasa en hojas y ramas y conforme el árbol crece esta relación cambia, al registrarse mayor biomasa en fuste.

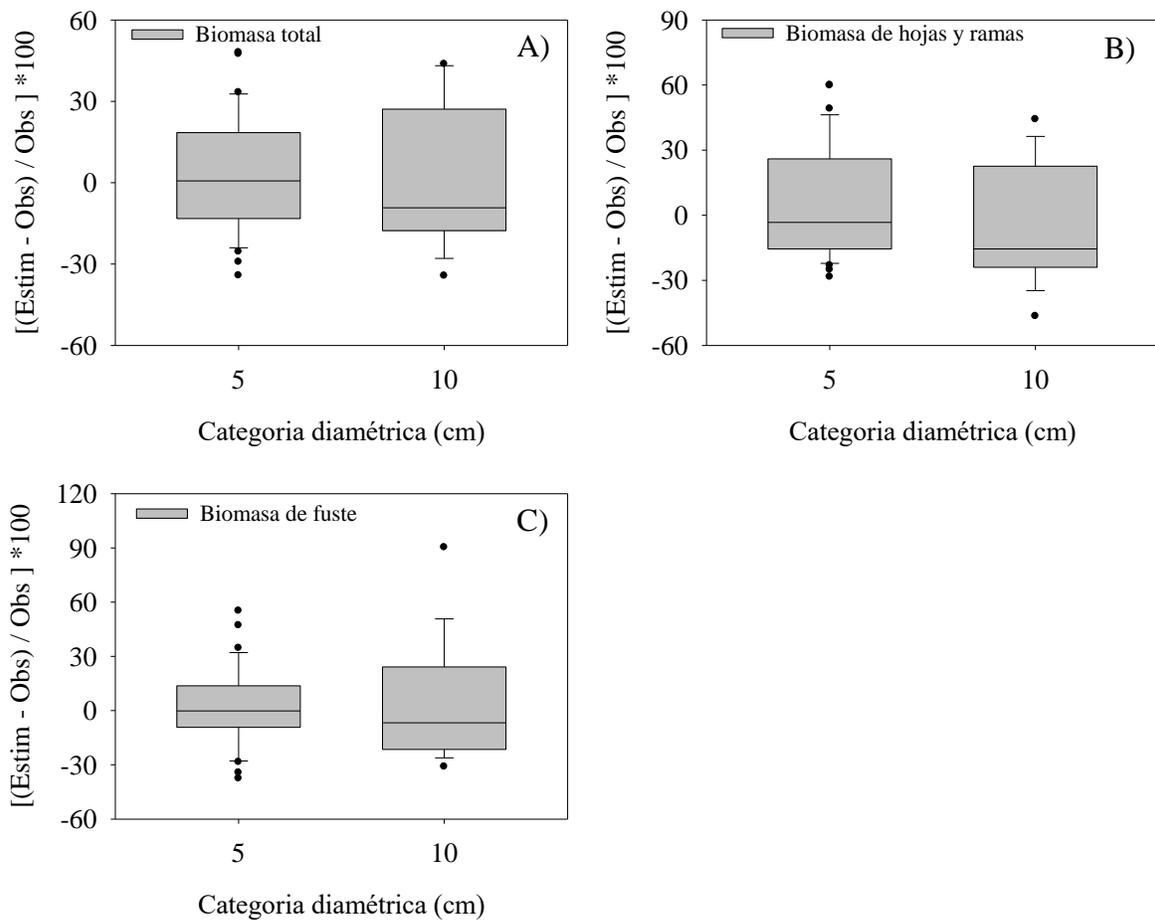
## 5.6 Error porcentual de biomasa estimada por categoría diamétrica en componentes de biomasa aérea en *Cupressus arizonica* y *Pinus pinceana*.



**Figura 5.** Error porcentual de biomasa por categoría diamétrica, estimada en biomasa total (A), biomasa de hojas y ramas (B) y biomasa de fuste (C) en una plantación de *Cupressus arizonica* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Gráficamente se puede observar que los modelos alométricos en las categorías de 5 cm subestiman los valores de biomasa total y biomasa de hojas y ramas (Figura 5A y 5B) con las medianas correspondientes de -17.83 y -21,45 %, siendo diferente para biomasa de fuste

(Figura 5C) que sobrestima con una mediana de 4.825 %. Sin embargo las categorías de 10 y 15 cm los valores de la mediana son más cercanas a cero esto indica que la estimación de biomasa es mejor. En general se aprecia que existe mejor estimación en biomasa de fuste en todas sus categorías de *Cupressus arizonica* presentando valores de medianas más cercanas a cero de 4.82 % en categoría de 5 cm, 2.32 % en categoría de 10, y -1.73 % en categoría de 15 cm.



**Figura 6.** Error porcentual de biomasa por categoría diamétrica, estimada en biomasa total (A), biomasa de hojas y ramas (B) y biomasa de fuste (C) en una plantación de *Pinus pincea* en Cuauhtémoc, Saltillo, Coahuila.

Los modelos 2, 3 y 4 (Cuadro 6) en las categorías de 10 cm de biomasa total, biomasa de hojas y ramas y biomasa de fuste (Figura 6A, 6B, 6C) subestiman la biomasa teniendo medianas correspondientes de (Bt) -9.27, (Bhr) -15.53 y (Bf) -6.70 %, a diferencia de las categorías de 5 cm teniendo valores de la mediana más cercanas a cero (Bt) 0.66, (Bhr) -3.24, (Bf) -0.15 %. Se puede observar que el modelo 4 estima mejor la biomasa en fuste, en la categoría de 5 cm - 0.15 % y en la de 10 cm -6.70 %, por estar más cercano a cero.

## 6. CONCLUSIONES

Al probar los diferentes modelos con los datos de biomasa de *Cupressus arizonica* se determinaron  $R^2$  bajas en biomasa total y biomasa de hojas - ramas, se puede afirmar que dichas ecuaciones son pocos confiables para usarse en condiciones similares, a diferencia del modelo de biomasa de fuste el cual tuvo un valor de  $R^2$  de 0.827. Al generar un modelo para biomasa total en *Cupressu arizonica* se pudo mejorar la estimación de biomasa obteniendo una  $R^2$  de 0.754 con diámetro normal y diámetro de copa. Los modelos alométricos generados para cuantificar biomasa en *Pinus pinceana* presentaron poca confiabilidad obteniendo valores de  $R^2$  de 0.256 a 0.579, siendo el más bajo el de hojas - ramas y el más alto en fuste, este ajuste bajo es debido a la variabilidad de la biomasa existente en la especie y no puede ser mejorada. En general se obtuvieron mejores modelos para estimar biomasa aérea en *Cupressus arizonica* y el componente de fuste presentó mejores ajustes en ambas especies esto se debe a la menor variabilidad en valores de biomasa. Considerando alturas de árboles menores a 2 metros es recomendable estimar biomasa aérea siguiendo esta metodología.

## 7. LITERATURA CITADA

- 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.
- 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.
- Avendaño H. D. M., Acosta M. M., Carrillo A. F. y Etchevers B. J. D. (2009). Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 32(3): 233-238.
- 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.
- Carrillo A. F., Acosta M. M., Flores A. E., Juárez, B. J. E. y Bonilla P. E. (2014). Estimación de biomasa y carbono en dos especies arbóreas en La Sierra Nevada, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*. 5(5): 779-793.
- Deuber, E., Terán J. y Guzmán R. (1999). Estimaciones de Biomasa y Carbono en Bosques Naturales de Bolivia. *Revista Forestal Iberoamericana*. 1(1): 1-10.
- Díaz F. R., Acosta M. M., Carrillo A. F., Buendía R. E., Flores A. E. y Etchevers B. J. D. (2007). Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques*. 13 (1): 25-34.

EIRD. (Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres). (2008). El cambio climático y la reducción del riesgo de desastres.

Farjon, A. (2013). *Cupressus arizonica*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T42216A2962318. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.20131.RLTS.T42216A2962318.en>. Downloaded on 23 February 2017.

Favela, S. & Thomas, P. (2013). *Pinus pinceana*. The IUCN Red List of Threatened Species 2013: e.T32629A2822604. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2013-1.RLTS.T32629A2822604.en>. Downloaded on 23 February 2017.

Figuerola N. C., Ángeles P. G., Velázquez M. A. y Santos P. H. M. (2010). Estimación de la Biomasa en un Bosque bajo Manejo de *Pinus patula Schltdl.* et Cham. En Zacualtipán, Hidalgo. Comisión Nacional Forestal. Programa Forestal, Colegio de Postgraduados. Revista Mexicana, Ciencias Forestales. 106(1): 1-9.

Fonseca W., Alice F. y Rey J. M. (2009). Modelos para estimar la biomasa de especies nativas en plantaciones y bosques secundarios en la zona Caribe de Costa Rica. *Bosque*. 30(1): 36-47.

García M.A. (2014) Estimación de Biomasa Aérea de *Pinus cembroides* Zucc. Usando un método indirecto, en una Plantación de Arteaga Coahuila. Tesis de Licenciatura, Departamento Forestal, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. 44 p.

García, E. - Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), (1998). 'Climas' (clasificación de Köppen, modificado por García). Escala 1:1000000. México.

- González Z. M. (2008). Estimación de la Biomasa aérea y la Captura de Carbono en Regeneración Natural de *Pinus maximinoi* H. E. Moore, *Pinus oocarpavar. ochoterenai* Mtz. y *Quercus* sp. En el Norte del Estado de Chiapas, México. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza escuela de Posgrado. 97 p.
- Gudiel C. D. J. (2015) Ecuación alométrica para estimar biomasa aérea en *Pinus oocarpa* bosque natural de la Microcuenca Sanata Inés, Honduras. Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano Honduras. 20 p.
- IPCC (Panel Intergubernamental de Cambio Climático). (2007). Resumen Técnico. *In* Cambio Climático 2007: Mitigación. Contribución del Grupo de Trabajo III al Cuarto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático.
- IPCC. (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2013). Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes. Contribución del grupo de trabajo 1 al quinto informe de evaluación del grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático. 204 pag. ilustradas.
- Montero G., Ruiz P. R. y Muñoz M. (2005). Producción de Biomasa y Fijación de CO<sub>2</sub> por los Bosques Españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. 275 p.
- 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.

- Ordóñez B. J. A. y Masera O. (2001). Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques*. 7(1): 1-10.
- Pacheco E. F. C., Aldrete A., Gómez G. A., Fierros, G. A. M., Cetina A. V. M. y Vaquera H. H. (2007). Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 30(3): 251-254.
- Revilla G., E. (2011). Química de la madera de cuatro pinos mexicanos de la subsección Cembroides. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. 41 p.
- Reyes R. J. y Foroughbackch R. F. (1989). Comparación de métodos indirectos para evaluar el potencial forrajero en un matorral tamaulipeco.
- Rodríguez F., Broto M. y Lizarralde L. (2014). Densidad normal de la madera de las principales especies forestales de Castilla y León.
- Rodríguez L. R., Jiménez P. J., Aguirre C. O. A., Treviño G. E. J. y Razo Z. R. (2009). Estimación de carbono almacenado en el bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera el Cielo, Tamaulipas, México. *Revista Ximhai*. 5(3): 317-327.
- Ruiz A. F., Valdez H, J. I., Manzano M. F., Rodríguez O. G., Romero. M. A. y Fuentes L.M. E. (2014). Ecuaciones de biomasa aérea para *Quercus laurina* y *Q. crassifolia* en Oaxaca. *Madera y Bosques*. 20 (2): 33-48.
- Ruiz D. C., Rodríguez O. G., Leyva L. J.C. y Enríquez V. J. R. (2014). Metodologías para Estimar Biomasa y Carbono en Especies Forestales de México. División de Estudios Posgrado e Investigación (DEPI), Instituto Tecnológico del Valle de Oaxaca. 45 P.

- Schelgel, B., Gayoso J. J. y Guerra J. (2000). Medición de la Capacidad de Captura de Carbono en Bosques de Chile y Promoción en el Mercado Mundial. Universidad Austral de Chile. 26 p.
- Schlegel, B. (2001). Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde. Universidad Austral de Chile, In Simposio internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18 al 20 de octubre del 2001, Valdivia Chile. 13 p.
- Segura M. (1997). Almacenamiento y Fijación de Carbono en *Quercus costarricensis*, en un Bosque de Altura en la Cordillera de Talamanca, Costa Rica. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Escuela de Ciencias Ambientales. 126 p.
- Soriano-Luna M. A., Ángeles-Pérez G., Martínez-Trinidad T., Plascencia-Escalante F. O. y Razo-Zárate R. (2015). Estimación de biomasa aérea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia*. 49(4): 423-438.
- Sprugel D. G. (1983). Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*. 64 (1): 209-210.
- Vidal-Zepeda R. (1990). Precipitación media anual en Precipitación, IV.4.6. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Yerena Y. J. I., Jiménez P. J., Aguirre C. O. A., Treviño G. E. J. y Alanís R. E. (2012). Concentración de carbono en el fuste de 21 especies de coníferas del noreste de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 3(1): 49-56.

Zamora C. J. C. (2003). Estimación del Contenido de Carbono en Biomasa Aérea en el Bosque de Pino del Ejido “la Majada” Municipio de Periban de Ramos, Michoacán. Tesis de Licenciatura, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Uruapan, Michoacán. 59 p.