



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES MANEJADOS DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO

MARÍA DE LOS ÁNGELES SORIANO LUNA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2014

La presente tesis titulada: **ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES MANEJADOS DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO** realizada por la alumna: **María de los Ángeles Soriano Luna** bajo la dirección del **Consejo Particular** indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. TOMÁS MARTÍNEZ TRINIDAD

ASESORA



DRA. FRANCISCA OFELIA PLASCENCIA ESCALANTE

ASESOR



DR. RAMÓN RAZO ZÁRATE

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Abril de 2014

Esta investigación fue financiada por la Oficina de Programas Internacionales del Servicio Forestal del Departamento de Agricultura de EE. UU. a través del Northern Research Station y el Programa de Paisajes Sustentables de la Agencia para el Desarrollo Internacional de EE. UU.

ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES MANEJADOS DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO

María de los Ángeles Soriano Luna, M.C.
Colegio de Postgraduados, 2014

RESUMEN GENERAL

Los sistemas de información y la base de conocimientos sobre la dinámica de carbono (C) en ecosistemas forestales han evolucionado en las últimas décadas. No obstante, aún es necesaria información sobre la influencia que el manejo forestal tiene sobre la capacidad de almacenamiento de carbono de los ecosistemas forestales. La estimación de biomasa en los bosques juega un papel clave para el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de C. Los modelos alométricos basados en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas de la biomasa. Con base en diámetro y altura, se obtuvieron modelos de predicción de biomasa por componente estructural (fuste, ramas, follaje y corteza) para *Pinus patula* y para especies de latifoliadas de importancia ecológica en el bosque mesófilo de montaña en Zacualtipán, Hidalgo. La mayor proporción de biomasa se distribuyó en el fuste (68.2 %), seguida de las ramas (14.3%), corteza (9.3%) y follaje (8.2%). La inclusión de la altura mejoró sustancialmente la precisión de los modelos. Se ajustó una función de volumen y un factor de expansión de biomasa (FEB) para *P. patula*. Aplicando las funciones generadas se determinaron los almacenes de biomasa aérea en una cronosecuencia de 1 a 22 años en rodales de *P. patula* bajo manejo del Ejido Tzincoatlán, Zacualtipán, Hidalgo. Los valores de biomasa más bajos se observaron en los rodales jóvenes (1-8 años). Por el contrario, en los rodales de mayor edad (20-22 años de edad) los valores fueron $>100 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa. En todos los rodales, la mayor cantidad de biomasa se concentró en el fuste. Los factores de expansión de biomasa varían en función de diversos factores. Sin embargo, en lugares donde no se cuenta con ecuaciones de biomasa, los FEB son una buena alternativa que facilitan los cálculos de biomasa a partir de las existencias reales de volumen maderable en un bosque.

Palabras clave: Ecuaciones alométricas, componentes estructurales del árbol, bosque manejado, *Pinus patula*, Bosque mesófilo de montaña.

TREE BIOMASS AND CARBON ESTIMATION IN FORESTS MANAGEMENT OF ZACUALTIPÁN, HIDALGO, MEXICO

María de los Ángeles Soriano Luna, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

ABSTRACT

Information systems and carbon (C) dynamics knowledge in forest ecosystems have evolved considerably in recent decades. However, still there is a lack of information about the influence that forest management on the ability of forest ecosystems for carbon storage. Estimating forest biomass plays a key role in sustainable forest management and in determining C stocks. The allometric models based on destructive sampling provide accurate estimates of standing biomass. Based on diameter and height, allometric equations for aboveground tree biomass components (stem, stem bark, branch and foliage) were derived for *P. patula* and for hardwood species of ecological importance in the mountain cloud forest at Zacualtipán, Hidalgo. The largest proportion of biomass is distributed in the stem (68.2 %) followed by branches (14.3 %), bark (9.3 %) and leaves (8.2 %). The inclusion of tree height substantially improved model precision. A function of volume and biomass expansion factor (BEF) for *P. patula* was fitted. Aboveground biomass was determined in a chronosequence of 1-22 years in managed *P. patula* stands at Ejido Tzincoatlán, Zacualtipán; Hidalgo, applying the generated functions. The lowest biomass values were observed in young stands (1-8 years). By contrast, in older stands (20-22 years old), the values of biomass were $>100 \text{ Mg ha}^{-1}$. In all stands, the highest biomass was concentrated in tree stems. The BEF varies depending on several factors. However, in places where there are no biomass equations, the BEF is a good alternative to provide biomass estimates from the actual forest volume stocks.

Keywords: Allometric equations, tree structural components, managed forest, *Pinus patula*, Mountain Cloud Forest.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios**, por dotarme de la esperanza, la salud y la fortaleza para alcanzar esta meta con abundante gozo.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)**, por la oportunidad brindada en el financiamiento de mis estudios.

Al **Colegio de Postgraduados** por su excelencia académica, en especial al **Postgrado en Ciencias Forestales**.

Al Dr. **Gregorio Ángeles Pérez** por la dirección de la presente tesis con destacado profesionalismo y admirable sencillez. Agradezco su tiempo, la oportunidad de colaborar a su lado y compartirme sus conocimientos.

Al Dr. **Tomás Martínez Trinidad** por fungir como consejero, por el tiempo, apoyo, facilidades y aportaciones para el desarrollo de la tesis.

A la **Dra. Francisca Ofelia Plascencia Escalante** por el apoyo y exhortación, por los aportes y valiosas sugerencias para la mejora de la presente tesis.

Al Dr. **Ramón Razo Zárate** por sus aportes y sugerencias a la presente tesis.

Al Dr. **Héctor M de los Santos Posadas**, por su amable disposición y asesoría estadística.

A los **profesores del Postgrado en Ciencias Forestales** por compartir sus conocimientos y experiencias.

A las **Autoridades del Comisariado Ejidal del Ejido Atopixco y Tzincoatlán** por la autorización y facilidades en el desarrollo de la presente investigación, a los técnicos comunitarios **Don Irineo, Don Socorro, Refugio** y a **las brigadas de campo** (corteños) por su apoyo en los trabajos de derribo y pesado del arbolado.

A los biólogos **Odettee Cadena** y **Oscar I. López** por el gran apoyo en la fase de campo. Por su amistad y motivación.

A mis amigos **Carmina, Arian, Esme, Roberto, Isa, Liz** y demás amistades y compañeros que coincidieron en esta etapa y que de una u otra forma contribuyeron con su amistad y motivación.

DEDICATORIA

A Dios, por concederme una vida llena de bendiciones.

Especialmente dedicado al ángel que llegó a mi vida y se convirtió en mi mayor inspiración Elyot Mtz. por tu gran contribución al permitirme el sacrificio de mi ausencia.

A Jovany Mtz por su gran amor, su confianza, apoyo y total comprensión a lo largo de estos años.

A ustedes como una muestra de infinito agradecimiento y para compartir la alegría de este logro porque este triunfo también es suyo.

Con admiración y amor a mis padres Constanacia Luna y Carlos Soriano, por todo su amor y toda una vida de sacrificios y esfuerzos, a quienes admiro y amo con toda el alma. Gracias mamá por dotarme de fortaleza y enseñarme a enfrentarme a la vida con todo su esplendor.

Con amor y admiración a mi abue[†], por el gran ejemplo de lucha constante.

Con cariño a mis hermanas: Lupita, Hernes y Linda y sus familias. A mis hermanos Varo, Lalo, Lino, Lencho y sus familias por ser parte de esta gran familia. Por estar presentes en las buenas y aún más en los momentos difíciles.

A mi cuñada Guille y a mis sobrinas: Sandy, Naye y Sabris por todo el apoyo incondicional siempre brindados, por constituir a menudo el segundo hogar de mi retoño y llenarlo de amor.

CONTENIDO

	Página
LISTA DE CUADROS	IX
LISTA DE FIGURAS	X
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. GENERALIDADES.....	1
1.2. ECOSISTEMAS FORESTALES COMO SUMIDEROS DE CARBONO.....	1
1.3. PARTICIÓN DE BIOMASA.....	2
1.4. RELACIONES ALOMÉTRICAS	3
1.5. ESTRATEGIA DE INVENTARIO.....	3
1.6. ANTECEDENTES DE CUANTIFICACIÓN DE BIOMASA EN LA REGIÓN DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO	4
1.7. OBJETIVOS.....	5
1.7.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.7.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
CAPÍTULO II ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL EN LA REGIÓN DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO, MÉXICO.....	6
2.1. RESUMEN.....	6
2.1. ABSTRACT.....	7
2.2. INTRODUCCIÓN.....	8
2.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
2.3.1. ÁREA DE ESTUDIO	10
2.3.2. MUESTREO DE ÁRBOLES PARA ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y VOLUMEN	12
2.3.3. CUBICACIÓN DE ÁRBOLES MUESTRA DE <i>Pinus patula</i>	13
2.3.4. ESTIMACIÓN DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL Y TOTAL	14
2.3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	15
2.3.6. AJUSTE DE MODELO PARA VOLUMEN EN <i>Pinus patula</i>	15
2.3.7. AJUSTE DE MODELOS PARA BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL Y TOTAL DE ÁRBOLES DE <i>Pinus patula</i> Y LATIFOLIADAS.....	16
2.3.8. FACTOR DE EXPANSIÓN DE BIOMASA	18
2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19

2.4.1. MODELOS DE VOLUMEN EN <i>Pinus patula</i>	19
2.4.2. ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA DE ÁRBOLES INDIVIDUALES	20
2.4.3. ESTIMACIÓN DE LA BIOMASA DE ÁRBOLES INDIVIDUALES EN LATIFOLIADAS	24
2.4.4. ECUACIONES DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL EN <i>Pinus patula</i>	26
2.4.5. ECUACIONES DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL EN LATIFOLIADAS	31
2.4.6. FACTORES DE EXPANSIÓN DE BIOMASA	34
2.4.7. COMPARACIÓN ENTRE ESTIMACIONES DE BIOMASA OBSERVADA Y BIOMASA POR FACTORES DE EXPANSIÓN.	36
2.5. CONCLUSIONES	40
CAPÍTULO III ACUMULACIÓN DE BIOMASA EN UNA CRONOSECUENCIA DEL BOSQUE BAJO MANEJO DE <i>Pinus patula</i> EN EL EJIDO TZINCOATLÁN, MÉXICO.....	41
3.1. RESUMEN.....	41
3.1. ABSTRACT.....	42
3.2. INTRODUCCIÓN.....	43
3.3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	45
3.3.1. ÁREA DE ESTUDIO	45
3.3.2. ESTRATEGIA DE INVENTARIO.....	47
3.3.3. ESTABLECIMIENTO DE SITIOS PERMANENTES.....	47
3.3.4. TOMA DE DATOS.....	49
3.3.5. ESTIMACIÓN DE VOLUMEN DE FUSTE.....	50
3.3.6. ESTIMACIÓN DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL Y TOTAL	51
3.3.7. ESTIMACIÓN DE CARBONO	52
3.3.8. ANÁLISIS ESTADÍSTICO	53
3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
3.4.1. DENSIDAD Y ÁREA BASAL.....	54
3.4.2. VOLUMEN ESTIMADO	57
3.4.3. BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL Y TOTAL	60
3.4.4. ACUMULACIÓN DE CARBONO POR COMPONENTE ESTRUCTURAL Y TOTAL.....	68
3.5. CONCLUSIONES	74
CAPÍTULO IV DISCUSIÓN GENERAL	75
CAPÍTULO V LITERATURA CITADA	78

LISTA DE CUADROS

	Página
<i>Cuadro 2.1 Modelos de biomasa analizados para los componentes estructurales de Pinus patula y latifoliadas.....</i>	16
<i>Cuadro 2.2 Estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para volumen total de árboles individuales de Pinus patula en Zacualtipán, Hidalgo. 20</i>	20
<i>Cuadro 2.3 Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa total de árboles individuales de Pinus patula en Zacualtipán, Hidalgo.....</i>	27
<i>Cuadro 2.4 Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa total de árboles individuales de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.....</i>	32
<i>Cuadro 3.1 Modelos utilizados para estimar biomasa de los componentes estructurales de Pinus patula.</i>	52
<i>Cuadro 3.2 Modelos utilizados para estimar biomasa de los componentes estructurales de latifoliadas.</i>	52
<i>Cuadro 3.3 Concentración media de carbono por componente en Pinus patula en Zacualtipán, Hgo.</i>	53
<i>Cuadro 3.4 Concentración media de carbono en latifoliadas.....</i>	53
<i>Cuadro 3.5 Densidad y área basal promedio para las especies arbóreas del bosque bajo manejo en el Ejido Tzincoatlán, Hidalgo.....</i>	54
<i>Cuadro 3.6 Densidad y área basal promedio para las especies arbóreas en el bosque sin manejo en el Ejido Tzincoatlán, Hidalgo.</i>	55
<i>Cuadro 3.7 Área basal y densidad promedio por anualidad en el Ejido Tzincoatlán. 57</i>	57
<i>Cuadro 3.8 Volumen promedio y diferencias estadísticas por anualidad en el Ejido Tzincoatlán.....</i>	58
<i>Cuadro 3.9 Biomasa por componente estructural de Pinus patula y latifoliadas en el ejido Tzincoatlán, Hidalgo.</i>	63
<i>Cuadro 3.10 Biomasa aérea promedio y diferencias estadísticas por anualidad en el Ejido Tzincoatlán.....</i>	65

<i>Cuadro 3.11 Carbono almacenado por componente estructural de Pinus patula y latifoliadas en el ejido Tzincoatlán, Hidalgo.....</i>	<i>69</i>
---	-----------

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 2.1 Localización del área de estudio y mapa de áreas de corta de los ejidos.</i>	<i>10</i>
<i>Figura 2.2 Diagrama de la metodología seguida para determinación de biomasa mediante el muestreo destructivo de árboles de Pinus patula y latifoliadas.</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.3 Dispersión de los valores de diámetros y biomasa total de árboles de Pinus patula muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.4 Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de Pinus patula muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>21</i>
<i>Figura 2.5 Dispersión de los valores de diámetro y biomasa total de árboles de latifoliadas muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 2.6 Relación de biomasa de componentes estructurales en árboles de Pinus patula en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.7 Valores de diámetros y biomasa total de árboles de Pinus patula muestreados en Zacualtipán, Hidalgo y a través del modelo de biomasa total y por la suma de componentes.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.8 Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de Pinus patula en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.9 Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, ramas, fuste y corteza) en árboles de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>33</i>
<i>Figura 2.10 Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.</i>	<i>34</i>
<i>Figura 2.11 Variación de la relación biomasa de fuste a biomasa total con el diámetro.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 2.12 Relación entre biomasa de fuste observada y biomasa de fuste estimada a partir del volumen y densidad básica.</i>	<i>37</i>
<i>Figura 2.13 Relación entre biomasa total observada y biomasa total estimada a partir del volumen, densidad básica y FEB.....</i>	<i>38</i>

<i>Figura 3.1 Localización del área de estudio.</i>	<i>45</i>
<i>Figura 3.2 Diseño de muestreo utilizado para el establecimiento de sitios permanentes (Modificado de CONAFOR-SEMARNAT, 2011).</i>	<i>48</i>
<i>Figura 3.3 Volumen promedio en rodales de diferentes edades en el Ejido Tzincoatlán. Las líneas verticales representan el error estándar.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 3.4 Proporción de biomasa por componente respecto a la biomasa total en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 3.5 Biomasa aérea total en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.6 Proporción de carbono aéreo almacenado por componente en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.7 Carbono aéreo total en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.</i>	<i>72</i>

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. GENERALIDADES

El CO₂ es un gas de efecto invernadero (GEI) producto de las actividades humanas que más contribuye al fenómeno del calentamiento global ya que su concentración en la atmósfera ha aumentado en torno a un 80% entre 1970 y 2004 (Ordóñez y Masera, 2001; Díaz *et al.*, 2007; IPCC, 2008). En 2012 la concentración había alcanzado 292.52 (±0.10) ppm (Le Quéré *et al.*, 2013). Una estrategia de mitigación del incremento de CO₂ lo constituyen los bosques, por su potencial de acumulación y almacenamiento de carbono (Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009).

1.2. Ecosistemas forestales como sumideros de carbono

Entre el 27 y 30% de la superficie terrestre del planeta está cubierta por bosques, los cuales almacenan el 45% del carbono terrestre y absorben alrededor del 30% al año de todas las emisiones de CO₂ (Zambrano *et al.*, 2004; Pardos, 2010; Pan *et al.*, 2011; Vázquez, 2013). Mediante el proceso de fotosíntesis la vegetación fija CO₂ atmosférico incorporándolo a sus procesos metabólicos. Este CO₂ participa en la composición de todas las estructuras necesarias para que el árbol pueda desarrollarse (follaje, ramas, raíces y tronco); de esta forma ganan volumen e incrementan su biomasa (Díaz *et al.*, 2007; Figueroa, 2010). Durante el tiempo en que el CO₂ se encuentra constituyendo alguna estructura del árbol y antes de que sea liberado nuevamente a la atmósfera se considera almacenado (Ordóñez, 2008).

La importancia de los bosques en la captura de carbono incrementa cuando se considera el manejo de los mismos (Zambrano *et al.*, 2004). El manejo forestal puede compensar las crecientes emisiones de CO₂ en dos formas: incrementando las reservas de CO₂ al aumentar la masa de material maderable y mediante la protección de bosques y suelos naturales que almacenan carbono (Pimienta *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2009) evitando emisiones. Un reconocimiento de la importancia de

los bosques como sumideros de carbono es la iniciativa REDD+ (Reducción de las emisiones derivadas de la deforestación, la degradación forestal, la conservación de las reservas forestales de carbono, el manejo forestal sostenible y el mejoramiento de los almacenes de carbono) (CONAFOR, 2010). Sin embargo, el papel de los mismos ha sido muy discutido; los procesos de reforestación y forestación han sido más abordados dejando a un lado las actividades relacionadas con el manejo forestal (Álvarez, 2009). Por otro lado, se ha demostrado que si se manejan de manera sostenible los bosques en México, se puede llegar a triplicar la cantidad de carbono almacenado respecto a las medidas de mitigación energéticas apoyadas por las Naciones Unidas (Sheinbaum y Masera, 2000). Por ello es necesario realizar estudios sobre biomasa y carbono en bosques manejados y evaluar su contribución en el ciclo del carbono (Álvarez y Rubio, 2013).

1.3. Partición de Biomasa

El primer paso para evaluar la productividad de los ecosistemas y la contribución de los bosques en el ciclo global del carbono es el cálculo de la biomasa (Parresol, 1999; Ketterings *et al.*, 2001; Castañeda *et al.*, 2005). En este sentido, la biomasa representa la cantidad de material acumulado en las plantas (en determinado periodo de tiempo por unidad de área) en la parte aérea y subterránea del ecosistema (Castellanos, 1993; Figueroa, 2010). La biomasa aérea es la materia total almacenada en el fuste o tallo principal, las ramas vivas y muertas, el follaje, la corteza, las estructuras reproductivas, generalmente expresadas en términos de peso seco (Návar, 2009b). La biomasa varía en cada componente como una respuesta a diversos factores como la edad, el sitio, las especies, las condiciones climáticas, el tratamiento silvícola, la pendiente, la altura sobre el nivel del mar, la exposición, la densidad del rodal, la variación genética y el año en que se realiza el muestreo (Cruz, 2007b; Avendaño *et al.*, 2009; Rodríguez *et al.*, 2012).

Para la estimación de biomasa y carbono almacenado en ecosistemas forestales se han desarrollado métodos directos e indirectos. Los primeros consisten en un análisis destructivo para estimar el peso verde y el peso seco de cada uno de los

componentes de los árboles seleccionados. Los segundos se basan en la utilización de modelos matemáticos que estiman el peso de las diferentes fracciones del árbol a partir de variables individuales (Cruz, 2007b); sin embargo, estos métodos también se basan en métodos destructivos para la determinación de la biomasa a nivel individuo. Con los datos que se obtienen se desarrollan ecuaciones de regresión que permiten relacionar la biomasa con variables de fácil acceso como lo es el diámetro y la altura (Castellanos, 1996, Figueroa *et al.*, 2005; Figueroa *et al.*, 2010).

1.4. Relaciones alométricas

Los ejemplos más comunes de los métodos indirectos son las ecuaciones alométricas (Návar *et al.*, 2002; Cruz, 2007b). La importancia de generar ecuaciones de biomasa es que permiten evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, determinar la cantidad de carbono fijado, la tasa de fijación de CO₂, y con ello valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero (Méndez *et al.*, 2011; Lim *et al.*, 2013). Los modelos alométricos de biomasa para árboles individuales son típicamente específicos para las condiciones de sitio, manejo y especie (Rodríguez *et al.*, 2011). En México el uso de ecuaciones alométricas para estimar la biomasa es restringido debido a la escasa disponibilidad de ellas, a pesar de la necesidad de estimar la biomasa en masas forestales, árboles individuales y componentes estructurales del árbol (ramas, hojas, fuste y raíces) para la estimación de carbono (Cruz, 2007b; Pimienta *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009).

1.5. Estrategia de Inventario

Las evaluaciones para conocer con precisión la cantidad de volumen o biomasa y por tanto carbono en un rodal, así como su distribución espacial son indispensables para la correcta planeación y manejo de los predios. Esto es posible mediante la ejecución de un inventario forestal que para efectos de manejo operativo debe ser específico. Cuando la inferencia sobre la población se hace a partir de una muestra adecuada y con el apoyo de principios de muestreo se obtienen estimadores confiables y científicamente defendibles (Schreuder *et al.*, 2004). Sin embargo, en la

cuantificación de biomasa es necesario contar con una estrategia de muestreo que combine el procedimiento para seleccionar la muestra con el de estimación de los parámetros de la población (Gregoire y Valentine, 2008). La estrategia se considera eficiente cuando se alcanza un balance entre los recursos financieros disponibles y la precisión requerida sin perder confiabilidad y precisión estadística (Tamarit, 2013).

1.6. Antecedentes de cuantificación de biomasa en la región de Zacualtipán, Hidalgo

En la región de Zacualtipán, Hidalgo se tienen antecedentes sobre la estimación de biomasa y C aéreo en bosques manejados de *Pinus patula*, especie de importancia comercial y ambiental tanto en la región como a nivel nacional (Rodríguez *et al.*, 2011). Para estimar biomasa total, Figueroa *et al.* (2010) ajustaron un modelo con base en diámetro y altura; mientras que Aguirre *et al.* (2009) estimaron biomasa y carbono mediante percepción remota, mientras que Vásquez (2011) aplicó el modelo CBM-CFS3 para realizar la contabilidad de carbono en el sistema. En latifoliadas destaca el trabajo de Cruz (2007b). No obstante, una de las principales limitantes en las ecuaciones utilizadas en *Pinus patula*, es la sobreestimación de biomasa aérea en árboles con diámetros normales (dn) mayores a 50 cm, en virtud de que para el ajuste de las ecuaciones de biomasa no se consideraron individuos con estas dimensiones. Por lo que incrementar el intervalo de diámetros de árboles en el ajuste de ecuaciones de biomasa permitirá corregirlas; y tener mejores estimaciones de la capacidad para fijar y almacenar C. La mejora en las ecuaciones contribuirá a evaluar la incertidumbre de los métodos de cálculo más complejas.

1.7. OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General

Estimar el potencial de almacenamiento de carbono en bosques bajo manejo y de diferentes edades en la región forestal de Zacualtipán, Hidalgo.

1.7.2 Objetivos Particulares

- Generar una función de volumen para *Pinus patula*.
- Generar ecuaciones de biomasa por componente estructural para *Pinus patula* y latifoliadas.
- Obtener un factor de expansión de biomasa para *Pinus patula*.
- Estimar el contenido de carbono en rodales bajo manejo de diferentes edades en el Ejido Tzincoatlán.

CAPÍTULO II

ECUACIONES ALOMÉTRICAS PARA LA ESTIMACIÓN DE BIOMASA POR COMPONENTE ESTRUCTURAL EN LA REGIÓN DE ZACUALTIPÁN, HIDALGO, MÉXICO

2.1. RESUMEN

La estimación de biomasa en los bosques juega un papel clave en el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de carbono (C) forestal. Los modelos alométricos basados en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas de la biomasa. En México se tienen antecedentes sobre la estimación de biomasa y C, sin embargo una de las principales limitantes en las ecuaciones utilizadas, es la sobreestimación de biomasa en árboles de dimensiones grandes (diámetros mayores a 50 cm) debido a que estos no fueron considerados en el ajuste de las ecuaciones. Incrementar el intervalo de diámetros de árboles en el ajuste de ecuaciones de biomasa permitirá corregirlas; y tener mejores estimaciones de la capacidad de los bosques para fijar y almacenar C. Se obtuvieron modelos de predicción de biomasa por componente estructural (fuste, ramas, follaje y corteza) para *P. patula* y para especies de latifoliadas de importancia ecológica en el bosque mesófilo de montaña en Zacualtipán, Hidalgo; mediante muestreo destructivo. Se generó una función de volumen y un factor de expansión de biomasa (FEB) para *P. patula*. Los modelos de biomasa son de la forma $B = Exp(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$ donde B es la biomasa por árbol (kg), dn es el diámetro normal (cm), y h es la altura total (m). La inclusión de altura mejoró sustancialmente la precisión de los modelos. Los resultados muestran un adecuado ajuste de ecuaciones simultáneas por regresión no lineal de los componentes estructurales del árbol donde la suma de componentes es la biomasa total. Los estimadores estadísticos permiten afirmar que las ecuaciones determinadas son adecuadas y confiables para usarse en condiciones similares para estimar los valores de biomasa para *P. patula* y las especies de latifoliadas estudiadas.

Palabras clave: *Pinus patula*, componentes estructurales del árbol, ecuaciones alométricas, factor de expansión de biomasa, bosque manejado, bosque mesófilo de montaña.

2.1. ABSTRACT

Estimating forest biomass plays a key role in sustainable forest management and in determining forest carbon (C) stocks. The allometric models based on destructive sampling provided accurate estimates of biomass. In Mexico there are studies about estimation of forest biomass and C, however one of the main constraints in the used equations is the biomass overestimation in trees with diameters at breast height (dbh) larger than 50 cm, since larger individuals were not included in the fitting process. Increasing the range of tree diameters in the biomass fitting process will correct the equations, and contribute to the overall goal of improving carbon estimates. Allometric equations for aboveground tree biomass components (stem wood, stem bark, branch and foliage) were derived for *P. patula* and for hardwood species of ecological importance in the mountain cloud forest at Zacualtipán, Hidalgo, by destructive sampling. A function of volume and biomass expansion factor (BEF) for *P. patula* was generated. Biomass models are of form $B = Exp(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$ where B is the total tree biomass (kg), dn is the diameter at breast height (cm), and h is the total height (m). The inclusion of height substantially improved model precision. The results showed an appropriate adjustment of simultaneous equations by non-linear regression of the tree biomass components where the sum of components is the total biomass. Statistical estimates can anticipate that these equations are suitable and reliable to use in similar conditions to estimate the values of biomass for *P. patula* and studied broadleaved species.

Keywords: *Pinus patula*, tree structural components, allometric equations, biomass expansion factor, managed forest, mountain cloud forest.

2.2. INTRODUCCIÓN

Los bosques son reservorios de carbono que absorben aproximadamente el 30% de todas las emisiones de CO₂ en un año (Pan *et al.*, 2011; Vázquez, 2013), contienen más carbono por unidad de superficie que cualquier otro uso del suelo, y son de importancia primaria cuando se considera el manejo de los mismos (Zambrano *et al.*, 2004). Los bosques manejados fijan CO₂ en altas cantidades convirtiéndolo en biomasa y almacenándolo en sus tejidos vegetales, en función de la edad del rodal, la calidad de sitio, la composición de especies, la densidad, las condiciones climáticas, edáficas y topográficas, el tratamiento silvícola, la variación genética y el año en que se realiza el muestreo (Acosta *et al.*, 2002; Návar *et al.*, 2005; Cruz, 2007b; Avendaño *et al.*, 2009). No obstante aún se requiere investigación específica al respecto

Los principales componentes de almacenamiento de carbono del bosque son el suelo y la biomasa aérea (Ordóñez y Masera, 2001). La biomasa aérea es la materia total distribuida en el fuste, ramas, follaje, corteza y estructuras reproductivas (Návar, 2010b). Estimar la cantidad de biomasa aérea en un ecosistema implica un análisis destructivo directo o estimaciones indirectas (Cruz, 2007b; Domínguez *et al.*, 2009). Los modelos alométricos constituyen un método indirecto práctico cuando se desea estimar la biomasa aérea de los árboles (Acosta *et al.*, 2002; Figueroa *et al.*, 2010). Estas funciones son desarrolladas para una población de árboles mediante la estimación de parámetros de una ecuación que relaciona la biomasa con variables medidas usando técnicas de regresión a través de la cosecha y pesado de una muestra (Somogyi *et al.*, 2006; Návar, 2010b; Birdsey *et al.*, 2013). Otro método indirecto es la aplicación de factores de expansión de biomasa (FEB) (Losi *et al.*, 2003; Návar *et al.*, 2005; Alba *et al.*, 2007; Domínguez *et al.*, 2009; Návar, 2010a; Silva y Návar, 2011).

Los modelos alométricos han sido una valiosa herramienta para predecir la biomasa y carbono de diversas especies de árboles (Návar, 2010b). Estas relaciones se han generado en bosques templados para estimar la biomasa aérea total de una especie

(Aguirre y Jiménez, 2011; Díaz *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2007), de un grupo de especies (Acosta *et al.*, 2002; Cruz, 2007b), o la distribución de biomasa y/o carbono en los componentes del árbol (Parresol, 2001; Bi *et al.*, 2004; Figueroa *et al.*, 2010, Ruiz *et al.*, 2011). En el ajuste de ecuaciones para estimar biomasa y carbono aéreo frecuentemente se ignora la altura (Acosta *et al.*, 2001; Acosta *et al.*, 2002; Díaz *et al.*, 2007; Aguirre y Jiménez, 2011); aunque existen algunos trabajos donde se ha incluido esta variable (Návar *et al.*, 2005; Cruz, 2007b; Figueroa *et al.*, 2010; Ruíz, *et al.*, 2011). En este sentido Feldpausch *et al.* (2012) reportaron que no incluir altura puede propiciar una sobrestimación del 13% y aumentar los errores promedios relativos hasta en un 50%. La importancia de generar ecuaciones de biomasa radica principalmente en que permiten determinar la cantidad de carbono fijado, evaluar la estructura y condición de un bosque, cuantificar su productividad, valorar el impacto en la mitigación de gases efecto invernadero y generar esquemas de manejo forestal adecuados (Aguirre *et al.*, 2009; Méndez *et al.*, 2011).

En la región de Zacualtipán, Hidalgo se tienen antecedentes sobre la estimación de biomasa y C aéreo en bosques manejados de *Pinus patula*, especie de alta importancia comercial (Rodríguez *et al.*, 2011). Cruz (2007b) y Figueroa *et al.* (2010) generaron modelos para predecir biomasa total con base en diámetro y altura; por su parte Aguirre *et al.* (2009) estimaron biomasa y carbono mediante percepción remota y Vásquez (2011) aplicó el modelo CBM-CFS3 para realizar la contabilidad de carbono. No obstante, una de las principales limitantes en las ecuaciones utilizadas, es la sobreestimación de biomasa en árboles con diámetros (dn) mayores a 50 cm, debido a que para el ajuste de las ecuaciones de biomasa no se consideraron individuos con estas dimensiones. Por esta razón, los objetivos del presente trabajo fueron obtener una función de volumen para *Pinus patula*; obtener modelos de estimación de biomasa por componente estructural en *P. patula* y algunas especies de latifoliadas a través de la inclusión de árboles de diámetros mayores a 50 cm y obtener un factor de expansión de biomasa para *P. patula*.

El área colinda al Norte con la carretera a Tlahuelompa, el Ejido El Reparó y Tzincoatlán, al Sur con el municipio de Mezquititlán, al Este con el Ejido Santo Domingo, y al Oeste con los predios Tlatoxca, San Miguel Ferrería y Tlachique. Se caracteriza por una topografía accidentada con pequeñas mesetas en las partes altas y relieve semiplano con cerros y llanos en una altitud promedio de 2050 m y pendientes de 0 a 25%. Se ubica en la subprovincia Carso Huasteco, de la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2001a; Santiago, 2009; Vásquez, 2011). Presenta suelos profundos, con alto contenido de materia orgánica y nutrientes en la porción norte del área. Caso contrario en la parte sur, el suelo es delgado y pedregoso. Los suelos predominantes son de tipo Luvisol crómico (Lc) y Feozem háplico (Hh) (INEGI, 2001b; Hernández, 2012).

De acuerdo a la Clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), el clima es C(fm) templado húmedo en la parte norte del área y (Cw2) templado subhúmedo con lluvias la mayor parte del año hacia al sur, con temperatura media anual entre 12 y 18°C y la precipitación anual oscila entre 700 y 2050 mm (INEGI, 2001c; Avilés, 2005; Cruz *et al.*, 2010). El área se caracteriza por la presencia de humedad la mayor parte del año (Figuroa *et al.*, 2010; Hernández *et al.*, 2013).

El manejo forestal en el área de estudio se ha enfocado en las últimas décadas ha cultivar *Pinus patula* mediante el “Método de Desarrollo Silvícola” propiciando rodales monoespecíficos, coetáneos, de cobertura y edades variables que van desde 0 hasta 27 años (Aguirre, 2007; Santiago, 2009; Hernández *et al.*, 2013; Santiago *et al.*, 2013). En las áreas intervenidas también se encuentra especies como *Pinus teocote*, *Prunus serotina* y diversas especies del género *Quercus*.

El bosque natural corresponde a bosque mesófilo de montaña, que exhibe la asociación vegetal de pino-encino. Las especies presentes son *Pinus patula*, *P. teocote*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Q. excelsa*, *Q. crassifolia*, *Q. affinis*, *Cornus disciflora*, *Viburnum spp.*, *Cleyera theaoides*, *Alnus jorullensis*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina*, *Symplocos spp.*, *Ternstroemia spp.*, *Vaccinium leucanthum*, principalmente (Ángeles, 1995; Figuroa *et al.*, 2010).

2.3.2. Muestreo de árboles para estimación de biomasa y volumen

El método utilizado para determinar el volumen y la biomasa fue a través de un muestreo destructivo para la generación de ecuaciones alométricas para volumen total en *Pinus patula* y para biomasa por componente estructural en *P. patula* y latifoliadas. Esta relación es basada en mediciones detalladas en una muestra representativa de la población de interés para luego extrapolarla a una muestra más amplia (Birdsey *et al.*, 2013). El muestreo consistió en 25 árboles de *Pinus patula* y 46 árboles de latifoliadas de los cuales, 15 corresponden a *Liquidambar macrophylla*, 14 a *Quercus* spp., 6 a *Alnus jorullensis* y las 11 restantes corresponden a *Clethra mexicana*, *Prunus serotina*, *Carpinus caroliniana* y *Viburnum ciliatum*. Los datos de latifoliadas fueron obtenidos de Cruz (2007b). La metodología empleada fue similar a la aplicada por Díaz *et al.* (2007), Figueroa *et al.* (2010) y descrita por Schlegel *et al.* (2000) y Návar (2010b). El tamaño de muestra es similar al empleado en trabajos previos para generar ecuaciones de biomasa con ajustes adecuados (Pacheco *et al.*, 2007; Díaz *et al.*, 2007; Avendaño *et al.*, 2009).

La selección de arbolado de *Pinus patula* para complementar los datos de Figueroa *et al.* (2013) fue en los rodales donde se realizó la corta de regeneración del año 2013. Se eligieron árboles con diámetros desde 2.6 a 73 cm en *Pinus patula* y de 1 a 45 cm en latifoliadas con base en la técnica de Torres y Magaña (2001) que indica que para mejorar el intervalo de los modelos es necesario captar toda la variabilidad de tamaños y formas posibles del arbolado en una región determinada (Hernández *et al.*, 2013).

Se midió el diámetro normal en centímetros de todos los árboles en pie con ayuda de una cinta diamétrica y posteriormente fueron derribados. Una vez derribado, se midió la altura total (longitud) en m, diámetro con corteza a diferentes alturas del fuste (aproximadamente a 1 m) en centímetros, y alturas para cada sección con respecto al suelo, en metros. Posteriormente el fuste fue seccionado en trozas de dimensiones comerciales que variaron de 1.27 a 2.55 m. La copa del árbol fue seccionada en tres partes iguales con la finalidad de facilitar la separación de componentes. La

separación de componentes estructurales ramas y follaje se realizó por sección de la copa y por troza en el fuste.

Se obtuvo el peso fresco en campo de cada componente estructural en una báscula con plataforma marca Token con capacidad de 1,000 kg y una precisión de 1 kg. Una vez pesados los componentes estructurales se obtuvieron muestras de cada uno. Para el componente de ramas se obtuvieron tres muestras de ramas y tres muestras de ramillas por cada sección de la copa, resultando 9 muestras de ramas y 9 de ramillas por árbol. De forma similar, se colectaron 3 muestras de follaje por cada sección de la copa (9 por árbol). Para el componente de fuste, se obtuvieron de tres a cuatro rodajas de 5 cm de grosor por árbol, una rodaja de la primera troza (parte inferior del fuste), una de la troza media y una o dos en las últimas trozas. Se removió la corteza de las rodajas y se obtuvo el peso fresco de las rodajas y de la corteza. Todas las muestras fueron pesadas en campo con una báscula electrónica marca Labtron C modelo ES 8000 H con capacidad de 8000 g y precisión de 0.1 g con la finalidad de obtener mayor precisión al evitar pérdida de humedad (Díaz *et al.*, 2007).

Las muestras se trasladaron al laboratorio para su secado hasta obtener peso constante en una estufa de circulación forzada a 70°C y su peso fue registrado nuevamente con precisión de 0.1 g. Con el peso húmedo y el peso seco de las muestras se obtuvo el contenido de humedad y el factor de la relación peso seco: peso fresco de la muestra tomada de cada componente (fuste, corteza, ramas, ramillas y follaje) del árbol.

2.3.3. Cubicación de árboles muestra de *Pinus patula*

Dado que el fuste fue seccionado en varios segmentos, se realizó una cubicación por troza, las cuales se asemejan a un cilindro. El supuesto de cubicación es que mientras menor sea la longitud de la troza, mejor será su aproximación y mayor su precisión de volumen, considerando que la forma de las trozas no permanece constante en toda su longitud (Romanh, 1994; Torres y Magaña, 2001).

El método utilizado fue el de trozas traslapadas propuesto por Bailey (1995), que utiliza la fórmula de Newton generalizada en cada par de trozas. El volumen de todas las trozas seccionadas se obtiene con el sistema de trozas sobrepuestas hasta obtener el volumen total del fuste completo. Este método aumenta la precisión y disminuye el error del cálculo (Cruz *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013).

2.3.4. Estimación de biomasa por componente estructural y total

La biomasa de cada componente se obtuvo multiplicando el peso fresco por el factor resultante del peso seco:peso fresco (Díaz, 2007; Lim *et al.*, 2013). La biomasa de ramas fue la suma de ramas y ramillas. La biomasa aérea total de cada árbol fue el resultado de la suma de la biomasa de los componentes estructurales (fuste, corteza, ramas y follaje) (Acosta *et al.*, 2002; Lim *et al.*, 2013) (Figura 2.2).

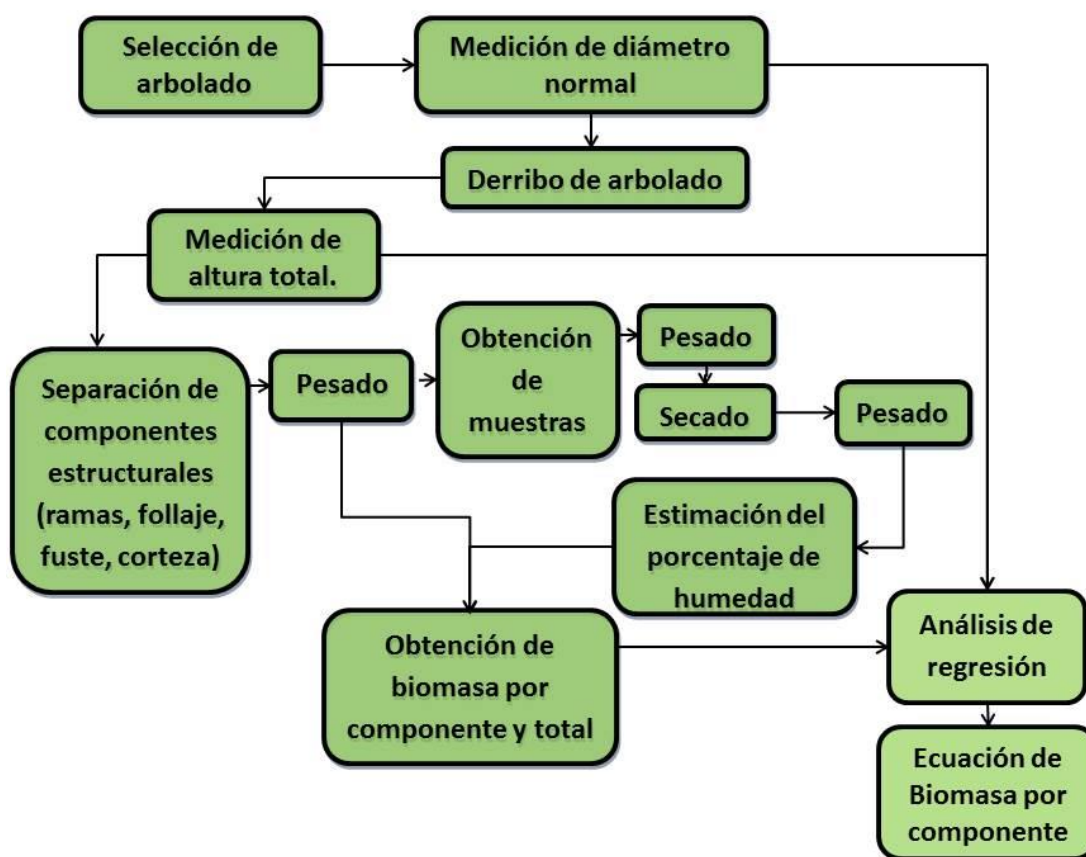


Figura 2.2. Diagrama de la metodología seguida para determinación de biomasa mediante el muestreo destructivo de árboles de *Pinus patula* y *latifoliadas*.

2.3.5. Análisis estadístico

Una vez determinado el volumen por troza, se ajustó un sistema compatible de ahusamiento-volumen, completando la información obtenida con los datos de Hernández *et al.* (2013). El ahusamiento se basa en el supuesto de que la forma del árbol varía a lo largo de su longitud, y el diámetro sobre el fuste es monótonicamente decreciente a medida que la distancia del tocón a la altura comercial se aproxima a la altura total del árbol (Lee *et al.*, 2003).

El ahusamiento es el coeficiente de estrechamiento del diámetro a lo largo del fuste, por lo tanto, es posible estimar directamente mediante una ecuación el diámetro a cualquier altura y la altura a cualquier diámetro (Clutter *et al.*, 1983; Torres *et al.*, 1993; Cruz *et al.*, 2008). Una vez definida la ecuación de ahusamiento, mediante su integración matemática, es factible obtener estimaciones del volumen total o parcial del fuste a cualquier límite de longitud o diámetro mínimo deseado (Lynch *et al.*, 1992) o ajustar modelos de volumen directamente (Cruz *et al.*, 2008).

Con la biomasa total por componente estructural de cada individuo, se ajustaron modelos matemáticos que relacionan la biomasa con el diámetro normal y altura medidas en campo. Se partió del sistema básico que la biomasa es función del diámetro y la altura (Cruz, 2007b; Figueroa, 2010). La importancia de incluir altura es la disminución de errores promedios relativos hasta en un 50% y evitar sobrestimaciones hasta del 13% (Feldpausch *et al.*, 2012). A pesar de las distintas ecuaciones válidas para modelar el volumen y la biomasa, todas derivan de formas matemáticas lineales y no lineales (Parresol, 1999), las no lineales nos da un mejor punto de comparación entre los valores de los estadísticos que un modelo con las variables transformadas (Reyes, 2006).

2.3.6. Ajuste de modelo para volumen en *Pinus patula*

La compatibilidad entre funciones de volumen y ahusamiento permitió realizar un ajuste mediante un sistema de ecuaciones simultáneas con base en la metodología

empleada por Hernández *et al.* (2013). Si dos ecuaciones son compatibles implica que están relacionadas y, por tanto, los componentes del error están correlacionados de tal forma el ajuste se realizó con la técnica de máxima verosimilitud con información completa (FIML, respectivamente por sus siglas en inglés) donde los estimadores de los parámetros son consistentes, ya que se ajustan de forma simultánea el ahusamiento y volumen acumulado, lo cual representa una ventaja y es apropiada para el ajuste simultáneo (Fang *et al.*, 2000; Cruz, 2007a; Cruz *et al.*, 2008).

El modelo ajustado es el segmentado de Fang *et al.* (2000), el cual fue seleccionado por mejor ajuste con base en un análisis numérico y de gráficos de los residuales por Hernández *et al.* (2013), resultados congruentes con los obtenidos por Tamarit (2013).

2.3.7. Ajuste de modelos para biomasa por componente estructural y total de árboles de *Pinus patula* y latifoliadas

Se analizaron varios modelos lineales y no lineales encontrados en la literatura para relacionar la biomasa de los componentes del árbol con sus dimensiones de diámetro normal y altura total como variables independientes (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Modelos de biomasa analizados para los componentes estructurales de *Pinus patula* y latifoliadas.

Modelos evaluados
$B = \beta_0 + \beta_1 * dn * h$
$B = \beta_0 + \beta_1 * dn^2 * h$
$B = \beta_0 * dn^{\beta_1} * h^{\beta_2}$
$B = \beta_0 * (dn^2 * h)^{\beta_1}$
$B = Exp(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$

Donde B es la biomasa del componente estructural del árbol en kg, dn es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m) y β_0, β_1 y β_2 fueron los parámetros estimados.

El mejor modelo seleccionado fue ajustado a través de un sistema de ecuaciones simultáneas para la biomasa por componente estructural, considerando que los componentes estructurales de un mismo árbol presentan una correlación identificable entre ellos (Cruz, 2007a). La técnica aplicada para el ajuste fue por regresión conjunta generalizada conocida como SUR (regresiones aparentemente no relacionadas) donde se involucran de forma conjunta todos los errores y permite estimadores consistentes de los componentes de los sistemas no lineales (Parresol, 2001; Bi *et al.*, 2004; Cruz, 2007a; Cruz *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2013).

Este método tiene en cuenta la correlación de los errores de la matriz de la ecuación con el fin de asegurar que la biomasa total sea la suma de los totales de biomasa aérea de los componentes (propiedad de aditividad). El empleo de esta técnica garantiza que la biomasa aérea total será la suma de las estimaciones de componentes de los árboles (Ruiz *et al.*, 2011).

El ajuste de los modelos se realizó mediante el procedimiento MODEL en el software SAS (SAS Institute Inc., 2011). Los criterios para calificar la bondad de ajuste del sistema que mejor explica la variabilidad de los datos de biomasa se basan en un análisis numérico y de gráficos de los residuales. En el caso numérico se utilizaron tres estadísticos de uso frecuente en biometría: coeficiente de determinación ajustado (R^2 adj), la raíz del cuadrado medio del error (RCME) y el coeficiente de variación (CV) (Diéguez *et al.*, 2003; Corral *et al.*, 2007; Hernández *et al.*, 2013).

El motivo de dividir la biomasa del árbol en distintas fracciones es una razón práctica; tener datos individualizados para cada árbol permite conocer el destino de los productos derivados de cada fracción y su vida media aproximada. Con esta información se puede hacer el seguimiento del carbono desde que se extrae del bosque hasta que es liberado a la atmósfera nuevamente (Montero *et al.*, 2005).

La biomasa total resulta de suma de la biomasa de los componentes, sin embargo también se ajustó una ecuación para biomasa total, con la finalidad de comparar las

estimaciones por suma de componentes contra la biomasa total estimada por el modelo ajustado a partir de la biomasa total observada.

2.3.8. Factor de expansión de biomasa

La biomasa también puede ser estimada a partir de factores de expansión de biomasa, los cuales deben derivarse localmente (Salas e Infante, 2006; Návar, 2010b). Los factores de expansión son utilizados para obtener una estimación de biomasa total del árbol a partir de la biomasa del fuste (Domínguez *et al.*, 2009). Así, a partir del volumen del fuste, la densidad básica de la madera y el FEB se obtiene la biomasa total por árbol (Losi *et al.*, 2003). Para la estimación del factor de expansión en biomasa área (FEB) se utilizó la biomasa del fuste (B_f), la biomasa de ramas (B_r), la biomasa de hojas (B_h) y la biomasa de corteza (B_c); todas en kg. El cálculo del FEB se realizó con la fórmula siguiente (Domínguez *et al.*, 2009).

$$FEB = \frac{B_f + B_r + B_h + B_c}{B_f}$$

Con el propósito de comparar la biomasa de cada árbol obtenida en campo con la estimada mediante este factor de expansión de biomasa, se obtuvo la biomasa por árbol mediante la siguiente ecuación (Salas e Infante, 2006):

$$B = (V * db * FEB)$$

Donde B es la biomasa por árbol en kg, V es el volumen en m^3 , db es la densidad básica de la madera de la especie en estudio y FEB es el factor de expansión de biomasa.

La densidad básica utilizada fue de 0.4468 g cm^{-3} reportada por Goche *et al.* (2011), para esta especie en la zona de estudio.

2.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.4.1. Modelos de volumen en *Pinus patula*

El diámetro de los árboles muestreados de *Pinus patula* varió de 2.6 a 73 cm para mejorar el intervalo del modelo (Hernández *et al.*, 2013). El ajuste general de los sistemas bajo la estimación simultánea a partir de máxima verosimilitud con información completa (FIML) optimiza la predicción de los parámetros volumen y ahusamiento; además de ser significativos, minimiza los errores de manera conjunta respecto a no considerar el ahusamiento (Cuadro 2.2). En contraste, cuando se realiza el ajuste de forma independiente bajo mínimos cuadrados ordinarios (MCO), los errores estándar son más elevados. Lo anterior coincide con Fang *et al.* (2000) y Hernández (2013), quienes señalan que el ajuste con FIML homogeniza y minimiza el error estándar de los parámetros y permite la compatibilidad total del sistema de ahusamiento y volumen total.

La función de volumen obtenida es de acuerdo al modelo segmentado de Fang *et al.* (2000), expresado de la siguiente forma:

$$V = e^{\beta_0} * dn^{\beta_1} * h^{\beta_2}$$

Donde V es volumen en m^3 , dn es el diámetro normal (cm) y h es la altura total (m).

Este modelo involucra que tienen dos puntos de inflexión sobre la altura relativa del fuste. Los puntos de inflexión para el sistema ocurren a 1.43% de la altura del árbol cerca de la base, y a 84.7% de la altura relativa sobre el fuste, semejantes a los obtenidos por Hernández *et al.* (2013). Esto significa que a esas alturas relativas tiende a tener un factor de forma constante a lo largo del fuste comercial y, por tanto, a ser cilíndrico entre los puntos de inflexión estimados.

Se determinó el factor de forma con el modelo generado que aumenta en proporción directa al diámetro y la altura lo que implica que el modelo funcione mejor.

Carrillo *et al.*, (2004), para una región geográficamente cercana el área de estudio ajustó una ecuación de la forma $V = e^{-97688} x (D^2 H)^{0.9451}$ y Hernández *et al.*, (2013) ajustaron dos modelos, el de tipo Fang $V = e^{-10.96973} * d^{1.753906} * h^{1.474691}$ y uno de efectos mixtos $V = e^{-10.37} * d^{1.681} * h^{1.398}$. Estos modelos son buenos porque presentan buenos ajustes, sin embargo el primer modelo subestima el volumen estimado respecto al volumen observado en un 5.5 %. Respecto a los modelos generados por Hernández *et al.* (2013), el modelo tipo Fang subestima el volumen en un 4%, en contraste el de efectos mixtos sobreestima el volumen en un 4.6%. De tal forma que complementar los datos con arbolado grande mejoró sustancialmente el modelo.

Cuadro 2.2. Estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para volumen total de árboles individuales de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo.

Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor T	PR > ITI	R ² ajustada	Raíz MSE
Volumen sin ahusamiento						
β_0	-10.96973	0.4429	-24.77	<0.0001	0.9682	0.1941
β_1	1.753906	0.1227	14.29	<0.0001		
β_2	1.474691	0.2375	6.21	<0.0001		
Volumen con ahusamiento						
β_0	-10.4869	0.0405	-24.77	<0.0001	0.9682	0.1941
β_1	1.7525	0.0128	14.29	<0.0001		
β_2	1.31936	0.0238	6.21	<0.0001		

2.4.2. Estimación de la biomasa de árboles individuales

La biomasa total por árbol fue de 1.35 kg en una edad de 3 años hasta 4,074.60 kg en una edad de 87 años (Figura 2.3). Como era de esperarse, la biomasa promedio por cada componente incrementó con la edad.

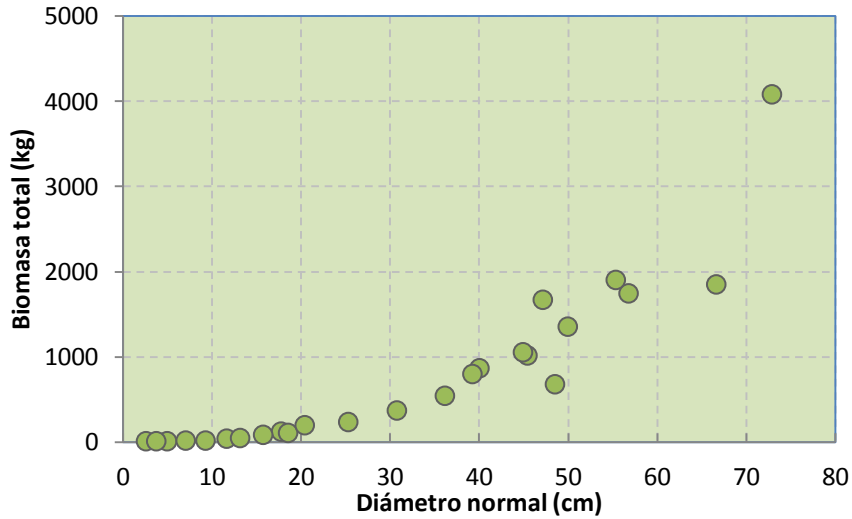


Figura 2.3. Dispersión de los valores de diámetros y biomasa total de árboles de *Pinus patula* muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.

La proporción de biomasa de los componentes estructurales respecto al total varió en función del tamaño del árbol y la edad. A medida que aumenta el diámetro y la altura del árbol, la partición de la biomasa en el fuste y corteza aumentó, en contraste la proporción de biomasa en follaje y ramas disminuyó con el incremento del diámetro (Figura 2.4), este comportamiento es similar al relacionarlo con la edad.

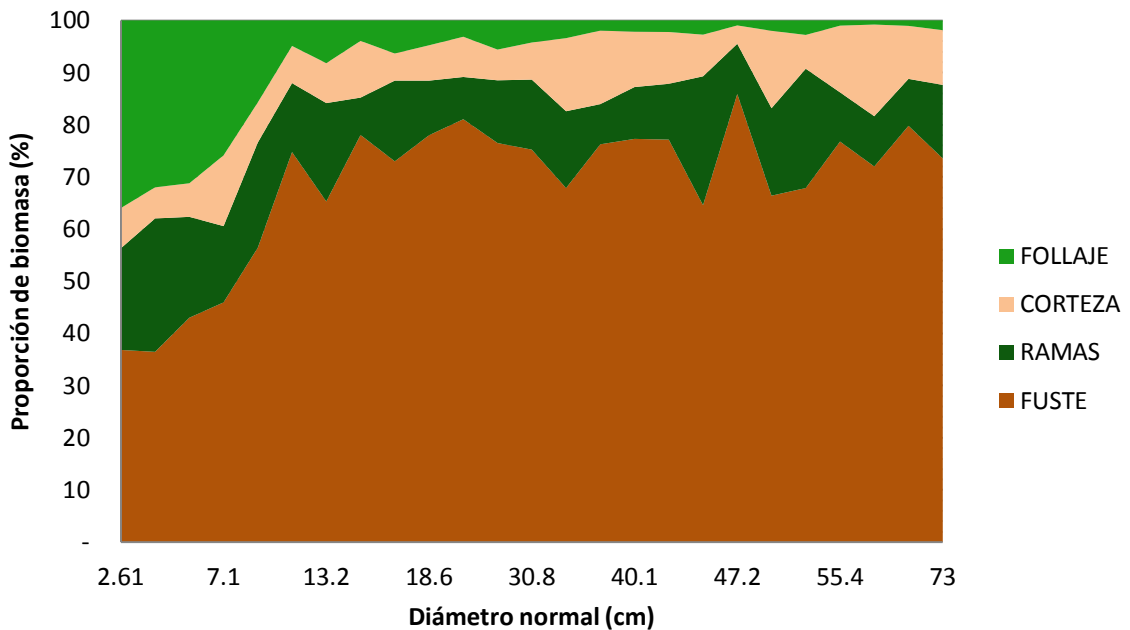


Figura 2.4. Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de *Pinus patula* muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.

En general, la mayor proporción de biomasa en los árboles muestreados se concentró en el fuste, proporción que difiere de 37% en árboles con diámetros menores a 4 cm; y aumenta en proporción con el aumento del diámetro con un promedio máximo cercano a 73%. En promedio el fuste contiene 68.2% de la biomasa total, esta proporción es similar a la estimada por Cruz (2007b) y Figueroa *et al.* (2010) para la misma especie y para *Pinus teocote* en la región, quienes reportan 66 y 78% respectivamente. Las pequeñas diferencias entre estos porcentajes pueden ser atribuibles al intervalo de árboles muestreados por los autores. El segundo componente con mayor proporción de biomasa fueron las ramas, componente que representa una proporción de 14.3%, seguido de la corteza con 9.3%. Cifras similares a las reportadas para la región de 10 a 18% en ramas y 12% en corteza (Figueroa *et al.*, 2010; y Cruz, 2007b). Estas proporciones se mantienen más o menos constantes respecto al tamaño del diámetro.

La biomasa en follaje representa en promedio 8.2% de la biomasa total. Tuvo una variación entre 1 y 36% de la biomasa total, con un comportamiento decreciente en relación el tamaño del árbol. En árboles con dimensiones menores (<4 cm de diámetro y <5 años de edad) el follaje constituye una mayor proporción, con un 32% y disminuye conforme aumenta el tamaño y la edad del árbol hasta 1% en árboles mayores a 50 cm de diámetro. Donde se destina mayor proporción de biomasa al fuste.

Los resultados son similares a otros estudios en especies de coníferas, con el aumento de las dimensiones e incluso de la edad del árbol, las proporciones de biomasa en el fuste y corteza incrementan, mientras que la proporción en follaje y ramas disminuyen (Lim *et al.*, 2013). Para *Pinus sylvestris* L. se indica que la biomasa de fuste con respecto a la biomasa total aumentó de 66 a 83% en árboles de más de 100 años (Helmisaari *et al.*, 2002). Peichl y Arain (2007) reportaron un aumento en la proporción de biomasa en fuste para *Pinus strobus* L. de 25% a los 2 años de edad a 69% a los 65 años; y una disminución de la proporción de biomasa en follaje de 34% a 1,5 % en las edades mencionadas. Este patrón de distribución

fue semejante en *Pinus rigida* Mill en Corea del Sur cuya proporción de biomasa en fuste aumentó de 52 a 69% y la proporción de biomasa en follaje disminuyó de 17 a 5% en edades de 14 a 42 años (Seo *et al.*, 2013).

Las proporciones promedio de biomasa por componente obtenidos para *Pinus patula* son similares a los reportados en la literatura. Díaz *et al.* (2007) reportaron 82 % en el fuste (incluyendo corteza), 10 % en ramas y 8 % en hojas y Castellanos *et al.*, (1996) reportaron 72.2 % en el fuste, 16.2 % en corteza, 8.6 % en ramas y en las hojas 2.8 % en follaje para un rodal natural en la región de Chignahuapan-Zacatlán, Puebla. En contraste, Rodríguez *et al.*, (2012) reportaron 92,9% en el fuste incluyendo corteza, 4,7 % en ramas y 2,4 % en follaje en una plantación de 14 años de edad quienes mencionan que la proporción de fuste incrementa con la edad. Estas diferencias pueden atribuirse a que es una plantación y a las distintas metodologías empleadas.

La proporción de biomasa entre los componentes también varía con la especie (Lim *et al.*, 2013). Por ejemplo, para *Pinus durangensis* y *Pinus cooperi*, Návar *et al.* (2001) estimaron que el fuste contiene 64 y 67% de la biomasa total del árbol en cada caso, la madera de ramas 22.5 y 22.4 % y el follaje 13.5 y 10.6%, respectivamente. Avendaño *et al.* (2009), mencionan que en los árboles de oyamel 81.3 % de la biomasa se acumula en el fustes, 6.9% en ramas y 8.6 % en follaje.

Gayoso (2002) y Gorte (2009) indican que la proporción de biomasa en los componentes estructurales de un árbol se modifica en función de la edad, tamaño y patrón de crecimiento. Esto puede ser atribuido al cierre de copa donde los árboles grandes tienen un área foliar relativamente menor que los árboles pequeños debido a las limitaciones impuestas por la luz (Lim *et al.*, 2013). Diferentes condiciones del lugar como propiedades del suelo y las condiciones topográficas también pueden causar diferencias en la distribución de la biomasa (Magnani *et al.*, 2000).

Por otra parte, factores específicos tales como la humedad del suelo, nutrientes, la luz, la densidad de árboles, la topografía y las perturbaciones pueden afectar la alometría del árbol (Jenkins *et al.*, 2003; Litton *et al.*, 2003; Tatenno *et al.*, 2004). Uno de los factores específicos del sitio al que se ha prestado menos atención es el efecto de la edad del rodal en la distribución de la biomasa. Sin embargo, se sabe que la asignación de biomasa a los componentes del árbol de los cambios individuales varía a lo largo del ciclo de vida de un bosque (Helmisaari *et al.*, 2002). Esto puede alterar la relación entre las variables de árbol (por ejemplo, el diámetro del árbol o la altura) y la biomasa aérea por componente arbóreo de tal manera que podrían requerir diferentes ecuaciones alométricas de biomasa en función de la etapa de desarrollo del árbol. Por lo tanto, la aplicación de las ecuaciones alométricas sin tener la altura del árbol puede dar lugar a una considerable sobreestimación o subestimación de la biomasa por componente estructural del árbol (Peichl y Arain, 2007) y en consecuencia en la biomasa total.

Por lo tanto desarrollar modelos específicos de las especies dominantes en los bosques facilita el estudio para proyectos de investigación ecológicos y de silvicultura, como inventarios detallados de biomasa y carbono almacenado en los árboles, además para establecer la relación de la acumulación de la biomasa y su relación con las condiciones del medio (Wang, 2006; Gómez *et al.*, 2011).

2.4.3. Estimación de la biomasa de árboles individuales en latifoliadas

El diámetro de los árboles muestreados varió de 1 a 45 cm. La biomasa total por árbol varió de 0.2 a 1.449.9 kg (Figura 2.5). La mayor proporción de biomasa en los árboles de latifoliadas se concentró en el fuste con un 49.1%, sin embargo este porcentaje es menor al encontrado para árboles de *P. patula* que destinan mayor biomasa al fuste. En contraste las latifoliadas asignan mayor proporción de biomasa a ramas (38%) comparadas con *P. patula* (13%).

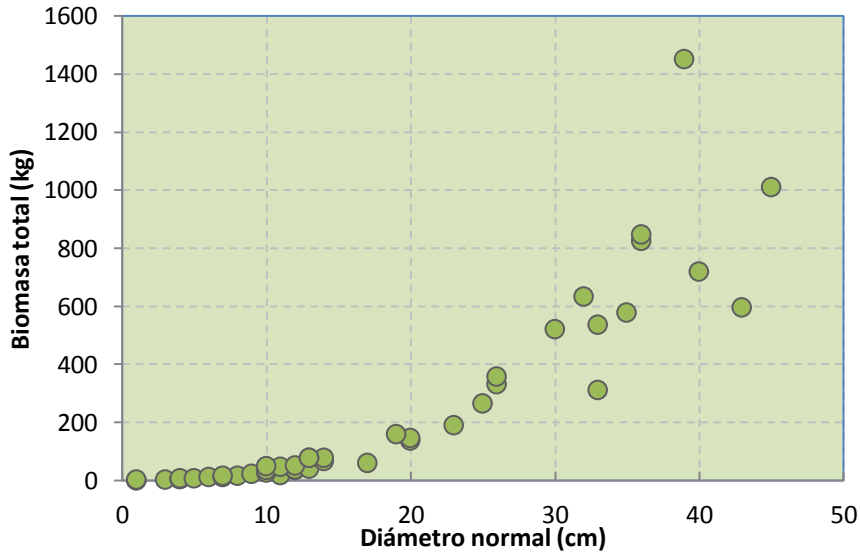


Figura 2.5. Dispersión de los valores de diámetro y biomasa total de árboles de latifoliadas muestreados en Zacualtipán, Hidalgo.

Respecto al follaje las latifoliadas presentan una menor distribución que en pino, 4.1% contra 8.2%, respectivamente. Aunque en este caso la proporción de hojas entre las especies no difiere grandemente, se han observado diferencias entre especies y dentro de la misma especie (Wang, 2006). Por otro lado, en corteza las latifoliadas destinan menor proporción de biomasa comparada con *P. patula* (8 % contra 12 % respectivamente). Esta variación entre grupos es atribuible a las diferencias entre las funciones fisiológicas y morfológicas de los grupos definidos (Zimmermann y Brown, 1980; Cruz, 2007b).

Congruente con los resultados, varios autores han reportado que la mayor proporción de biomasa en latifoliadas se concentra en el fuste. Gayoso (2002) reportó 61.89 a 88.06 % en el fuste, 6.09 a 22.23 % en ramas, 4.62 a 16.21 % en corteza y 0.62 a 5.05 % en hojas para especies nativas de Chile. Por su parte, Monroy y Návar (2004) para *Hevea brasiliensis* encontraron una distribución de biomasa en fuste y ramas de 73.88 % y 27.09 %, respectivamente. Mientras que Gómez *et al.* (2011) reportaron proporciones promedio de los componentes para *Quercus magnoliaefolia* de 62.5 % para el fuste, 27.8 % para las ramas y 9.6 % para el follaje.

Sin embargo la variabilidad en la distribución de biomasa en los diferentes componentes del árbol es indudable. Por ejemplo, Montero *et al.* (2005) reportó para *Alnus glutinosa* L. una distribución de 75.9%, 21.4% y 2.7% en fuste, ramas y follaje, respectivamente mientras que para *Quercus ilex* L. una partición de 28.1% en fuste, 68.9% en ramas y 3% en hojas. En este último caso la mayor distribución de biomasa se destina hacia las ramas.

2.4.4. Ecuaciones de biomasa por componente estructural en *Pinus patula*

Los modelos por componente estructural para estimar biomasa que mejor ajuste presentaron fueron aquellos que incluyeron a la altura del árbol en la ecuación, ya que presentaron un coeficiente de determinación alto (R^2) y el cuadrado medio del error más bajo (Cuadro 2.3). Los resultados son consistentes con lo que Figueroa *et al.* (2010), Ruíz *et al.* (2011) demostraron previamente.

El ajuste de las ecuaciones simultáneas mediante la técnica SUR (regresiones aparentemente no relacionadas) generó estimadores consistentes y propició un mejor ajuste al considerar la variabilidad total de los cuatro componentes estructurales del árbol. Se observa un buen ajuste de los modelos con los datos observados en cada componente estructural (Figura 2.6). Cada parámetro fue significativo al nivel de confianza del 95%.

Los modelos utilizados para los componentes estructurales tienen la forma de la variable combinada escalada. El escalamiento permitió la sensibilización de los parámetros.

$$B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$$

Donde B es la biomasa por árbol (kg), dn es el diámetro normal (cm); h es la altura total (m), β_0 y β_1 son los parámetros estimados.

Cuadro 2.3. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa total de árboles individuales de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo.

Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor T	PR > ITI	Raíz MSE	R ²	R ² ajustada
Follaje							
β_0	4.750974	2.547	1.87	0.0755	9.7013	0.6337	0.6337
β_1	0.709796	0.2213	3.21	0.0041			
Ramas							
β_0	5.510841	2.0433	2.7	0.0132	67.8365	0.735	0.735
β_1	0.951067	0.1752	5.43	<.0001			
Fuste							
β_0	4.682959	1.0194	4.59	0.0001	189.6	0.9298	0.9298
β_1	1.033543	0.0871	11.86	<.0001			
Corteza							
β_0	7.441298	1.5822	4.7	0.0001	39.1507	0.8701	0.8701
β_1	1.103791	0.1349	8.18	<.0001			
Biomasa total[†]							
$\Sigma f_{total} (\beta_0 \cdot \beta_1 \dots \beta_k \cdot \beta_n)$					272.2	0.9285	0.9182
Biomasa total^{††}							
β_0	4.554805	1.065	4.28	0.0003	260	0.9285	0.9254
β_1	1.047218	0.091	11.51	<.0001			

[†] Biomasa total estimada como la suma de las estimaciones de biomasa por componente.

^{††} Biomasa total estimada a partir de la biomasa total observada.

El desarrollo de relaciones con coeficientes de determinación relativamente altos para estimar la biomasa de follaje resultó una tarea complicada en este estudio; esta situación es común al ajustar modelos para follaje, dado que la biomasa varía considerablemente dentro de la misma especie (Wang, 2006; Lim *et al.*, 2013). Sin embargo, algunos estudios que se han centraron específicamente en una clase de la misma edad, una menor variación en el intervalo de diámetros o que utilizan muestras muy grandes han obtenido mejores relaciones (Wang, 2006). Otros autores han usado más variables de la copa del árbol (diámetro, longitud y área) para mejorar los ajustes, aunque la dificultad en la medición de estas variables se incrementa (Rodríguez *et al.*, 2012).

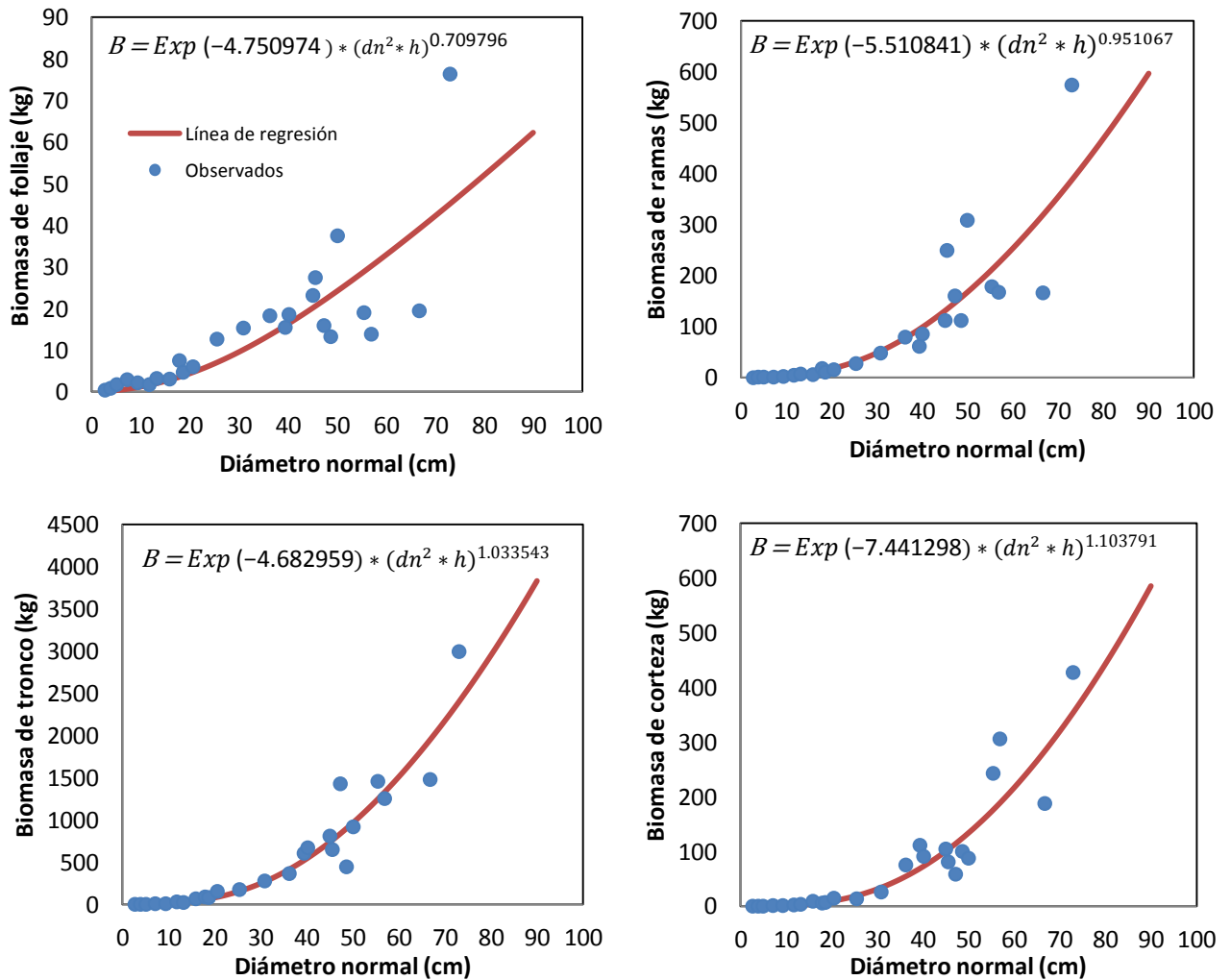


Figura 2.6. Relación de biomasa de componentes estructurales en árboles de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo.

La biomasa total resulta de suma de la biomasa de los componentes, sin embargo también se ajustó una ecuación para biomasa total, con la finalidad de comparar las estimaciones por suma de componentes contra la biomasa total estimada por el modelo. El resultado permitió observar que los valores son muy cercanos entre la biomasa total estimada y la suma de componentes ya que se encuentran en el intervalo de confianza estimado para la biomasa total por la ecuación generada (Figura 2.7).

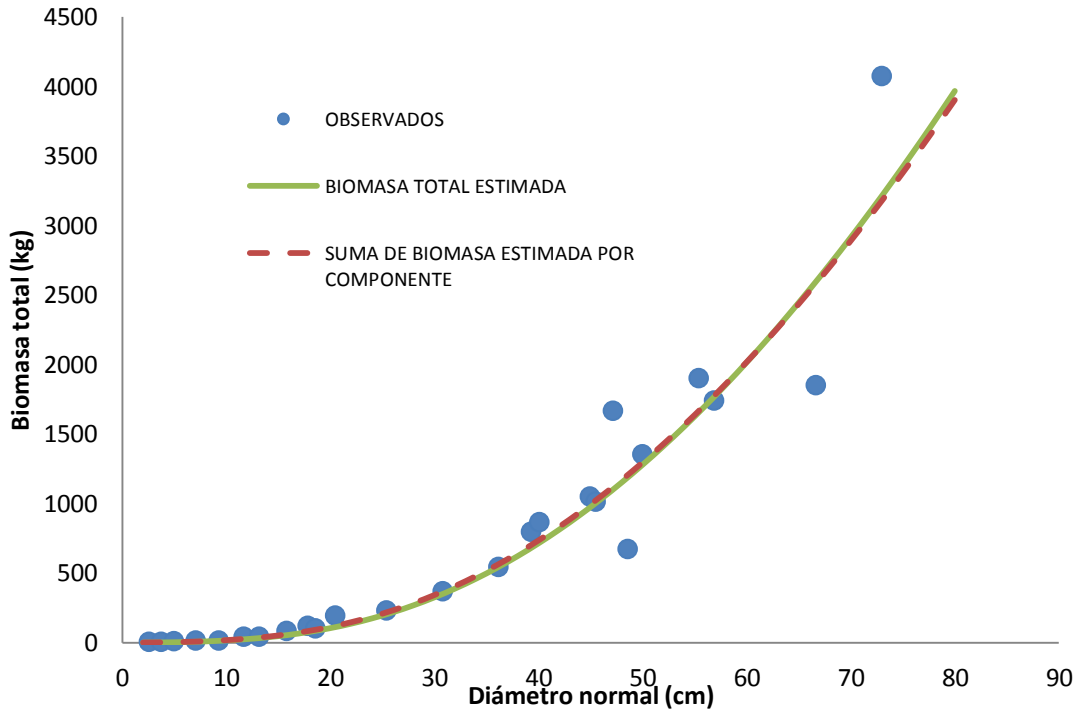


Figura 2.7. Valores de diámetros y biomasa total de árboles de *Pinus patula* muestreados en Zacualtipán, Hidalgo y a través del modelo de biomasa total y por la suma de componentes.

Un aspecto importante de estimar la biomasa mediante muestreos destructivos y generar ecuaciones es conocer su distribución en los diferentes componentes estructurales (Ruiz *et al.*, 2011). Aunque los modelos de partición de biomasa por componente son generalmente lineales que no reflejan este patrón de distribución. De tal forma que los modelos generados aquí permiten observar la variación de proporción respecto al incremento del diámetro (Figura 2.8). Este mismo modelo fue aplicado por Ruiz *et al.* (2011) en algunos componentes estructurales de varias especies de coníferas obteniendo buenas relaciones. Otros autores también han aplicado modelos no lineales y aun con bajos coeficientes de determinación han resaltado la importancia de estos modelos al permitir reflejar el comportamiento con el incremento de las dimensiones del árbol (Petrokofsky *et al.*, 2012) e incluso sugieren la necesidad de generar ecuaciones por clases de edad (Peichl y Arain 2007; Lim *et al.*, 2013; Leo *et al.*, 2013).

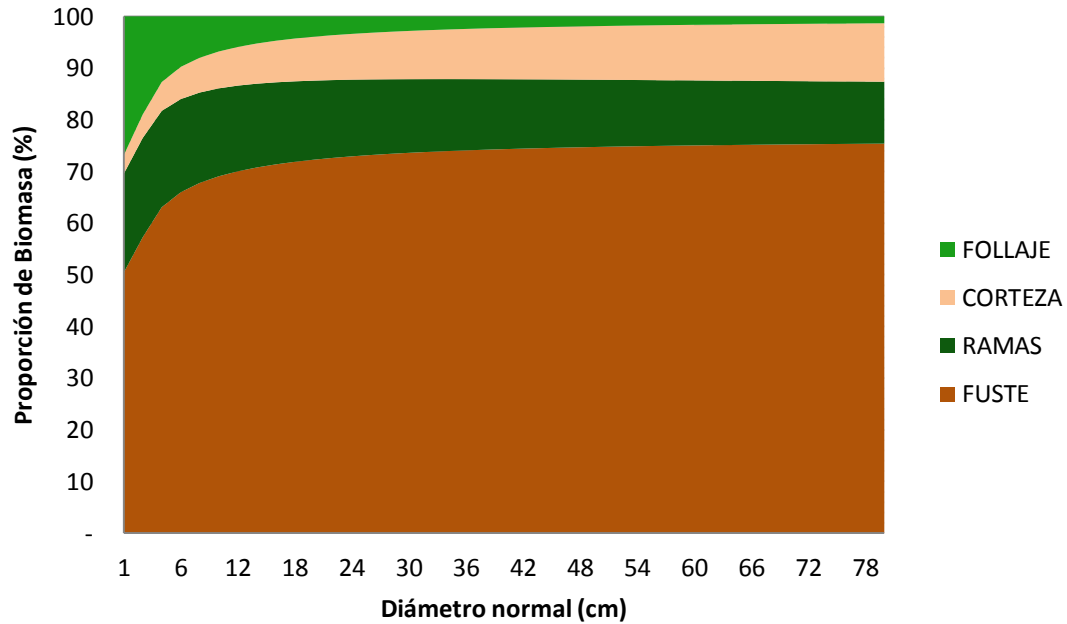


Figura 2.8. Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo.

Es evidente que con la inclusión de la altura total se mejoran las estimaciones de los modelos en los diferentes componentes. La altura y el diámetro son las variables dependientes más comunes para la evaluación de biomasa de los árboles, pero la dificultad de la medición de la altura en árboles individuales, ha propiciado que la mayoría de los modelos alométricos se basen únicamente en el diámetro del árbol (Williams y Schreuder, 2000; Feldpausch *et al.*, 2012). Aunque hay casos donde la altura es la variable independiente clave para explicar las variaciones en la biomasa (por ejemplo, en las palmas), mediciones de diámetro que se utilizan típicamente explican más de 95% de la variación en la biomasa de los árboles (Petrokofsky *et al.*, 2012). No obstante, con la inclusión de la altura en los modelos se reduce el error estándar, se evitan sobreestimaciones y se mejora el ajuste de los mismos (Figueroa *et al.*, 2010; Ruíz *et al.*, 2011; Feldpausch *et al.*, 2012; Rodríguez *et al.*, 2012).

Como consecuencia de considerar un ajuste simultáneo, la aditividad y el uso de la altura de los árboles como una variable predictora, las ecuaciones de biomasa presentados en este estudio representan una mejora considerable sobre las propuestas por Figueroa *et al.*, (2010) para *P. patula* y para latifoliadas por Cruz

(2007b) para las especies estudiadas. Las ecuaciones de latifoliadas fueron modelados con los mismos datos de Cruz (2007b), pero cada componente de la biomasa fue ajustado por separado.

En virtud de lo anterior la inclusión de altura del árbol en las ecuaciones de biomasa como una variable predictora adicional, podría mejorar la precisión de las estimaciones de biomasa al desarrollar ecuaciones con variables combinadas de $dn-h$ (diámetro-altura) y en consecuencia las estimaciones de carbono almacenado en los ecosistemas.

2.4.5. Ecuaciones de biomasa por componente estructural en latifoliadas

El ajuste de la ecuaciones simultaneas mediante la técnica SUR (regresiones aparentemente no relacionadas) generó estimadores consistentes y propicio un mejor ajuste al considerar la variabilidad total de los cuatro componentes estructurales del árbol. Cada parámetro fue significativo al nivel de confianza del 95% (Cuadro 2.4).

Los modelos utilizados para los componentes estructurales tienen la forma de la variable combinada escalada (Figura 2.9).

$$B = \text{Exp}(-\beta_0) * (dn^2 * h)^{\beta_1}$$

Donde B es la biomasa por árbol (kg), dn es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m), β_0 y β_1 son los parámetros estimados.

Cuadro 2.4. Parámetros y estimadores de regresión de las ecuaciones ajustadas para biomasa total de árboles individuales de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.

Parámetro	Estimador	Error estándar	Valor T	PR > ITI	Raíz MSE	R ²	R ² ajustada
Follaje							
β_0	2.437957	0.7368	3.31	0.0019	6.8093	0.757	0.757
β_1	0.57486	0.0741	7.76	<.0001			
Ramas							
β_0	6.663739	1.7575	3.79	0.0005	73.2064	0.7413	0.7413
β_1	1.208846	0.1703	7.1	<.0001			
Fuste							
β_0	4.196867	0.4986	8.42	<.0001	29.4694	0.9637	0.9637
β_1	0.988965	0.0487	20.31	<.0001			
Corteza							
β_0	5.630984	1.5461	3.64	0.0007	14.6391	0.7236	0.7236
β_1	0.949278	0.1512	6.28	<.0001			
Biomasa total[†]							
$\Sigma f_{\text{total}} (\beta_0 \cdot \beta_1 \dots \beta_k \cdot \beta_n)$					111.2	0.8934	0.8858
Biomasa total^{††}							
β_0	3.109407	0.8884	3.5	0.0011	107.2	0.8962	0.8938
β_1	0.952688	0.0869	10.96	<.0001			

[†] Biomasa total estimada como la suma de las estimaciones de biomasa por componente.

^{††} Biomasa total estimada a partir de la biomasa total observada.

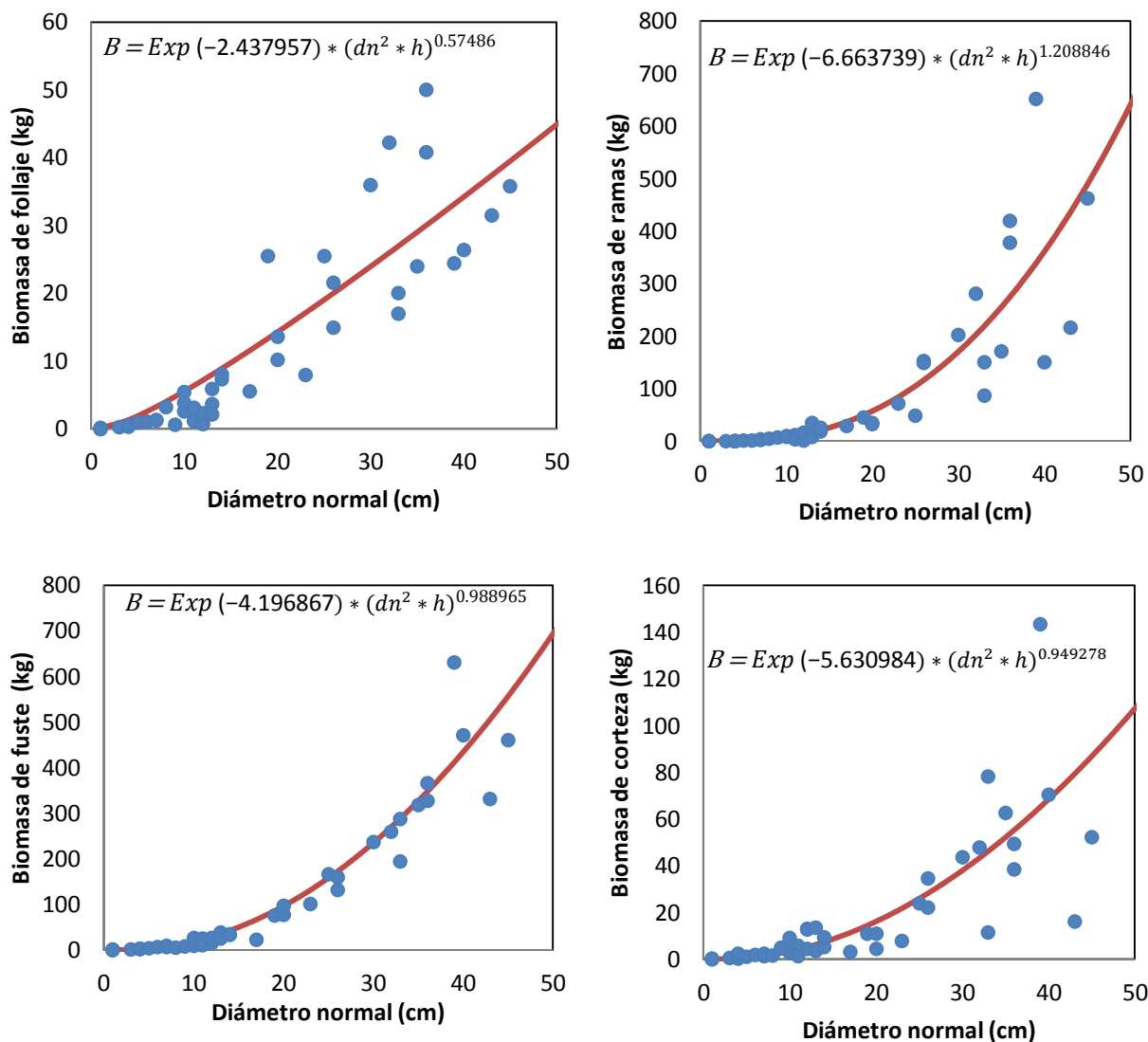


Figura 2.9. Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, ramas, fuste y corteza) en árboles de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.

En las latifoliadas estudiadas se observa un incremento en la proporción de biomasa en las ramas y en la corteza conforme aumenta el diámetro del arbolado (Figura 2.10). Mostrar la partición de biomasa permite conocer el destino de los productos derivados de cada fracción y su vida media aproximada. Lo que permitiría hacer el seguimiento del carbono desde que se extrae del monte hasta que es liberado a la atmósfera nuevamente (Montero *et al.*, 2005).

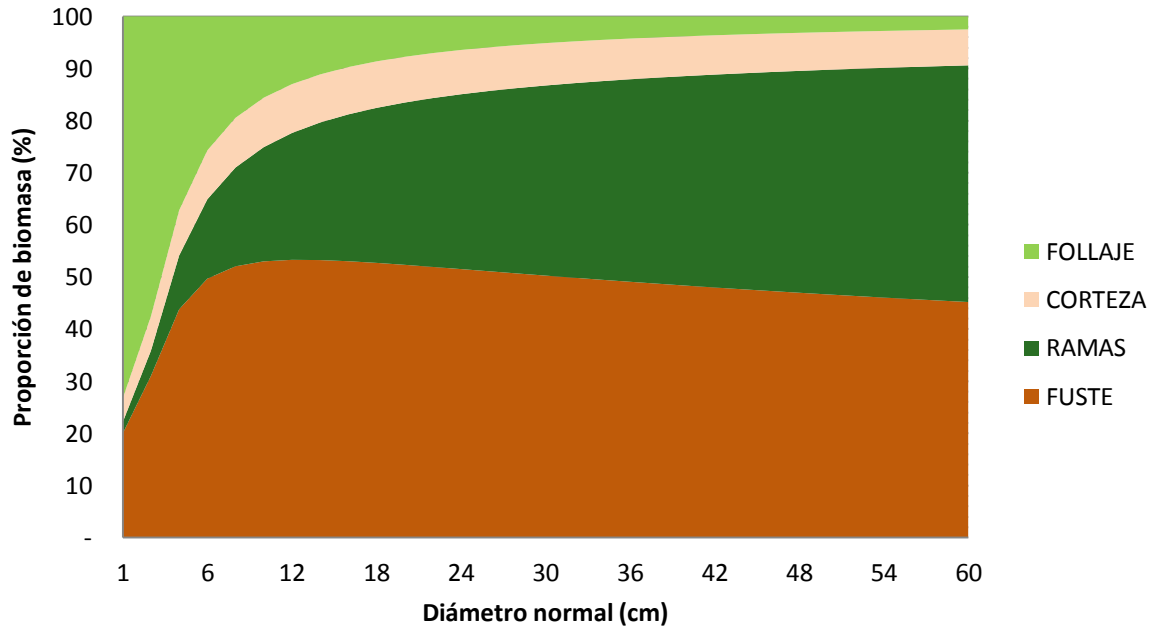


Figura 2.10. Proporción de biomasa por componente estructural (follaje, corteza, ramas y fuste) en árboles de latifoliadas en Zacualtipán, Hidalgo.

Con la inclusión de la altura del árbol, la información sobre el entorno competitivo (la edad del rodal, índice de sitio, densidad) se considera indirectamente en el modelo (Wirth *et al.*, 2004). Este hecho hace que el modelo sea general y permite el uso de la ecuación para diferentes sitios (Ketterings *et al.*, 2001). Otras variables independientes como la longitud de la copa han sido probados en otros estudios de estimación de biomasa (Carvalho y Parresol, 2003; Antonio *et al.*, 2007). Sin embargo, con el fin de asegurar la aplicabilidad de los modelos, no se ha considerado esta variable, ya que generalmente esta variable no se mide en los inventarios forestales (Ruíz *et al.*, 2011).

2.4.6. Factores de expansión de biomasa

El factor de expansión de biomasa (FEB) para *Pinus patula* que relacionan biomasa de fuste con la biomasa total variaron de 2.356 a 1.107, disminuyendo en proporción inversa al tamaño del diámetro (Figura 2.11). Lo cual es consistente con la proporción de biomasa de fuste y en árboles con diámetros menores a 5 cm representa menos del 50% y aumenta con el diámetro.

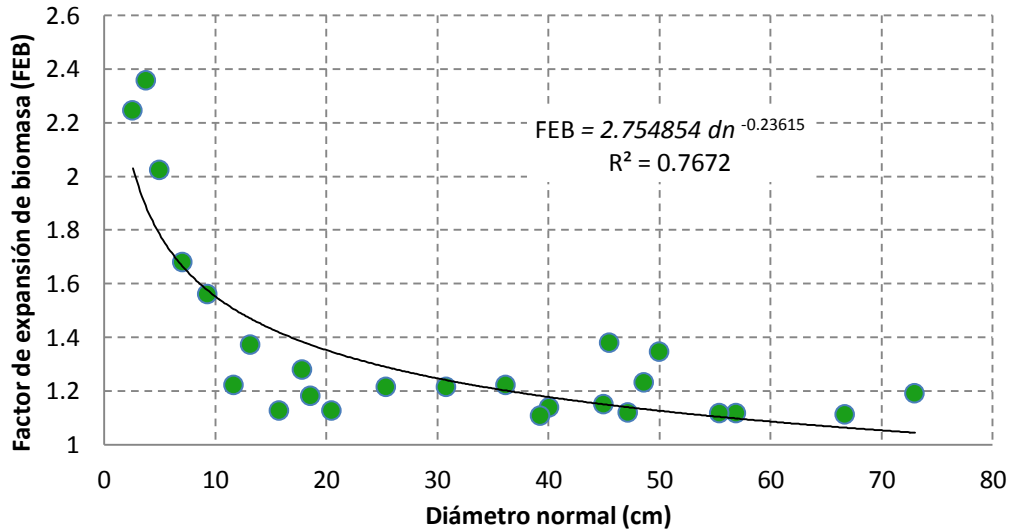


Figura 2.11. Variación de la relación biomasa de fuste a biomasa total con el diámetro.

Los resultados obtenidos en este trabajo son similares a otros estudios en especies de coníferas. Con el aumento de las dimensiones del árbol e incluso de la edad del árbol el FEB disminuye presentando diferencias estadísticas entre clases de diámetro y edad (Peichl y Arain, 2007). En *Pinus rigida* Mill el FEB fue de 1.98 en edades de 20 años y disminuyó a 1.13 en una edad de 60 años (Seo *et al.*, 2013). Lim *et al.*, (2013) encontraron que el FEB disminuyó con el aumento de la clase de edad de 2.16 a 20 años a 1.66 a 50 años en *Cryptomeria japonica*, encontrando diferencias estadísticas en las dos clases de edad.

El valor promedio del factor de expansión de biomasa fue de 1.353, valor cercano al promedio reportado para *Pinus pseudostrobus* (1,373) y para *Pinus teocote* (1,394) (Domínguez *et al.*, 2009). En contraste, los valores máximos para estas especies fueron de 1.461 para *Pinus pseudostrobus* y 1.574 para *P. teocote* resultando muy inferiores a los datos obtenidos en este trabajo, lo cual puede atribuirse al intervalo de diámetros muestreados en los diferentes estudios. Salas e Infante (2006) menciona la importancia de general factores de expansión de biomasa a nivel local, por ejemplo en diferentes especies de latifoliadas el FEB varia alcanzando valores hasta de 21 (Bautista y Torres 2003; Domínguez *et al.*, 2009), incluso esta variación también se puede encontrar dentro de la misma especie debido a la variación en la

estructura del rodal (Lehtonen *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2007) y las condiciones del sitio (Teobaldelli *et al.*, 2009).

Los resultados sugieren que determinar el valor de factores de expansión por especie y por categoría diamétrica o edad, posibilita una perspectiva más detallada de la variación de dichos valores para la especie. Levy *et al.* (2004) no encontraron una relación significativa en la misma clase de edad con diferentes diámetros sin embargo si encontró diferencias significativas entre diferentes clases de edad reportando mayor FEB en árboles jóvenes que en los árboles maduros. Lo que podría estar relacionado con diferentes patrones de asignación de biomasa para diferentes clases de edad (Lim *et al.*, 2013). De acuerdo a Silva y Návar (2010), los factores de expansión de biomasa también difieren en función la estación, el crecimiento y la extracción. De aquí la importancia de contar con FEB con parámetros afines a los árboles, los rodales y las estaciones, lo que podría favorecer el cálculo de los almacenes de carbono (Gracia *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2004) y los flujos de este elemento biogeoquímico (Ríos-Carrasco *et al.*, 2009) a través del tiempo.

2.4.7. Comparación entre estimaciones de biomasa observada y biomasa por factores de expansión.

La biomasa de un árbol se estima a partir de ecuaciones alométricas o de factores de expansión de biomasa. Los factores de expansión generados permitieron estimar la biomasa total del árbol a partir del volumen del fuste multiplicado por la densidad básica de la madera de *Pinus patula*. Cabe señalar, que se observa una buena relación entre la biomasa estimada y la biomasa observada (Figura 2.12). En la mayoría de los árboles la biomasa fue subestimada, en árboles con dimensiones menores a 7 cm de diámetro la biomasa estimada fue menor en un 80%, mientras que en árboles con dimensiones mayores a 7 cm la biomasa se subestimó en un intervalo de 3 a 37%. En pocos casos la biomasa estimada fue mayor a la biomasa observada. Pese a lo anterior la biomasa observada no fue significativamente

diferente ($P=0.748$) a la estimada a partir del volumen y la densidad de la madera. Cuando estos datos son normalizados por el volumen (considerando el tamaño del árbol) tampoco se observan diferencias estadísticas ($P= 0.084$).

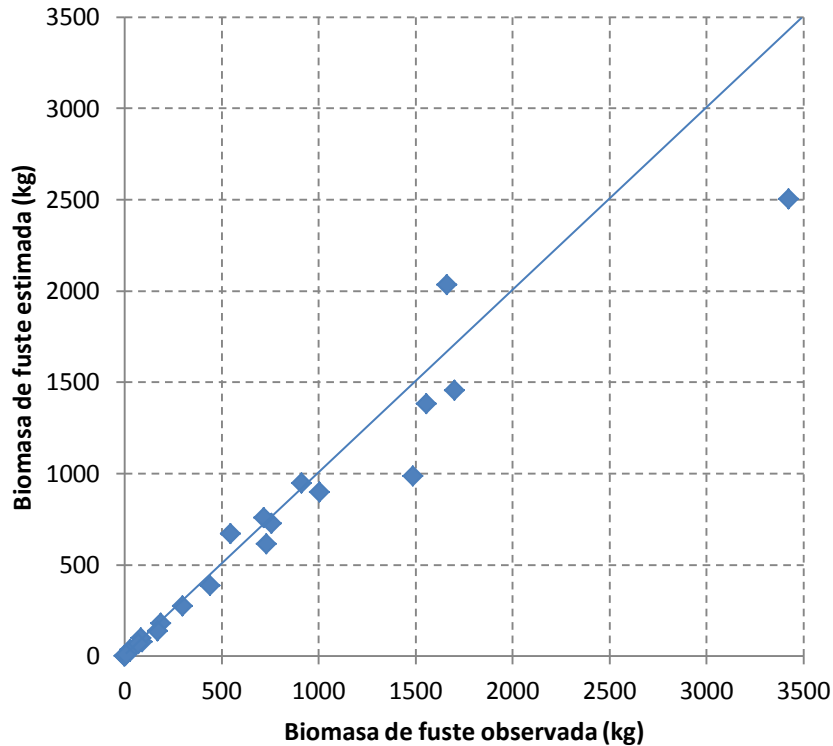


Figura 2.12. Relación entre biomasa de fuste observada y biomasa de fuste estimada a partir del volumen y densidad básica.

Este resultado fue similar al comparar la biomasa total observada contra la biomasa total estimada mediante el volumen, la densidad y el factor de expansión de biomasa (Figura 2.13). La biomasa estimada fue menor en un rango de 3 a 60% y sólo en algunos casos la biomasa estimada fue mayor a la biomasa observada. Sin embargo no se encontraron diferencias estadísticas entre ambos valores ($P= 0.748$).

Un factor importante en las variaciones de biomasa es el atribuido a la densidad básica de la madera utilizada para convertir el volumen a biomasa. La densidad básica reportada para la especie tiene un valor promedio de 0.43 g cm^{-3} , sin embargo dado que la densidad varía dentro de la misma especie, la densidad empleada para estas estimaciones fue la generada por Goche *et al.* (2011) de 0.4466 g cm^{-3} . A

pesar de que sus resultados muestran una media general de 0.4602 g cm^{-3} para una región más grande en Hidalgo, se reporta un valor mínimo de 0.2241 y un máximo de 0.6956 g cm^{-3} (Goche *et al.*, 2011). Esta variación puede generar consecuentemente una diferenciación en las estimaciones de biomasa.

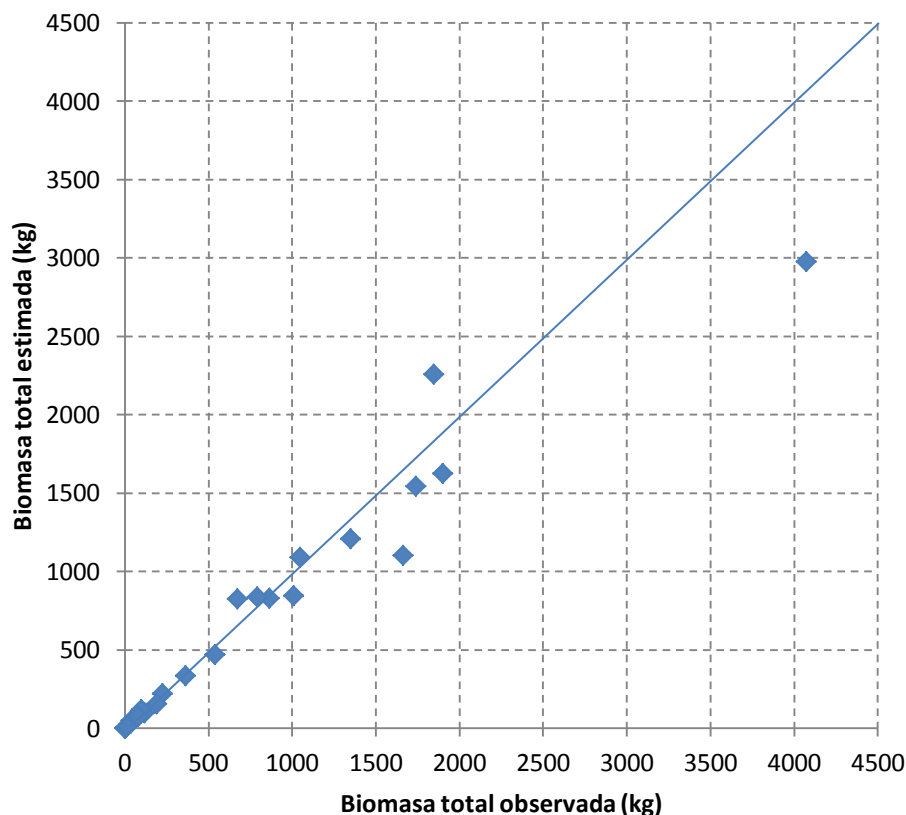


Figura 2.13. Relación entre biomasa total observada y biomasa total estimada a partir del volumen, densidad básica y FEB.

La densidad básica de la madera varía ampliamente dentro de un árbol, desde la médula hacia el exterior o desde la base del tronco hacia la copa (Goche *et al.*, 2007). También está influenciada por la edad, la forma del árbol, las diferencias genéticas, la velocidad de crecimiento y la historia evolutiva (Pittermann *et al.*, 2006). Además es el resultado de factores externos como: la luz, el suelo, la humedad y temperatura, así como de la competencia con otros organismos (Dalla *et al.*, 2009). Otro factor importante es el manejo aunque Goche *et al.* (2007) mostraron que la calidad de estación y el aclareo en el bosque natural no influyeron significativamente sobre este parámetro, se obtuvieron valores de 0.45 y 0.44 g cm^{-3} para una calidad

de estación alta, antes y después del aclareo respectivamente y 0.47 y 0.44 g cm⁻³ en condiciones de calidad de estación baja. Todos estos factores pueden propiciar una sobre o subestimación en la biomasa total al no considerar una densidad básica adecuada.

Otro factor importante que puede propiciar incertidumbres en la estimación de biomasa total son los FEB (Petrokofsky *et al.*, 2012), ya que pueden dar lugar a resultados sesgados si se compara con las ecuaciones locales de biomasa. Los FEB difieren en función de varios factores como la edad, la estructura dimensional del rodal y la estación (Silva y Návar, 2010). El Panel intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) (2006), declaró que la edad del rodal es una de las principales fuentes de incertidumbre para la densidad de madera y FEB, y recomendó que la densidad y FEB deban determinarse para las diferentes clases de edades con el fin de reducir la incertidumbre (Seo *et al.*, 2013).

Los factores de expansión son parámetros que transforman el volumen fustal por árbol o por unidad de superficie en biomasa o en carbono por árbol o por la misma unidad superficie por cada tipo de vegetación (Gracia *et al.*, 2004). Estos facilitan los cálculos de la densidad de biomasa o carbono a partir de las existencias reales en un bosque (Silva y Návar, 2009), sin embargo su uso debe ser tomado con cautela al considerar la precisión de las estimaciones de biomasa o carbono.

En todo caso, la incertidumbre de los análisis en la estimación biomasa y en consecuencia del carbono secuestrado en los diferentes ecosistemas es patente (Pardos, 2010). Sin embargo, las ecuaciones alométricas sugieren mejores estimaciones de biomasa en comparación que las estimaciones mediante FEB. De aquí la importancia de mejorar las ecuaciones por especie a nivel local incluyendo variables como altura e incrementando el intervalo en las dimensiones de dichas variables. Esto también indica la importancia de la representatividad en los modelos generados y los riesgos de la extrapolación

2.5. CONCLUSIONES

La función de volumen para *Pinus patula* ajustada con FIML homogeniza y minimiza el error estándar de los parámetros y permite la compatibilidad total del sistema de ahusamiento y volumen total.

Las funciones ajustadas para la estimación de biomasa por componente estructural y total en *Pinus patula* y latifoliadas a través de mediciones de diámetro normal y altura de los árboles generaron coeficientes altamente confiables, cuyos estimadores estadísticos permiten afirmar que las ecuaciones determinadas son adecuadas y confiables para usarse en condiciones similares y para estimar los valores de biomasa para *P. patula* y latifoliadas estudiadas.

La inclusión de arbolado con dimensiones mayores a 50 cm y el ajuste simultáneo considerando la aditividad de las ecuaciones mejoró sustancialmente los modelos de biomasa y de volumen. Las funciones de biomasa por componente estructural permiten el desarrollo de proyectos encaminados a la determinación de contenido de biomasa en la especie estudiada, sin necesidad de emplear métodos destructivos que impliquen el derribo de árboles con métodos exhaustivos, lentos y costosos.

Los factores de expansión de biomasa dependen fuertemente de diversos factores como la edad, condiciones del sitio, densidad básica de la madera y el manejo. Sin embargo, en lugares donde no se cuenta con ecuaciones de biomasa, los FEB son una buena alternativa que facilitan los cálculos de biomasa a partir de las existencias reales en un bosque.

CAPÍTULO III

ACUMULACIÓN DE BIOMASA EN UNA CRONOSECUENCIA DEL BOSQUE BAJO MANEJO DE *Pinus patula* EN EL EJIDO TZINCOATLÁN, MÉXICO

3.1. RESUMEN

Los bosques juegan un papel preponderante en el ciclo global del carbono, sin embargo la determinación de esta capacidad constituye un reto cuando se trata de evaluar el potencial de los bosques manejados. Uno de los factores específicos al que se ha prestado poca atención es el efecto de la edad del rodal sobre los almacenes de biomasa y carbono. Con el fin de entender mejor la participación de los bosques bajo un sistema de manejo y el efecto de la edad en el balance de carbono se determinaron los almacenes de biomasa en el estrato aéreo en rodales del bosque manejado de *Pinus patula* del Ejido Tzincoatlán, en Zacualtipán, Hidalgo. La biomasa de los árboles mayores de 5 cm de diámetro normal, se estimó en una cronosecuencia de 1 a 22 años mediante un inventario y el empleo de funciones alométricas generadas para la región. Los valores de biomasa más bajos se observaron en los rodales jóvenes (1-8 años). Por el contrario, en los rodales de mayor edad (20-22 años de edad) los valores fueron $>100 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomasa. En todos los rodales, la mayor cantidad de biomasa se concentró en el compartimento de fuste. Las estimaciones revelan la variabilidad y el potencial productivo del rodal en las diversas edades de análisis.

Palabras clave: *Cronosecuencia, biomasa, almacenes de carbono, bosque manejado.*

3.1. ABSTRACT

Forests play an important role in the global carbon cycle, however determining the carbon storage capacity is challenging when it comes to assess the potential of managed forests. One of the specific factors that has received little attention is the effect of stand age on biomass and carbon storage. In order to better understand the involvement of forests under a management system and the effect of age on the carbon balance, aboveground biomass and carbon stocks were determined in stands at a managed forest of *Pinus patula* in Tzincoatlán Ejido, Zacualtipán, Hidalgo. The biomass of trees larger than 5 cm dbh was estimated in a chronosequence of 1-22 years by inventory and using allometric equations generated for the region. The lowest biomass values were observed in young stands (1-8 years). By contrast, in older stands (20-22 years old), the values were $>100 \text{ Mg ha}^{-1}$ of biomass. In all stands, the highest biomass was concentrated in tree stems. Estimates showed the variability and the productive potential of the stand on the different ages of analysis.

Keywords: chronosequence, biomass, carbon stocks, managed forest.

3.2. INTRODUCCIÓN

La biomasa forestal contiene aproximadamente 80% de todo el carbono terrestre aéreo y 40 % de carbono subterráneo (Goodale *et al.*, 2002; Peichl *et al.*, 2007; Lim *et al.*, 2013). Los árboles almacenan los fotoasimilados en componentes de carbono en sus estructuras leñosas por periodos prolongados (Acosta *et al.*, 2002). Por lo tanto, los bosques se consideran un importante sumidero para el CO₂ atmosférico y ofrecen un gran potencial para el almacenamiento temporal de CO₂ y mitigación de las altas emisiones de este gas que contribuye al calentamiento global (Peichl y Arain, 2007; Aguirre y Jiménez, 2011; Lim *et al.*, 2013). En virtud de lo anterior el manejo forestal puede compensar las crecientes emisiones de CO₂ en dos formas: incrementando las reservas de CO₂ al aumentar la masa de material maderable y reduciendo de la tasa de liberación de carbono mediante acciones de protección (Pimienta *et al.*, 2007; Rodríguez *et al.*, 2009). Sin embargo el papel de los mismos ha sido muy discutido y el manejo forestal ha sido poco investigado (CONAFOR, 2010). Por ello es necesario realizar estudios en bosque manejados sobre biomasa y carbono para evaluar su contribución en el ciclo del carbono.

No obstante, la determinación de la capacidad de captura constituye un reto, donde la biomasa y carbono aéreos varían en función de varios factores: la especie o composición florística, la edad, la densidad del rodal en cada estrato por comunidad vegetal (Schulze *et al.*, 2000, Acosta *et al.*, 2002), el sitio, las condiciones climáticas, el tratamiento silvícola, la pendiente, la altitud, la exposición, la variación genética y el año en que se realiza el muestreo (Cruz, 2007b; Avendaño *et al.*, 2009), la sanidad, relaciones con otros organismos y la velocidad de crecimiento (Figueroa *et al.*, 2005). Algunos investigadores sugieren que los bosques manejados de manera sostenible secuestran más carbono que los bosques no manejados para producción maderable (Nunery y Keeton, 2010), haciendo hincapié en las altas tasas de crecimiento de los árboles obtenidos en rodales cosechados (Ruddell *et al.*, 2007), y el C almacenado en los productos maderables (Malmsheimer *et al.*, 2008). En México se ha estimado que el manejo forestal tiene un potencial de captura neta

unitaria de carbono de 98 a 134 Mg C ha⁻¹ en bosques templados principalmente de pino y pino-encino, mediante el sistema de manejo selectivo (Ordóñez, 1999).

Las ecuaciones alométricas han sido una valiosa herramienta para estimar la cantidad de biomasa y carbono de acuerdo al tamaño del arbolado. Sobre este aspecto varios trabajos han reportado el uso de relaciones alométricas para determinar la cantidad de biomasa o carbono presente en ecosistemas templados (Parresol, 2001; Acosta *et al.*, 2002; Bi *et al.*, 2004; Montero *et al.*, 2005; Cruz, 2007b; Aguirre y Jiménez, 2011; Ruiz *et al.*, 2011) en bosque mesófilo de montaña (Acosta *et al.*, 2002; Rodríguez *et al.*, 2006; Acosta *et al.*, 2009; Acosta *et al.*, 2011) y en bosques manejados (Díaz *et al.*, 2007; Pacheco *et al.*, 2007; Balderrama *et al.*, 2008; Figueroa *et al.*, 2010). Los estudios consideran principalmente ecosistemas forestales y la información previa para la estimación de la captura de carbono es parte de un inventario forestal (Ordóñez, 2008), donde la inferencia sobre la población se hace a partir de una muestra con el apoyo de estimadores de muestreo (Schreuder *et al.*, 2004). En los inventarios forestales la biomasa de un rodal se estima a partir de la biomasa calculada para cierto número de parcelas de muestreo con una función de biomasa a partir del diámetro normal y altura del fuste (Hernández, 2012). Los sitios de muestreo pueden ser temporales o permanentes. Estos últimos generalmente se consideran estadísticamente más eficientes para estimar los cambios en las reservas forestales de carbono que las parcelas temporales, porque hay una alta covarianza entre las observaciones en los eventos de muestreo sucesivas y permite la verificación eficiente a un costo relativamente bajo (Pearson *et al.*, 2007).

Con el fin de entender mejor la participación de los bosques bajo un sistema de manejo en el ciclo del carbono, el objetivo del capítulo fue analizar el proceso de acumulación de biomasa y carbono que se encuentra almacenado en la parte aérea del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo a través de una cronosecuencia de 22 años. Los sitios permanentes establecidos en el área favorecerán el monitoreo intensivo aplicado en la región.

3.3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.3.1. Área de estudio

El área de estudio fue el bosque bajo manejo del Ejido Tzincoatlán, el cual se encuentra a 6.5 km al sureste de la cabecera municipal del municipio de Zacualtipán de Ángeles y al oeste de la localidad de Tzincoatlán. El área se ubica entre las coordenadas extremas $20^{\circ} 37' 59.91''$ y $20^{\circ} 37' 12.29''$ de latitud Norte y $98^{\circ} 35' 39.91''$ y $98^{\circ} 34' 2.71''$ de longitud W. El Ejido tiene una superficie de 150.3 ha (Figura 3.1).

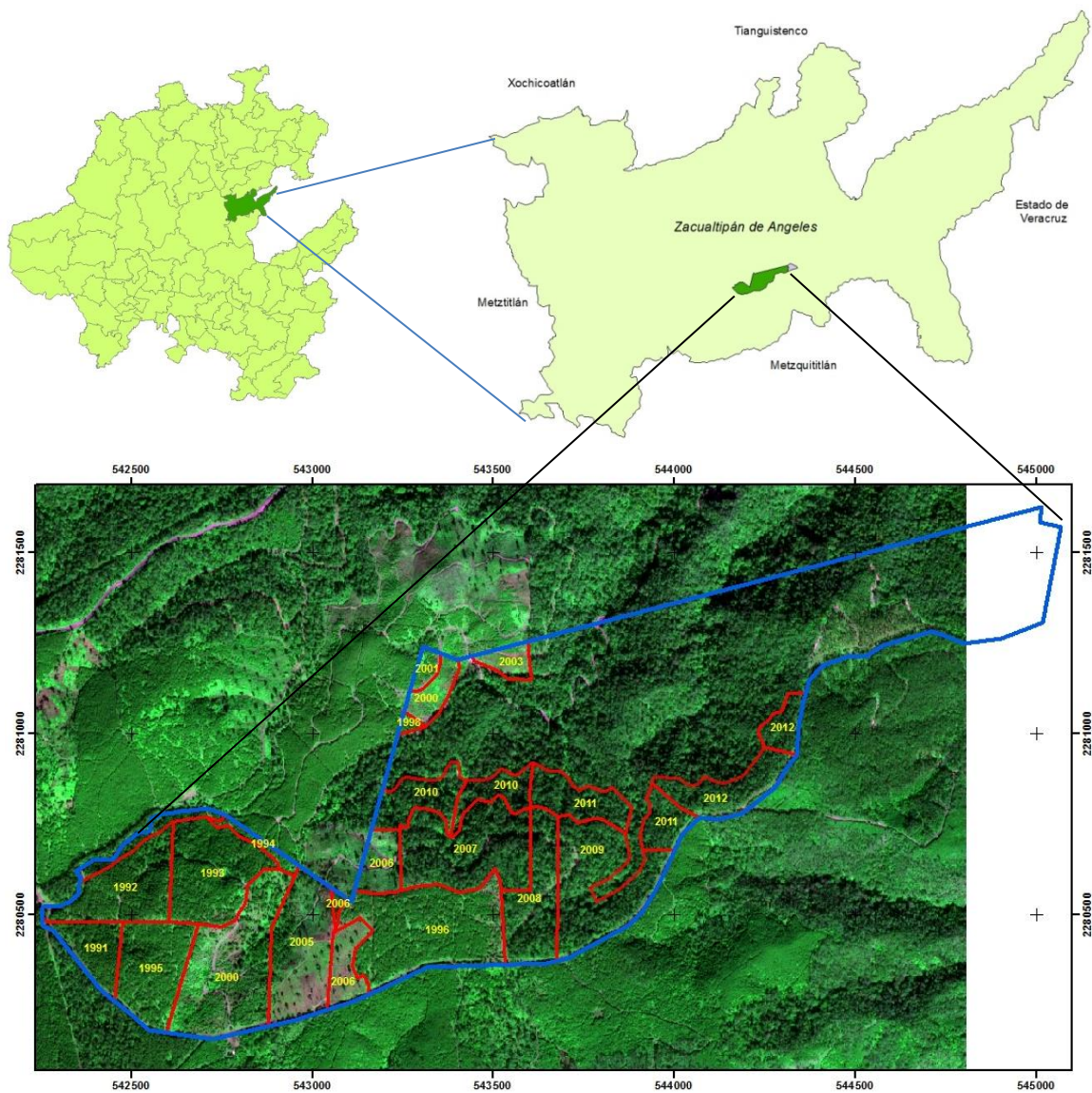


Figura 3.1. Localización del área de estudio.

El área colinda al norte con el Ejido Tlahuelompa, y propiedades particulares, al sur con el Ejido Santo Domingo y pequeñas propiedades, al este con la localidad de Tzincoatlán y al oeste con los ejidos El Reparó y Santo Domingo. Se caracteriza por una topografía de mesetas complejas con lomerío en una altitud de 1780 a 2080 m y pendientes de 0 a 60%. Se ubica en la subprovincia Carso Huasteco, de la Sierra Madre Oriental (INEGI, 2001a).

Presenta suelos profundos, con alto contenido de materia orgánica y nutrientes en la porción este del área. Caso contrario en la parte suroeste, el suelo es delgado y pedregoso. El suelo predominante es de tipo luvisol crómico (Lc) con textura fina y menos del 10% del área en la porción Este presenta Feozem háplico (Hh) y Regosol calcárico con textura media (INEGI, 2001b).

De acuerdo a la Clasificación climática de Köppen modificada por García (2004), el clima predominante es C(m) templado húmedo con lluvias abundantes la mayor parte del año, porcentaje de lluvia invernal entre 5 y 10.2 de la anual, con temperatura media anual entre 12 y 18°C y la precipitación anual oscila entre 1200 y 2000 mm (INEGI, 2001c). Hacia el este el clima es del tipo C (fm) templado húmedo donde la precipitación anual y el porcentaje de lluvia invernal son un poco mayor. El área se caracteriza por la presencia de humedad la mayor parte del año.

El manejo forestal en el área de estudio se ha enfocado recientemente a cultivar *Pinus patula* mediante el “Método de Desarrollo Silvícola” propiciando rodales monoespecíficos, coetáneos, de coberturas variables con diferentes años de establecimiento de la regeneración natural que se manifiesta en edades que van desde 0 hasta 22 años. Actualmente el bosque se encuentra en el tercer ciclo de corta para su aprovechamiento forestal. En las áreas intervenidas también se encuentra especies como *Prunus serotina*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Q. excelsa*; especies que también son aprovechadas.

El bosque natural corresponde a bosque mesófilo de montaña, que exhibe la asociación vegetal de pino-encino. Las especies presentes son *Pinus patula*, *Pinus teocote*, *Quercus laurina*, *Q. rugosa*, *Q. excelsa*, *Q. crassifolia*, *Q. affinis*, *Cornus disciflora*, *Viburnum* spp., *Cleyera theaoides*, *Alnus jorullensis*, *Arbutus xalapensis*, *Prunus serotina*, *Symplocos* spp., *Ternstroemia sylvatica*, *Vaccinium leucanthum*, principalmente. (Ángeles,1995). En la porción más húmeda del área al Este, la presencia de *Liquidambar* es notable, sin embargo el bosque natural en este fragmento se encuentra mayormente perturbado atribuido principalmente a la cercanía de la localidad.

3.3.2. Estrategia de inventario

La estimación de volumen y biomasa se generó a partir de un inventario forestal. Se midieron atributos (diámetro normal y altura) de árboles individuales mayores a 5 cm de diámetro en sitios de muestreo en campo, lo que permitió estimar su biomasa mediante las ecuaciones alométricas generadas. Las estimaciones individuales fueron sumadas para obtener estimaciones de la parcela y mediante extrapolaciones se obtuvieron estimaciones por hectárea (Aguirre *et al.*, 2009).

El muestreo utilizado fue el estratificado. En este método la población es dividida en subpoblaciones o estratos de interés que tienen cierta homogeneidad y se implementa un muestreo simple aleatorio en cada estrato (Mostacedo y Frederickse, 2000; Schreuder *et al.*, 2004). Para estratificar se usó como variable auxiliar la edad del rodal, obteniéndose 12 anualidades.

3.3.3. Establecimiento de sitios permanentes

El diseño de muestro para el establecimiento de sitios se basó en un muestreo estratificado por conglomerado similar al utilizado en el Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2011 (CONAFOR-SEMARNAT, 2011). El conglomerado está integrado por cuatro unidades de muestreo de forma circular cuya forma representa una “Y” invertida respecto al norte. Los 4 sitios de muestreo son equidistantes del centro

45.14 m y los sitios 2, 3 y 4 están orientados respecto al sitio uno con un azimut con incrementos de 120° (Figura 3.2).

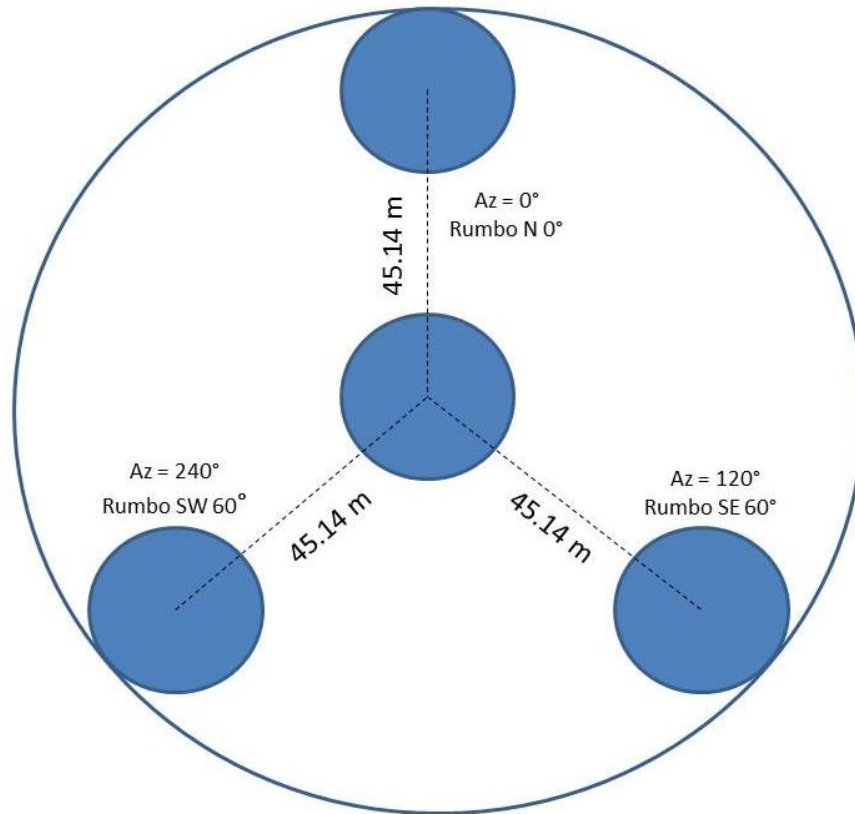


Figura 3.2. Diseño de muestreo utilizado para el establecimiento de sitios permanentes (Modificado de CONAFOR-SEMARNAT, 2011).

Los sitios tienen un radio de 11.28 m y una superficie de 400 m² (0.04 ha). El tamaño se considera óptimo para la determinación de variables dasométricas en rodales con baja densidad (Rügnitz *et al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2009; Rügnitz *et al.*, 2009). La superficie del sitio garantiza que haya 15 árboles promedio por sitio de muestreo (Aguirre *et al.*, 1995; Aguirre *et al.*, 1997). Estos sitios circulares presentan una excelente ventaja de tener menor perímetro que los sitios rectangulares para una misma superficie, lo cual significa menor posibilidad de error al contabilizar a los árboles cuya pertenencia al sitio sea dudosa (Aguirre *et al.*, 1995). Este tamaño de sitio ha sido utilizado para estimar biomasa y/o carbono en ecosistemas forestales con resultados favorables (Aguirre y Jiménez, 2011).

Inicialmente, con ayuda del software ARC GIS se identificaron los rodales por anualidad de corta sobre una imagen compuesta QuickBird (DigitalGlobe, 2006). Información que fue corroborada y actualizada con el plan de manejo vigente (Martínez, 2010). Se identificaron 12 Anualidades y posteriormente se ubicó un conglomerado de forma aleatoria por cada anualidad considerando que estuviera incluido totalmente dentro del rodal y que los sitios no presentaran efectos fuertes de borde o claros grandes (Schlegel *et al.*, 2000). Se ubicaron además 2 conglomerados en el área natural. Los centros de los 4 sitios de cada conglomerado fueron georeferenciados para su fácil ubicación en campo.

Con ayuda de un GPS configurado en el DATUM WSG 84 se localizaron los centros de los sitios centrales de cada conglomerado. A partir de estos puntos centrales se ubicaron los centros de los otros 3 sitios de cada conglomerado con ayuda de brújula para orientar cada centro y cinta diamétrica para medir las distancias entre los centros de los sitios (45.14 m). La pendiente en cada conglomerado fue considerada para compensar la distancia entre los centros de los sitios.

Una vez definidos los centros de los sitios, éstos fueron marcados con estacas de 30 a 50 cm de longitud e identificados en objetos visibles con el número de sitio y conglomerado para favorecer su localización posterior (Rügnitz *et al.*, 2008) y para garantizar que los sitios sean permanentes (Pearson *et al.*, 2007). Después con ayuda de cinta métrica se delimitaron los sitios de 400 m² (11.28 m de radio) y se demarcó la periferia con estacas de 1 a 2 m en 8 puntos cardinales para facilitar la identificación de arbolado (Schlegel *et al.*, 2001; Rügnitz *et al.*, 2009). Se compensó la distancia en todos los sitios cuando la pendiente fue mayor al 10% (Schlegel *et al.*, 2001).

3.3.4. Toma de datos

Una vez ubicados y delimitados los cuatro sitios de cada conglomerado, se procedió a marcar y etiquetar el arbolado mayor o igual a 5 cm de diámetro dentro cada sitio, con una placa metálica con el número del árbol. El orden de etiquetado y enumerado

del arbolado fue en sentido de las manecillas del reloj empezando por el radio norte del sitio y del centro hacía la periferia del sitio (Schlegel *et al.*, 2001). El criterio para definir la inclusión del arbolado en la periferia de cada sitio fue que el tronco estuviera dentro de la parcela o al menos 50% del mismo, aun cuando el fuste y la copa quedarán fuera. En contraste si el fuste y la copa estaban dentro de la parcela, pero el límite de la parcela no abarcaba más del 50% el tronco, el árbol no se incluía en la marcación (Rügnitz *et al.*, 2008). La etiqueta metálica fue colocada en la base del fuste y orientada hacia el centro del sitio para garantizar su permanencia en el intervalo de medición en caso de corta del arbolado.

Posterior al etiquetado y enumerado del arbolado se procedió a medir variables dasométricas. La información dasométrica obtenida fue especie, nombre común, condición (árbol vivo, muerto en pie o tocón), diámetro normal con ayuda de cinta diamétrica y altura total con hipsómetro VERTEX y clinómetro digital. También se registraron observaciones como vigor, daño y altura de toma del diámetro en caso de presencia de nudos. Posterior a la medición de cada árbol, éste fue marcado con pintura de color fosforescente para tener mejor control de los árboles medidos (Schlegel *et al.*, 2000).

Toda vez que una desventaja de parcelas permanentes es que su ubicación podría ser conocida y que el sitio puede ser tratado de manera diferente alterando la representatividad de la muestra (Pearson *et al.*, 2007), la etiqueta fue cubierta con mantillo presente en la misma área para no ser visible.

3.3.5. Estimación de volumen de fuste

Para estimar el volumen en $m^3 ha^{-1}$ y la biomasa en $Mg ha^{-1}$ se aplicaron los estimadores de muestreo simple al azar (MSA) en cada anualidad y del muestreo estratificado al azar (MEA) cuya inferencia sobre la población se basa en diseño (Tamarit, 2013). El muestreo estratificado permite mejorar las estimaciones del inventario ya que la población fue dividida en estratos basados en las anualidades y en cada uno de estos se seleccionó una muestra aleatoria (Cruz, 2007b), donde para

poder estimar la media poblacional es necesario primero determinar la media de cada uno de los estratos y el estimador queda de la siguiente manera

$$\bar{y}_{st} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^L N_i \bar{y}_i.$$

Donde

\bar{y}_{st} = Media poblacional.

L = Número de estratos en la población.

N = Número de unidades muestrales en la población.

N_i = Número de unidades muestrales en el estrato i .

\bar{y}_i = Media muestral del estrato i .

Para la estimación de volumen se utilizó la ecuación ajustada en el capítulo I

$$V = Exp(-10.4869) * dn^{1.7525} * h^{1.31936}$$

Donde V es volumen en m^3 , dn es el diámetro normal en cm y h es la altura en m

3.3.6. Estimación de biomasa por componente estructural y total

La biomasa arbórea juega un papel clave en el manejo forestal sustentable y en la determinación de los almacenes de carbono forestal (Návar 2010c; Cutini *et al.*, 2013). Para la estimación de biomasa se utilizaron las ecuaciones ajustadas en el capítulo I donde la biomasa total por árbol fue la suma de biomasa de los componentes de *P. patula* (cuadro 3.1) y latifoliadas (Cuadro 3.2). Los modelos alométricos basados en muestreos destructivos proporcionan estimaciones precisas confiables y directas de la biomasa y carbono en los sistemas vegetales porque tal estimación es individual y mediante la sumatoria se obtiene una estimación global por cada sistema. En la misma ecuación está considerada la variabilidad que pueden presentar los individuos, por edad y competencia, al mismo tiempo que su crecimiento refleja la productividad del sitio (Acosta *et al.*, 2002; De-Miguel *et al.*, 2014). Considerar ecuaciones por componente mejora las estimaciones de biomasa a nivel poblacional.

Cuadro 3.1. Modelos utilizados para estimar biomasa de los componentes estructurales de *Pinus patula*.

Biomasa por componente	Ecuación
Fuste	$B = \text{Exp}(-4.682959) * (dn^2 * h)^{1.033543}$
Corteza	$B = \text{Exp}(-7.441298) * (dn^2 * h)^{1.103791}$
Ramas	$B = \text{Exp}(-5.510841) * (dn^2 * h)^{0.951067}$
Follaje	$B = \text{Exp}(-4.750974) * (dn^2 * h)^{0.709796}$

Donde B es la biomasa del componente estructural del árbol en kg, dn es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m).

Cuadro 3.2. Modelos utilizados para estimar biomasa de los componentes estructurales de latifoliadas.

Biomasa por componente	Ecuación
Fuste	$B = \text{Exp}(-4.196867) * (dn^2 * h)^{0.988965}$
Corteza	$B = \text{Exp}(-5.630984) * (dn^2 * h)^{0.949278}$
Ramas	$B = \text{Exp}(-6.663739) * (dn^2 * h)^{1.208846}$
Follaje	$B = \text{Exp}(-2.437957) * (dn^2 * h)^{0.57486}$

Donde B es la biomasa del componente estructural del árbol en kg, dn es el diámetro normal (cm), h es la altura total (m).

3.3.7. Estimación de carbono

Para la estimación de Carbono se utilizó la concentración media de carbono por componente de *P. patula* (Figuroa *et al.*, 2010) (cuadro 3.3) y por especie en latifoliadas (Figuroa *et al.*, 2005) (Cuadro 3.4). Estudios en coníferas revelan mayor concentración de carbono en follaje respecto al fuste y ramas (Li *et al.*, 2013). Díaz *et al.* (2007) reportaron concentraciones de 49.47% para las ramas, 49.26% en el fuste y 52.21% para el follaje en *P. patula* en Tlaxcala.

Cuadro 3.3. Concentración media de carbono por componente en *Pinus patula* en Zacualtipán, Hgo.

Componente	Concentración media de carbono (%)
Follaje	51.18
Ramas	50.40
Corteza	51.87
Fuste	49.66

Fuente: Figueroa (2010)

Cuadro 3.4. Concentración media de carbono en latifoliadas.

Especie	Concentración media de carbono (%)
<i>Clethra</i> sp	51.3
<i>Quercus</i> sp	49.63
<i>Alnus</i> sp	47.26
Promedio	49.40

Fuente: Figueroa *et al.* (2005).

3.3.8. Análisis estadístico

Con los datos de área basal, volumen, biomasa y carbono se probaron los supuestos de normalidad aplicando las pruebas de Shapiro-Wilk y Kolmogorov-Smirnov. Dado que las puntuaciones de las variables no se ajustaron a una distribución normal, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) mediante la prueba de Kruskal–Wallis de una vía no paramétrico mediante el procedimiento PROC NPAR1WAY y la prueba de suma de rangos de Wilcoxon con el paquete estadístico SAS (SAS Institute Inc., 2011) con un nivel de confianza del 95%.

3.4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.4.1. Densidad y área basal

En el ejido Tzincoatlán 60% de los bosques han sido manejados desde 1991 mediante el Método de Desarrollo Silvícola (MDS) con fines de aprovechamiento maderable. Como resultado de la corta de regeneración a través del método de árboles padre, los bosques manejados son coetáneos y puros de *P. patula*. El área basal promedio por hectárea en estos bosques manejados fue de 14.90 (± 0.03) m², donde la mayor área basal y consistentemente la mayor densidad de individuos o número de árboles (N) corresponden a *Pinus patula* (94.5 y 94.8% respectivamente). Las proporciones restantes incluyen individuos de *Prunus serotina*, seguida de *Quercus laurina*., *Quercus excelsa* y en menor medida por *Clethra mexicana* (Cuadro 3.5), especies características del bosque mesófilo de montaña (Alcántara y Luna, 2001; Ponce *et al.*, 2006).

Cuadro 3.5. Densidad y área basal promedio para las especies arbóreas del bosque bajo manejo en el Ejido Tzincoatlán, Hidalgo.

Especie	Densidad		Área basal	
	N [†] ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%
<i>Pinus patula</i>	648	94.50	14.19	94.86
<i>Prunus serotina</i>	19	2.82	0.35	2.36
<i>Quercus laurina</i>	13	1.93	0.33	2.21
<i>Quercus excelsa</i>	4	0.64	0.08	0.52
<i>Clethra mexicana</i>	1	0.11	0.01	0.05
Total	686	100	14.96	100

[†]=Número de árboles

La baja proporción de especies latifoliadas presente en el bosque manejado es un indicador de la aplicación de tratamientos intermedios que propician la dominancia de *P. patula*. En un ejido cercano (Atopixco) con el mismo método de manejo pero con rodales de mayor edad se reporta una mayor área basal promedio por hectárea de

20.62 m² para pinos (*Pinus patula* y *P. teocote*) y 2.10 m² para latifoliadas (Cruz, 2007b).

En cambio, en el área no intervenida donde el ecosistema corresponde a bosque mesófilo de montaña la densidad promedio (1,416 ±119 N ha⁻¹) es mayor respecto al bosque manejado, donde la especie más abundante es *Quercus laurina* (500 N ha⁻¹), seguida de *Vaccinium leucanthum* (350 N ha⁻¹), *Clethra mexicana* (140 N ha⁻¹) y *Liquidambar styraciflua* (109 N ha⁻¹). De forma similar la mayor proporción de área basal se presenta en *Quercus laurina* (13.96 m² ha⁻¹), sin embargo la segunda especie que representa mayor proporción en este atributo es *Pinus patula* (6.35 m² ha⁻¹) con 21.91% del total a pesar que sólo contribuye con 4.9% en la densidad del bosque (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6. Densidad y área basal promedio para las especies arbóreas en el bosque sin manejo en el Ejido Tzincoatlán, Hidalgo.

Especie	Densidad		Área basal	
	N [†] ha ⁻¹	%	m ² ha ⁻¹	%
<i>Quercus laurina</i>	500	35.32	13.96	48.19
<i>Vaccinium leucanthum</i>	350	24.72	1.18	4.08
<i>Clethra mexicana</i>	141	9.93	1.21	4.19
<i>Liquidambar styraciflua</i>	109	7.73	2.18	7.51
<i>Pinus patula</i>	69	4.86	6.35	21.91
<i>Cornus diciflora</i>	31	2.21	0.18	0.61
<i>Prunus serotina</i>	16	1.10	0.15	0.51
<i>Quercus excelsa</i>	9	0.66	1.24	4.27
<i>Quercus rugosa</i>	9	0.66	1.71	5.89
<i>Crataegus</i> spp.	9	0.66	0.02	0.08
<i>Zanthoxylum clava-herculensis</i>	6	0.44	0.02	0.06
<i>Quercus</i> spp.	6	0.44	0.14	0.50
Otras	159	11.26	0.64	2.19
Total	1416	100	28.96	100

†=Número de árboles

Otras especies presentes con menor abundancia son *Cornus diciflora*, *Prunus serotina*, *Quercus excelsa*, *Quercus rugosa*, *Quercus* spp., *Crataegus* spp. y *Zanthoxylum clava-herculensis*, entre otras. Es evidente que el manejo forestal ha modificado la estructura de los bosques, ya que está fuertemente influenciada por agentes de disturbio de diferente magnitud, sean naturales o antropocéntrico (Franklin *et al.*, 2002; Tainaka, 2006). La estructura actual en los bosques manejados ha sido el resultado de las prácticas silvícolas que han propiciado la dominancia de *P. patula*, y han determinado su distribución espacial, lo que se ve reflejado en la frecuencia de tamaños del arbolado en los rodales de diferentes edades, dominancia y abundancia (Aguirre *et al.*, 2003; Pham *et al.*, 2004).

El área basal en el bosque manejado osciló de 0.24 (± 0.19) m² ha⁻¹ en el rodal de 3 años a 24.37 (± 1.09) m² ha⁻¹ en el rodal de 22 años. El área basal entre las diferentes anualidades presentó diferencias estadísticas altamente significativas ($P < 0.0001$). En el área natural el área basal fue de 28.96 (± 2.05) m² ha⁻¹ y no fue significativamente diferente ($P = 0.03$) respecto a los rodales de mayor edad. El número de árboles por hectárea fue mayor en el rodal de 7 años (1706.25 ± 109) y disminuyó conforme incrementó la edad. Sin embargo en rodales con menor edad la densidad varió de 31 (± 6) N ha⁻¹ a 1106 y 931 N ha⁻¹ en edades de 5 y 6 años, respectivamente (cuadro 3.7).

El área basal a través de la cronosecuencia aumentó conforme avanzó la edad del rodal. Los valores del área basal se encuentran dentro del intervalo reportado para la especie, por ejemplo Cruz (2008) estimó un área basal para bosques manejados en la región de 3.19 m² ha⁻¹ para un rodal de 6 años y 28.62 m² ha⁻¹ en un rodal de 22 años. En rodales de 23 años reportó 32.99 m² ha⁻¹. A pesar de que el área basal promedio encontrado en el Ejido (14.96 ± 0.03 m² ha⁻¹) es inferior al reportado por Cruz *et al.*, (2010) quienes estimaron mediante un MEA un área basal promedio de 22.54 m² ha⁻¹, la tendencia respecto de la edad del rodal es similar al encontrado en este estudio y los contrastes en el promedio pueden atribuirse a la diferencia de

edades en los rodales analizados, ya que el rodal de mayor edad analizado por Cruz *et al.* (2010) fue de 26 años.

Cuadro 3.7. Área basal y densidad promedio por anualidad en el Ejido Tzincoatlán.

Edad del Rodal (Años)	Área Basal		Densidad	
	m ² ha ⁻¹	Error estándar	N ha ⁻¹	Error estándar
3	0.24	± 0.19	31	± 6
4	1.98	± 0.53	475	± 114
5	5.53	± 1.87	1,106	± 426
6	5.46	± 0.57	931	± 87
7	14.37	± 2.12	1,706	± 109
8	7.42	± 0.76	850	± 153
13	21.83	± 1.20	675	± 57
17	21.89	± 0.68	619	± 52
18	24.25	± 1.24	563	± 31
20	26.80	± 3.12	588	± 46
21	24.20	± 2.42	388	± 46
22	24.37	± 1.09	438	± 44
80	28.96	± 2.05	1416	± 119

3.4.2. Volumen estimado

El volumen de fuste total fluctuó de 0.60 (±0.49) m³ ha⁻¹ en el rodal de 3 años de edad a 228.7 m³ ha⁻¹ (±11.45) m³ha⁻¹ en el rodal de 22 años. En el bosque sin intervenir el volumen promedio fue de 255.5 m³ ha⁻¹ con mayor variabilidad entre los sitios muestreados (±25.6 m³ ha⁻¹) respecto al bosque manejado.

Entre rodales menores a 6 años como en rodales mayores de 25 años de edad (incluyendo el bosque natural) no se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$ con un $\alpha = 0.05$) en el volumen promedio. Sin embargo el volumen presente en los rodales jóvenes (menores a 6 años) es estadísticamente diferente ($p < 0.05$ con un $\alpha = 0.05$) al de los rodales mayores de 20 años. A pesar de que el bosque natural es casi 3 veces mayor que el rodal más maduro, no se encontraron diferencias estadísticas

($P=0.0982$) entre éste y los rodales de mayor edad (17, 18, 20, 21 y 22 años) (Cuadro 3.8).

Cuadro 3.8. Volumen promedio y diferencias estadísticas por anualidad en el Ejido Tzincoatlán.

Edad del rodal (años)	Volumen ($m^3 ha^{-1}$)		
3	0.60 ^{a†}	±	0.47
4	5.64 ^{ab}	±	1.96
6	14.05 ^{abc}	±	2.34
5	14.75 ^{abc}	±	5.36
8	23.97 ^{abcd}	±	2.08
7	48.01 ^{abcde}	±	9.45
13	123.16 ^{bcdef}	±	7.53
17	161.62 ^{cdefg}	±	3.77
18	189.09 ^{defg}	±	12.73
20	215.35 ^{efg}	±	27.95
21	221.80 ^{efg}	±	21.80
22	228.70 ^{fg}	±	11.45
80	255.50 ^g	±	25.60

† Medias de volumen con diferente letra son significativamente diferentes ($p < 0.05$, $\alpha = 0.05$ suma de rangos de Wilcoxon).

De forma general la existencia de volumen promedio incrementó en proporción directa a la edad del rodal (Figura 3.3). Particularmente el rodal de 8 años de edad presenta menor volumen que un rodal con menor edad (7 años), lo que es atribuido a que en el primer rodal se presentó una regeneración con una baja densidad de árboles; adicionalmente la exposición cenital propicia una menor humedad y condiciones menos favorables que en el rodal de 7 años.

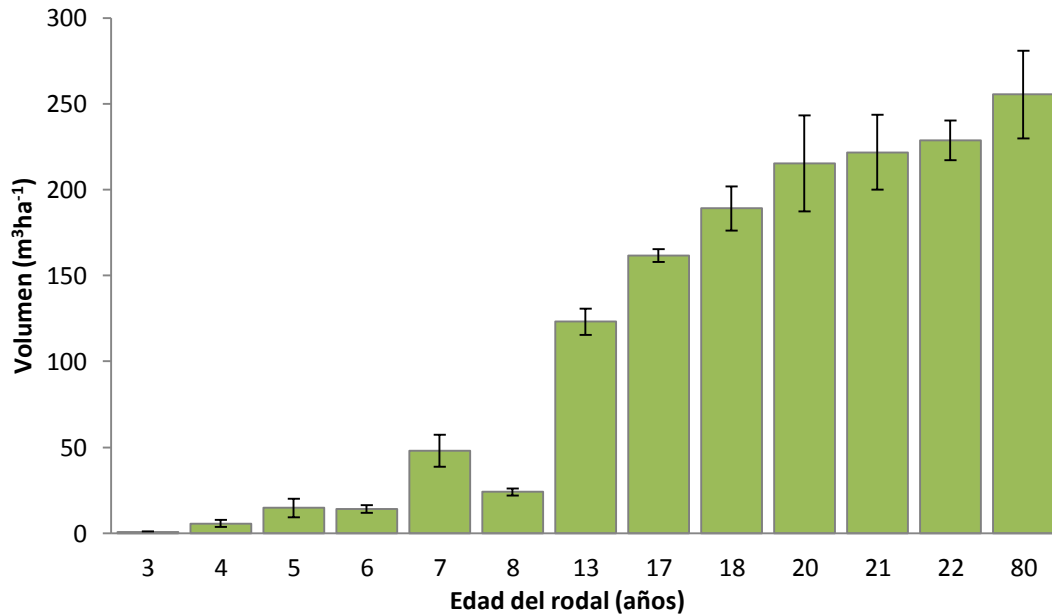


Figura 3.3. Volumen promedio en rodales de diferentes edades en el Ejido Tzincoatlán. Las líneas verticales representan el error estándar.

Los valores más altos de existencias actuales en volumen (año 2013), fueron de $228.70 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para el rodal de 22 años y los más bajos de $0.60 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ para la anualidad 2010 (3 años de edad). Estos valores se consideran bajos comparados con los obtenidos en otros estudios de la misma especie. Manzano (2006) reportó existencias en volumen de $323.17 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a la edad de 20 años, en los bosques de *Pinus patula* de la Unión Zapoteca-Chinanteca (UZACHI); la diferencia se puede deber a que se trata de un área puntual ubicada dentro de toda la zona de la UZACHI en la que el potencial productivo del sitio es mayor. Arteaga (2003) obtuvo para un grupo de especies del género *Pinus* spp., existencias en volumen de $45.46 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ a la edad de 14 años, en una plantación establecida en Perote, Veracruz, cuyo valor fue menor a los obtenidos en el presente estudio.

El volumen promedio ($101 \pm 0.26 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) en el área de estudio fue inferior al reportado por Cruz *et al.* (2010) en el ejido vecino Atopixco, cuyo promedio obtenido fue de $118.89 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mediante MSA y $140.69 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ mediante un MEA para 21 anualidades con mayor edad. De igual forma es inferior al volumen estimado por Cruz (2007b) de $158.7 \pm 0.36 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ con el mismo tipo de muestreo en un área cercana. Las diferencias entre estimaciones pueden ser atribuidas a los diferentes

modelos usados para la estimación del volumen, las estimaciones de Cruz (2007b) y Cruz *et al.* (2010) se basaron en el modelo generado por Carrillo *et al.* (2004), misma que fue ajustada para *P. patula* con datos del área de Huayacocotla, Ver. Los volúmenes aquí obtenidos se basan en modelos compatibles de volumen-ahusamiento que mejoran la capacidad de predicción del volumen (Hernández *et al.*, 2013). Otros factores a los que se pueden atribuir las diferencias son los factores físicos del sitio, así como a las características del rodal, entre las que destacan la densidad, tamaño de los árboles y de la edad como lo señala Castellanos *et al.* (1996).

3.4.3. Biomasa por componente estructural y total

La estimación de biomasa por componente estructural permitió obtener la partición de biomasa aérea en los rodales de diferentes edades, atributo que cambió considerablemente con la edad. La mayor proporción de biomasa fue aportada por el fuste. Mientras que la biomasa se concentró mayormente en este componente estructural conforme incrementó la edad del rodal. La proporción relativa de la biomasa foliar y ramas respecto a la biomasa total disminuyó con la edad del rodal (Figura 3.4). Lo anterior puede ser atribuido al incremento de las dimensiones del arbolado ya que la asignación de biomasa a los componentes del árbol varía a lo largo del ciclo de vida de un bosque (Helmisaari *et al.*, 2002). Peichl y Arain (2007) resaltan la importancia de considerar estos cambios a lo largo de diferentes etapas de desarrollo de la masa forestal con el fin de mejorar la estimación de la biomasa forestal y almacenes de carbono a escala regional y nacional.

El efecto de la edad en el patrón de distribución ha sido observado en coníferas por varios autores, de tal manera que con el aumento de la edad del árbol individual y del rodal las porciones de biomasa en el fuste y corteza incrementan, mientras que la proporción en follaje y ramas disminuyen (Son *et al.*, 2001; Helmisaari *et al.*, 2002; Peichl y Arain, 2007; Seo *et al.*, 2013). En una plantación de *Cryptomeria japonica* en Corea del Sur el comportamiento fue similar (Lim *et al.*, 2013), esta tendencia puede ser atribuida al cierre de copa donde los árboles grandes tienen un área foliar

relativamente menor que los árboles pequeños debido a las limitaciones impuestas por la luz (Lim *et al.*, 2013). Consistentemente con lo anterior, la asignación de biomasa también está influenciada por el tamaño y patrón de crecimiento (Gayoso, 2001; Gorte, 2009). Además, las diferentes condiciones del lugar como propiedades del suelo y las condiciones topográficas también pueden causar diferencias en la distribución de la biomasa (Magnani *et al.*, 2000; Rodríguez *et al.*, 2012).

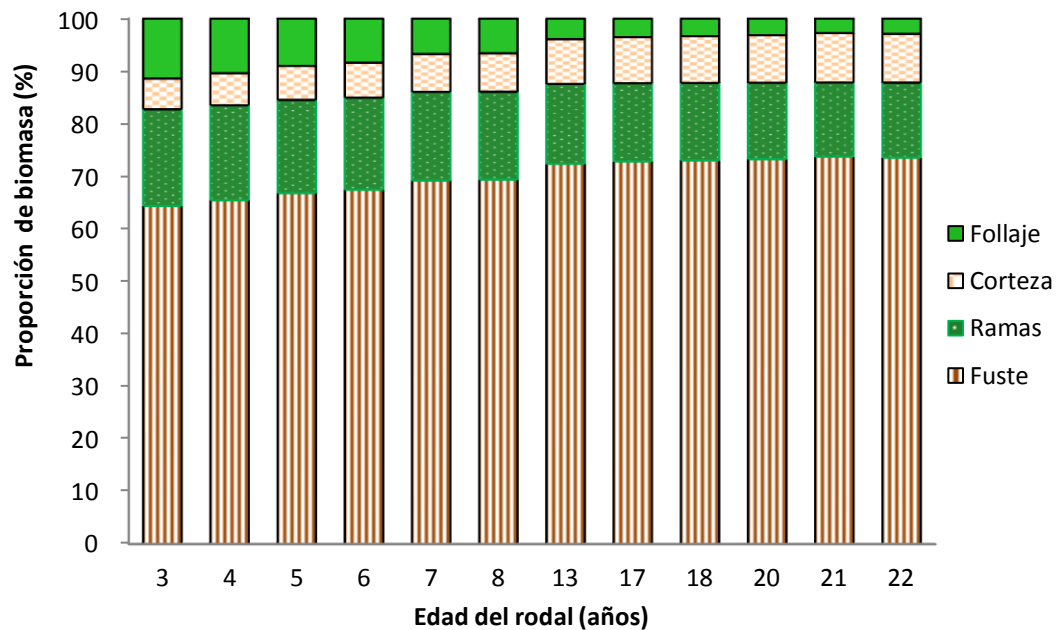


Figura 3.4. Proporción de biomasa por componente respecto a la biomasa total en rodajes del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.

Para el caso particular de los bosques bajo manejo, uno de los principales factores que influyen en la distribución de biomasa es el atribuido al control de la densidad del rodal, producto de la aplicación de aclareos (Rodríguez *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013). En *P. patula*, Rodríguez *et al.* (2011) reportaron que el manejo de la densidad inicial de plantación afecta significativamente ($p \leq 0.05$) la cantidad y distribución de biomasa foliar y la cantidad de madera con corteza en el fuste a nivel de árbol individual. Además, las intensidades altas de aclareo (65.3 y 68.7 %) y las respectivas densidades residuales bajas generaron la mayor acumulación de biomasa foliar (8.0 Mg ha^{-1}), que superaron ($p \leq 0.05$) al testigo sin aclareo ($1.5 \text{ kg árbol}^{-1}$) y la biomasa de madera con corteza del fuste los árboles con aclareo también superaron ($p \leq 0.05$)

al testigo. En bosques manejados de otras especies de coníferas también se concluyó que la densidad influye en la distribución de biomasa, y que la biomasa de fuste era mayor mientras que la biomasa de copa menor en rodales coetáneos densos que en rodales incoetáneos y dispersos o menos densos (Li *et al.*, 2013; De-Miguel *et al.*, 2014).

En una plantación de *P. patula*, Rodríguez *et al.*, (2012) determinaron una asignación de biomasa de 92.9% en el fuste incluyendo corteza, 4.7 % en ramas y 2.4 % en follaje en una plantación de 14 años de edad. La proporción de fuste en ese estudio se reduce con la edad, en contraste con los resultados obtenidos en el presente trabajo. Estas diferencias pueden atribuirse al manejo en la plantación y a las distintas metodologías empleadas. No obstante, los autores también mencionan que la proporción de follaje está en general muy por debajo del 4-6% encontrado en otras especies de coníferas, lo que sugiere que como especie, *P. patula* tiene una eficiencia fotosintética notable.

En el área de estudio la mayor contribución de biomasa en el bosque manejado lo aporta la especie de *P. patula* con existencias de biomasa que varían de 0.04 Mg ha⁻¹ en el rodal de 3 años a 117.10 Mg ha⁻¹ en el rodal de 22 años. La poca abundancia y densidad de especies de latifoliadas en los rodales resultados de los aclareos y demás tratamientos intermedios contribuyen con muy poca biomasa en los rodales (0.37 Mg ha⁻¹ en el rodal de 3 años a 5.71 Mg ha⁻¹ en el rodal de 22 años). La mayor contribución se presenta en los rodales de 18 y 20 años donde la biomasa acumulada promedio en latifoliadas es de 10.63 y 10.86 Mg ha⁻¹ respectivamente (Cuadro 3.9).

Cuadro 3.9. Biomasa por componente estructural de *Pinus patula* y latifoliadas en el ejido Tzincoatlán, Hidalgo.

Edad de rodal	Biomasa de <i>Pinus patula</i> (Mg ha ⁻¹)					Biomasa de latifoliadas (Mg ha ⁻¹)					Biomasa aérea Total (Mg ha ⁻¹)		
	Follaje	Ramas	Fuste	Corteza	SubTotal	Follaje	Ramas	Fuste	Corteza	SubTotal			
3	0.00	0.01	0.02	0.00	0.04	0.06	0.08	0.19	0.03	0.37	0.40	±	0.32
4	0.17	0.29	1.06	0.10	1.63	0.22	0.58	1.11	0.19	2.09	3.72	±	1.39
5	0.58	1.15	4.31	0.42	6.45	0.21	0.86	1.36	0.23	2.66	9.11	±	3.47
6	0.56	1.18	4.52	0.45	6.70	0.19	0.55	1.00	0.17	1.91	8.62	±	1.67
7	1.77	4.45	18.19	1.89	26.31	0.06	0.09	0.21	0.04	0.41	26.72	±	5.21
8	0.65	1.65	6.82	0.72	9.84	0.51	1.67	2.96	0.50	5.64	15.48	±	1.01
13	2.70	10.55	50.02	5.90	69.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	69.17	±	4.06
17	2.96	12.58	61.36	7.42	84.32	0.36	0.53	1.25	0.22	2.36	86.68	±	1.94
18	3.17	14.02	69.34	8.48	95.02	0.51	4.12	5.18	0.83	10.63	105.65	±	9.95
20	3.40	15.76	79.21	9.82	108.20	1.00	3.16	5.72	0.97	10.86	119.06	±	15.73
21	3.17	16.36	85.15	10.88	115.55	0.55	2.06	3.44	0.58	6.63	122.18	±	11.41
22	3.39	16.76	86.08	10.87	117.10	0.45	1.81	2.96	0.50	5.71	122.81	±	4.60
80	0.86	5.69	32.45	4.50	43.50	9.36	62.02	77.99	12.55	161.92	205.42	±	24.31

Biomasa total

La evaluación de la biomasa en los rodales de diferente edad presentó, como se esperaba, diferencias importantes. La biomasa aérea total en el bosque manejado osciló de 0.40 (± 0.32) Mg ha⁻¹ en el rodal de 3 años de edad a 122.81 (± 4.60) Mg ha⁻¹ en el rodal de 22 años, cifra cercana a la obtenida por Figueroa *et al.* (2010) en un rodal de la misma edad (147.19 Mg ha⁻¹). Las estimaciones de biomasa revelan la variabilidad y el potencial productivo del rodal en las diversas edades de análisis. Los valores de biomasa más bajos se observaron en los rodales jóvenes (1-8 años), donde la vegetación es escasa debido a la reciente cosecha por las actividades programadas de manejo forestal orientado a generar masas coetáneas (Ángeles *et al.*, 2005). En contraste, en los rodales de mayor edad (18-22 años de edad) los valores fueron mayores a 100 Mg ha⁻¹ de biomasa; mayores a los reportados por Masera *et al.* (2000) para bosques maduros que oscilan entre 50 y 86 Mg ha⁻¹. Por otra parte en el bosque sin intervenir la biomasa promedio fue de 205.4 Mg ha⁻¹ con mayor variabilidad entre los sitios muestreados (± 24.3 Mg ha⁻¹) respecto del bosque manejado.

Tanto en rodales menores a 8 años, como en rodales mayores de 25 años de edad (incluyendo el bosque natural) no se observaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$, $\alpha = 0.05$) en la biomasa promedio. Sin embargo la biomasa presente en los rodales menores a 6 años es significativamente ($P \leq 0.05$, $\alpha = 0.05$) menor al de los rodales mayores de 17 años. A pesar de que el bosque natural es casi 3 veces mayor que el rodal más maduro, no se encontraron diferencias estadísticas ($P = 0.003$) entre éste y los rodales de mayor edad (17, 18, 20, 21 y 22 años) (Cuadro 3.10).

Los resultados obtenidos reflejan una mayor acumulación de biomasa en rodales manejados con mayor edad. La acumulación de biomasa siguió un patrón creciente respecto de la edad del rodal, esto es similar con la suma de componentes de los modelos generados. Sin embargo aplicando el modelo de Figueroa *et al.* (2010), las estimaciones de biomasa por hectárea fueron consistentemente mayores respecto a las calculadas por los modelos aquí generados, sin embargo con un $\alpha = 0.05$ no se presentan diferencias estadísticamente significativas ($P = 0.62$) (Figura 3.5).

Cuadro 3.10. Biomasa aérea promedio y diferencias estadísticas por anualidad en el Ejido Tzincoatlán.

Edad del rodal (años)	Biomasa (Mg ha ⁻¹)		
3	0.40	a†	± 0.32
4	3.72	ab	± 1.39
5	9.11	abc	± 3.47
6	8.62	abc	± 1.67
7	26.72	abcd	± 5.21
8	15.48	abcd	± 1.01
13	69.17	bcde	± 4.06
17	86.68	cdef	± 1.94
18	105.65	def	± 9.95
20	119.06	def	± 15.73
21	122.18	ef	± 11.41
22	122.81	ef	± 4.60
80	205.42	f	± 24.31

† Medias de volumen con letra diferente son significativamente diferentes ($p < 0.05$, $\alpha = 0.05$ suma de rangos de Wilcoxon).

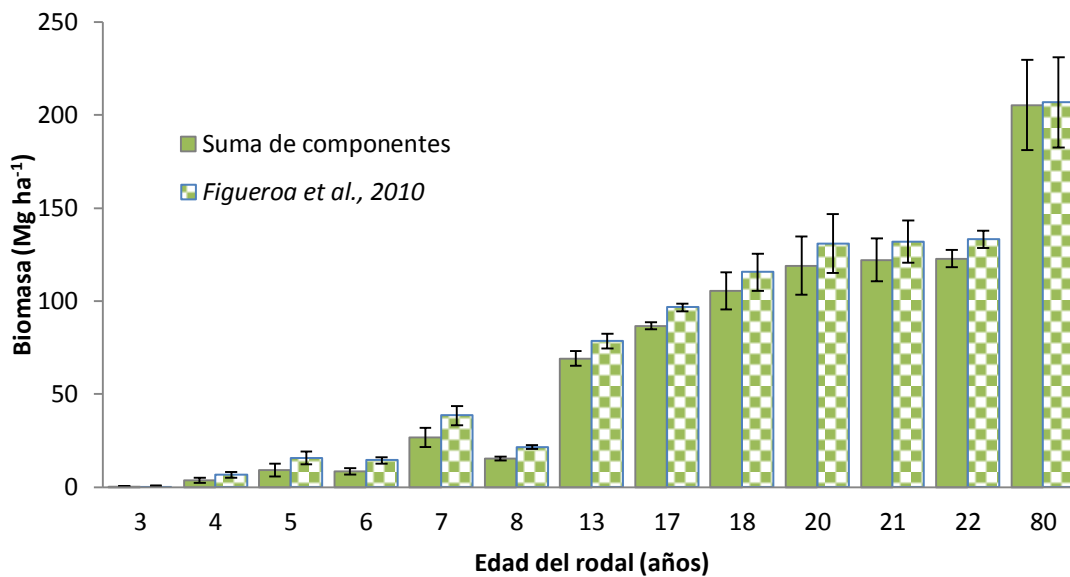


Figura 3.5. Biomasa aérea total en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.

La cantidad de biomasa aérea en el rodal de 7 años edad es mayor que en uno de mayor edad. A pesar de tener mayor edad, esta última se ubica en un área donde la regeneración natural se presentó con una densidad baja. La biomasa aérea de *P. patula* en el rodal de 21 años es muy similar que la biomasa en el rodal de 22 años. A pesar de que con una mayor edad el rodal debería presentar mayor biomasa, esta cantidad puede ser atribuido a los aclareos aplicados en dicho rodal donde se encontraron tocones cuyos diámetros indican aclareo reciente.

Las diferencias de productividad de biomasa entre especies de pino e incluso para la misma especie en México son notables. En rodales de *Pinus teocote* de 50 años se ha reportado una biomasa de 98.39 y de 145.35 Mg ha⁻¹ para rodales de 35 años de *Pinus pseudostrobus* con incrementos medios anuales de biomasa para ambas especies a la edad base de 50 años e igual índice de sitio, de 4.35 y 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente (Aguirre y Jiménez, 2011). En este trabajo la producción de biomasa a la edad de 22 años es mayor al reportado para las especies anteriores, 122.81 (± 4.60) Mg ha⁻¹ con un incremento medio anual de 5.6 Mg ha⁻¹ año⁻¹ cercano al obtenido por Figueroa *et al.* (2010) de 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ a la misma edad de 22 años, lo que resalta la importancia de *P. patula* por su rápido crecimiento y acumulación de biomasa.

Por otra parte, a nivel mundial la cantidad de biomasa almacenada en los bosques manejados de coníferas dada a conocer por diferentes estudios también es muy variable. En rodales de pino coreano (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) de 11 a 20 años de edad la biomasa aérea estimada fue de 52.3 y de 317.9 Mg ha⁻¹ en rodales de 71 a 80 años de edad (Son *et al.*, 2001). En rodales de *Pinus densiflora* en el centro de Corea la biomasa aérea estimada fue de 21.76 Mg ha⁻¹ en un rodal de 17 de años de edad y de 308.83 Mg ha⁻¹ en el rodal de 73 años de edad (Li *et al.*, 2013). En otros ecosistemas de bosques mixtos se han reportado valores de 93.91 a 99.84 Mg ha⁻¹ en bosques de pino-encino (*Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus* spp.) y de 132.85 Mg ha⁻¹ en bosques de encino-pino (*Quercus* spp. y *Pinus teocote*) (Silva y Návar, 2010; Aguirre y Jiménez, 2011).

Con relación al área natural donde la biomasa fue de 205.4 (± 24.3) Mg ha⁻¹, la presencia de un mayor número de individuos con diámetros de 5 a 7.5 cm. en el estrato arbustivo respecto de los rodales manejados es evidente. Aquí los factores que influyen en la cantidad de carbono de la parte aérea son la edad, la densidad y la mezcla de especies (Figueroa *et al.*, 2010). El rodal de mayor edad fue de sólo 22 años lo que no permitió obtener la biomasa en rodales de mayor edad, sin embargo las estimaciones exponen que con 20 años de edad del rodad, la cantidad de biomasa es más de la mitad que la contenida en el bosque natural de aproximadamente 80 años de edad. Para la especie se ha estimado de 166.60 a 203.57 Mg ha⁻¹ (Cruz, 2007b; Figueroa *et al.*, 2010) lo que sugiere que el bosque manejado puede acumular la misma cantidad de biomasa a una edad menor a 30 años. Consistente con lo anterior, trabajos previos han concluido que bosques manejados de manera sostenible pueden acumular mayor biomasa que los bosques naturales (Son *et al.*, 2001; Návar *et al.*, 2005; Figueroa, *et al.*, 2010; Nunery y Keeton, 2010) lo que representa una ventaja comparativa en el mecanismo REDD+.

La biomasa aérea varía en función de un gran número de variables entre las que destacan por su importancia el tipo de prescripción silvícola aplicada (Avendaño *et al.*, 2009). En la especie de estudio se han encontrado incrementos en el crecimiento en diámetro y en la biomasa cuando el árbol crece asociado con especies fijadoras de nitrógeno (Gutiérrez *et al.*, 2004). Existen otros factores que afectan la acumulación de biomasa como la composición florística, la densidad de población, el sitio, las condiciones climáticas, el tratamiento silvícola, la pendiente, la altitud, la exposición, la densidad del rodal, la variación genética y la edad (Schulze *et al.*, 2000; Acosta *et al.*, 2002; Cruz, 2007b; Avendaño *et al.*, 2009).

Se ha resaltado el manejo forestal como una estrategia importante de mitigación de carbono. El manejo forestal comunitario es especialmente eficaz porque ofrece beneficios locales tangibles permitiendo la conservación de bosques y almacenamiento de carbono, adecuadamente diseñado e implementado puede evitar la deforestación y restaurar la cobertura forestal y la densidad de los bosques

(Klooster y Masera 2000). Donde la venta de carbono forestal podría generar recursos locales adicionales.

La edad ha sido uno de los factores específicos del sitio al que se ha prestado menos atención en los estudios de biomasa (Helmisaari *et al.*, 2002). Sin embargo, en este estudio se puede observar que la asignación de biomasa a los componentes del árbol y la biomasa total varía en función de la etapa de desarrollo del rodal.

3.4.4. Acumulación de carbono por componente estructural y total

La evaluación de carbono en las distintas anualidades del bosque manejado presentó diferencias importantes. La mayor contribución de carbono fue aportado por la especie de *Pinus patula* cuyos valores oscilaron de 0.02 Mg ha⁻¹ en el rodal de 3 años a 58.57 Mg ha⁻¹ en el rodal de 22 años y solo una baja proporción de carbono está contenida en especies de latifoliadas (Cuadro 3.11). El manejo forestal ha modificado la estructura y diversidad de los bosques como consecuencia de los tratamientos silvícolas propiciando rodales coetáneos de dicha especie. Estas modificaciones varían en función de la etapa de desarrollo y es importante considerarlas para entender el funcionamiento del ecosistema. En bosques manejados de *P. patula*, esta especie es la más abundante al ocupar mayor área basal y en consecuencia presentar mayor contribución en carbono; el grado de mezcla de las especies avanza progresivamente conforme la etapa de desarrollo avanza (Castellanos *et al.*, 2008).

Cuadro 3.11. Carbono almacenado por componente estructural de *Pinus patula* y latifoliadas en el ejido Tzincoatlán, Hidalgo.

Edad de rodal	Carbono en <i>Pinus patula</i> (Mg ha ⁻¹)					Carbono en latifoliadas (Mg ha ⁻¹)					Carbono aéreo Total (Mg ha ⁻¹)	
	Follaje	Ramas	Fuste	Corteza	SubTotal	Follaje	Ramas	Fuste	Corteza	SubTotal		
3	0.00	0.00	0.01	0.00	0.02	0.03	0.04	0.10	0.02	0.18	0.20	± 0.16
4	0.09	0.15	0.53	0.05	0.81	0.11	0.29	0.55	0.09	1.03	1.85	± 0.69
5	0.30	0.58	2.14	0.22	3.23	0.11	0.43	0.67	0.11	1.31	4.54	± 1.74
6	0.29	0.59	2.24	0.23	3.36	0.09	0.27	0.49	0.08	0.95	4.30	± 0.84
7	0.91	2.24	9.03	0.98	13.17	0.03	0.04	0.11	0.02	0.20	13.37	± 2.61
8	0.33	0.83	3.39	0.37	4.92	0.25	0.82	1.46	0.25	2.79	7.71	± 0.50
13	1.38	5.32	24.84	3.06	34.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	34.60	± 2.03
17	1.51	6.34	30.47	3.85	42.17	0.18	0.26	0.62	0.11	1.17	43.34	± 0.97
18	1.62	7.07	34.44	4.40	47.53	0.25	2.04	2.56	0.41	5.25	52.78	± 4.97
20	1.74	7.94	39.34	5.10	54.12	0.49	1.56	2.83	0.48	5.36	59.48	± 7.86
21	1.62	8.24	42.28	5.64	57.79	0.27	1.02	1.70	0.29	3.28	61.07	± 5.70
22	1.73	8.45	42.75	5.64	58.57	0.22	0.89	1.46	0.24	2.82	61.39	± 2.30
80	0.44	2.87	16.12	2.33	21.76	4.63	30.64	38.52	6.20	79.98	101.74	± 12.15

Los árboles son el componente de la parte aérea que más carbono aportan (Acosta *et al.*, 2009). En los bosques manejados la mayor contribución de carbono lo aporta el fuste (70% en promedio), seguido de ramas (16%) y finalmente el follaje en promedio aporta el 6% de la biomasa total. Valores similares se han reportado para esta especie de 72.2 a 82 % en el fuste, 8.6 a 10% en ramas y 2.4 a 5% en follaje (De los Santos *et al.*, 1993; Castellanos *et al.*, 1996; Díaz *et al.*, 2007; Figueroa *et al.*, 2010). Sin embargo esta proporción se modificó en función de la edad del rodal. Con el aumento de la edad del árbol las porciones de biomasa en el fuste y corteza incrementan, y por otro lado la proporción en follaje y ramas disminuyeron (Figura 3.6), este mismo patrón de distribución ha sido observado en coníferas en varios trabajos (Son *et al.*, 2001; Helmisaari *et al.*, 2002; Peichl and Arain, 2007; Seo *et al.*, 2013). Esta tendencia ocurre porque la producción de este componente se modifica con el tamaño del árbol, lo que es causado por el gasto fisiológico que implica mantener el follaje que no aporta ganancias netas positivas de fotosíntesis (Figueroa *et al.*, 2010). Sin embargo es en el follaje donde se presenta la mayor concentración de carbono respecto a los otros componentes estructurales (Li *et al.*, 2013).

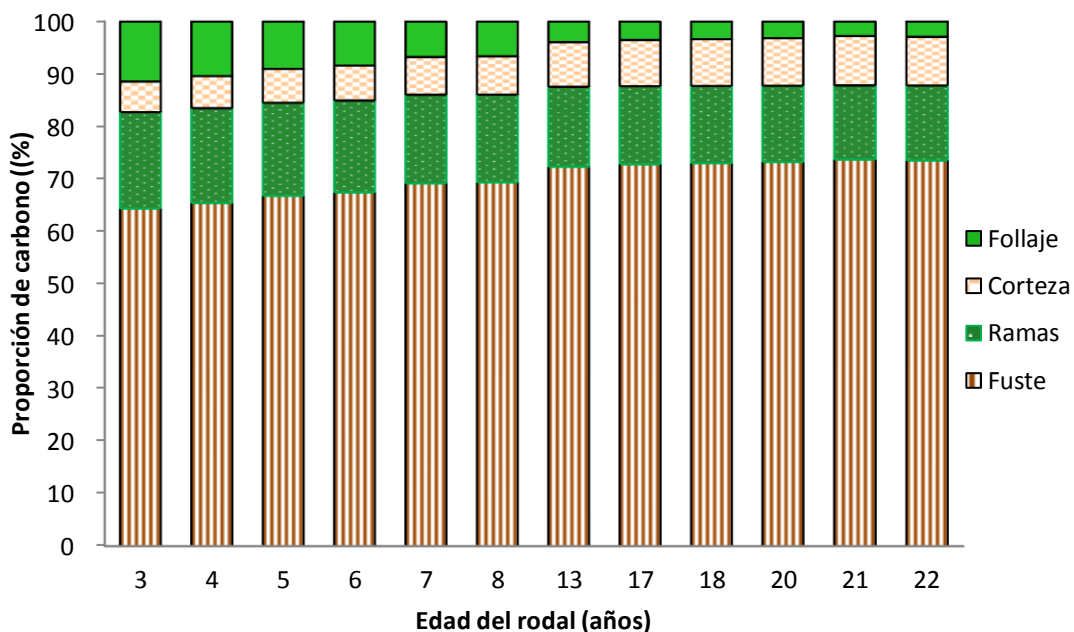


Figura 3.6. Proporción de carbono aéreo almacenado por componente en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.

Los valores de carbono más bajos se observaron en los rodales de 3 a 8 años ($< 13 \text{ Mg ha}^{-1}$), donde la vegetación es escasa debido a la reciente cosecha por las actividades programadas de manejo forestal orientado a generar masas coetáneas (Ángeles *et al.*, 2005). Los valores más altos se presentan en los rodales de 21 y 22 años con 61.07 y 61.39 Mg ha^{-1} de carbono respectivamente. Los resultados son similares a los reportados por Aguirre *et al.* (2009) para un bosque manejado de la misma especie cercano al área de estudio, donde el carbono almacenado en los rodales de 8 años fue de 47.09 y en rodales de mayor edad (20-24 años de edad) fue mayor a 55 Mg ha^{-1} . Por su parte, Figueroa (2010) estimó 35.05 Mg ha^{-1} en bosques manejados a la edad de 8 años y 76.77 Mg ha^{-1} a la edad de 22 años. Mientras que en plantaciones de *Pinus patula* se estima existen 48.6 y 287 Mg ha^{-1} a las edades de 6 y 29 años respectivamente (Gutiérrez y Lopera, 2001).

De manera general el carbono incrementó en forma directa con la etapa de desarrollo del rodal (Figura 3.7). La influencia del desarrollo de un rodal arbóreo en el contenido de carbono es notable, en el trabajo de Taylor *et al.*, (2007), con 24 poblaciones canadienses de *Picea rubens*, en una cronosecuencia de 140 años, se usa una función logística con cuatro parámetros no lineales para ajustar el contenido en carbono de cada sitio. La cantidad de carbono almacenado sigue un patrón sigmoideal, aumentando desde 94.40 Mg ha^{-1} para la clase de menor edad hasta un máximo de 247 Mg C ha^{-1} para la clase de edad entre 81 y 100 años. Las existencias de carbono reportadas para *Pinus densiflora* incrementaron de 19.40 Mg ha^{-1} en rodales de 17 años de edad a $162.72 \text{ Mg ha}^{-1}$ en rodales de 73 años de edad (Li *et al.*, 2013). Por lo que la proyección de los resultados en los planes de manejo forestal en el contexto de los bosques como potenciales sumideros de carbono es importante (Pardos, 2010).

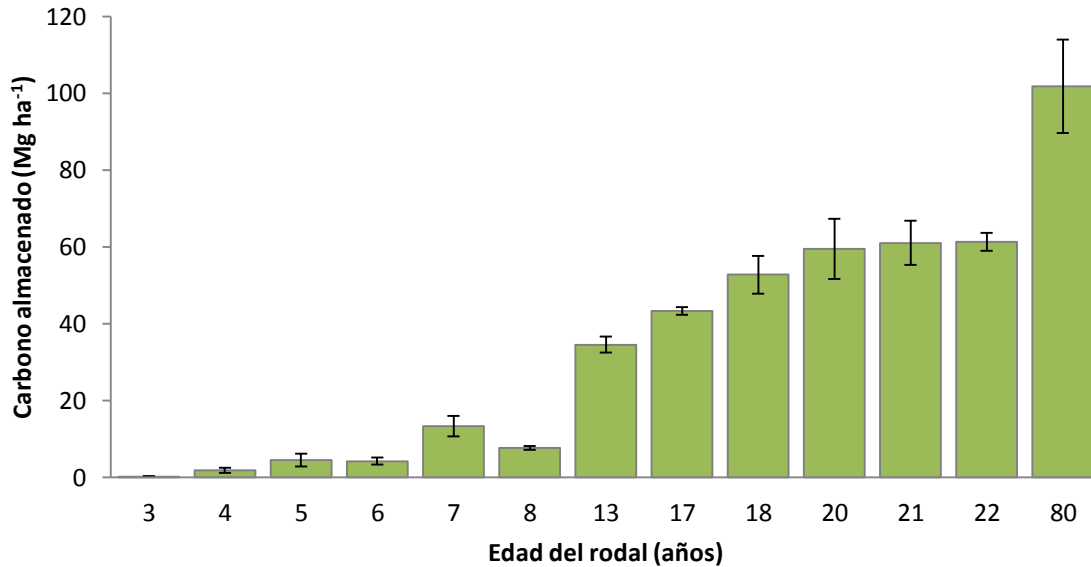


Figura 3.7. Carbono aéreo total en rodales del bosque manejado del Ejido Tzincoatlán.

Las diferencias de la acumulación de carbono entre especies de pino y para diversos ecosistemas en México son notables. En bosques de *Pinus patula* se ha reportado 45.3 Mg ha⁻¹ y en bosque de *Pinus patula* mixtos (pino-encino-hojosas) se ha reportado contenidos de C en el estrato aéreo de 89.1 Mg ha⁻¹. En otras especies de *Pinus* se han reportados valores inferiores a los encontrados para esta especie. Por ejemplo, para rodales de *Pinus pseudostrobus* de 35 años con índice de sitio 21 se reportan 73.18 a 74 Mg ha⁻¹ en sur de Nuevo León y Michoacán, respectivamente (Ordóñez *et al.*, 2001; Aguirre y Jiménez, 2011). En un bosque de pino-encino con presencia de *Pinus pseudostrobus*, *P. teocote* y *Quercus* spp. el carbono estimado fue de 45.24 Mg ha⁻¹ y en un bosque de encino-pino (*Quercus* spp. y *Pinus teocote*) el carbono aéreo fue de 64.20 Mg ha⁻¹ (Aguirre y Jiménez, 2011). Xiao *et al.* (2003) estimaron carbono en bosques templados de *Pinus silvestris* y *Fagus* spp., en 176 Mg ha⁻¹ en rodales de 73 años.

En el área natural, cuya edad es de 80 años, el carbono aéreo estimado fue de 101.74 ±12.15 Mg ha⁻¹. Valores reportados para ese tipo de vegetación son variables, de 93.2 Mg ha⁻¹ para la región Mazateca y 30.5 Mg C ha⁻¹ para la región Cuicateca, las dos dentro del bosque mesófilo de montaña en la sierra norte de

Oaxaca (Acosta, 2003). En otro estudio se reporta carbono almacenado en los fustes de los árboles de $56.7 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Rodríguez *et al.*, 2006) en la reserva de la biosfera El Cielo, al sur de Tamaulipas.

La edad del bosque es una fuente muy importante de la variabilidad en los almacenes de carbono y se presume que a mayor edad el contenido de carbono es mayor, sin embargo la edad del bosque se ve afectada por las perturbaciones del ecosistema como los incendios forestales, cosecha o plagas (Pregitzer y Euskirchen, 2004). En este caso se observaron evidencias de incendios por corteza quemada en los árboles de los sitios muestreados. Está claro que una mejor comprensión de cómo la edad del bosque y la perturbación histórica interactúan hará mejorar en gran medida el conocimiento fundamental del ciclo del carbono terrestre.

Las estimaciones indican que con 20 años de edad del rodal, la cantidad de carbono aéreo es más de la mitad que la contenida en el bosque natural de aproximadamente 80 años de edad. De tal manera que a los 40 años, podría igualar los almacenes de biomasa y carbono contenidos en el bosque natural. Algunos investigadores han sugerido que los bosques manejados de manera sostenible fijan más carbono que los bosques no manejados (Nunery y Keeton, 2010), haciendo hincapié en las altas tasas de crecimiento de los árboles obtenidos en rodales cosechados (Ruddell *et al.*, 2007), y el C almacenado en los productos maderables (Malmsheimer *et al.*, 2008). Návar *et al.* (2005) en un estudio en el norte de México (Durango) concluyeron que la vegetación de los sitios reforestados con especies del género *Pinus* está fijando bióxido de carbono a tasas diferenciales explicadas por la densidad, las especies, el micrositio, el clima y la edad, y que a tasa de fijación es mayor en los sitios reforestados que en los bosques nativos.

Los resultados de este estudio ayudan a comprender el almacenamiento C y su cambio con el desarrollo del rodal en los bosques manejados de *P. patula*, Lo que evidencia que el manejo sostenible de los bosques de esta especie pueden representar un gran sumidero de carbono atmosférico a escala regional.

3.5. CONCLUSIONES

La biomasa aérea total en el bosque manejado de *Pinus patula* osciló de 0.40 (± 0.32 Mgha⁻¹) en el rodal de 3 años de edad a 122.81 Mgha⁻¹ (± 4.60) Mgha⁻¹ en el rodal de 22 años. Las estimaciones de biomasa revelan la variabilidad y el potencial productivo del rodal en las diversas edades de análisis.

Los valores de carbono más bajos se observaron en los rodales de 3 a 8 años (< 13 Mg ha⁻¹), donde la vegetación es escasa debido a la reciente cosecha por las actividades programadas de manejo forestal orientado a generar masas coetáneas; mientras que los valores más altos se presentan en los rodales de 21 y 22 años con 61.07 y 61.39 Mg ha⁻¹ de carbono, respectivamente. En el área natural, cuya edad aproximada es de alrededor de 80 años el carbono aéreo estimado fue de 101.74 (± 12.15) Mg ha⁻¹. Por tanto, los resultados de este estudio ayudan a comprender el almacenamiento carbono y su cambio con el desarrollo del rodal en los bosques manejados de *P. patula*, lo que evidencia que el manejo sostenible de los bosques de esta especie pueden representar un gran sumidero de carbono atmosférico a escala regional.

CAPÍTULO IV

DISCUSIÓN GENERAL

La mayor proporción de biomasa en los árboles de *Pinus patula* muestreados se concentró en el fuste. En promedio el fuste contiene 68.2 %, las ramas representan una proporción de 14.3 %, seguido de la corteza y el follaje que representan el 9.3 y 8.2% respectivamente, de la biomasa total. Cifras similares fueron reportadas para la región por Cruz (2007) y Figueroa *et al.* (2010). De manera similar en los árboles de latifoliadas la mayor proporción de biomasa se concentró en el fuste con un 49.1%, sin embargo este porcentaje es menor al encontrado para árboles de *P. patula*. En contraste las latifoliadas asignan mayor proporción de biomasa a ramas (38%) que en *P. patula* (14.3%) y una menor distribución en follaje (4.1%). En corteza las latifoliadas destinan menor proporción de biomasa comparada con *P. patula* (8 % contra 9.3 % respectivamente). Esta variación entre grupos es atribuible a las diferencias entre las funciones fisiológicas y morfológicas de los grupos definidos (Cruz, 2007).

La función de volumen ajustada para *Pinus patula* es el modelo tipo Fang *et al.* (2000). Complementar los datos con arbolado grande mejoró sustancialmente el modelo respecto de los generados por Carrillo *et al.* (2004) y Hernández *et al.* (2013). El factor de expansión de biomasa (FEB) para *Pinus patula* que relacionan biomasa de fuste con la biomasa total variaron de 2.356 a 1.107, disminuyendo en proporción inversa al tamaño del diámetro. Los resultados obtenidos son similares a otros estudios en especies de coníferas. Con el aumento de las dimensiones del árbol e incluso de la edad del árbol el FEB disminuye presentando diferencias estadísticas entre clases de diámetro y edad (Peichl y Arain, 2007; Lim *et al.*, 2013; Seo *et al.*, 2013).

El valor promedio del FEB fue de 1.353, valor cercano al promedio reportado para *Pinus pseudostrobus* (1,373) y para *Pinus teocote* (1,394) (Domínguez *et al.*, 2009).

El FEB varía entre especies y también lo hace dentro de la misma especie pues varía debido a la estructura del rodal (Lehtonen *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2007) y las condiciones del sitio (Teobaldelli *et al.*, 2009). De aquí la importancia de contar con FEB con parámetros afines a los árboles, los rodales y las estaciones, lo que podría favorecer el cálculo de los almacenes de carbono (Gracia *et al.*, 2004; Lehtonen *et al.*, 2004). Los factores de expansión de biomasa dependen fuertemente de diversas variables; sin embargo, en lugares donde no se cuenta con ecuaciones de biomasa, los FEB son una buena alternativa que facilitan los cálculos de biomasa a partir de las existencias reales en un bosque.

Los modelos para estimar biomasa por componente estructural en árboles de *Pinus patula* y latifoliadas que mejor ajuste presentaron fueron aquellos que incluyeron a la altura del árbol en la ecuación. Con la inclusión de la altura del árbol, la información sobre el entorno competitivo (la edad del rodal, índice de sitio, densidad) se considera indirectamente en el modelo (Wirth *et al.*, 2004). Este hecho hace que el modelo sea más general y permite el uso de la ecuación para diferentes sitios (Ketterings *et al.*, 2001). Desarrollar modelos específicos de las especies dominantes en los bosques facilita el estudio para proyectos de investigación ecológicos y de silvicultura, como inventarios detallados de biomasa y carbono almacenado en los árboles (Wang, 2006; Gómez *et al.*, 2011).

Las estimaciones de biomasa revelan la variabilidad y el potencial productivo del rodal en las diversas edades de análisis. Los valores de biomasa más bajos se observaron en los rodales jóvenes (1-8 años), en contraste, en los rodales de mayor edad (18-22 años de edad) los valores de biomasa fueron mayores a 100 Mg ha⁻¹. Por otra parte en el bosque sin intervenir la biomasa promedio fue de 205.4 Mg ha⁻¹ con mayor variabilidad entre los sitios muestreados (± 24.3 Mg ha⁻¹) respecto del bosque manejado. A pesar de que el bosque natural es casi 3 veces mayor que el rodal más viejo, no se encontraron diferencias estadísticas (P=0.0033) entre éste y los rodales de mayor edad (17, 18, 20, 21 y 22 años).

Los valores de carbono más altos se presentan en los rodales de 21 y 22 años con 61.07 y 61.39 Mg ha⁻¹ de carbono respectivamente. Los resultados son similares a los reportados por Aguirre *et al.* (2009) para un bosque manejado de la misma especie cercano al área de estudio, donde el carbono almacenado en los rodales de 8 años fue de 47.09 y en rodales de mayor edad (20-24 años de edad) fue mayor a 55 Mg ha⁻¹. Por su parte, Figueroa (2010) estimó 35.05 Mg ha⁻¹ en bosques manejados a la edad de 8 años y 76.77 Mg ha⁻¹ a la edad de 22 años. Mientras que en plantaciones de *Pinus patula* se estima existen 48.6 y 287 Mg ha⁻¹ a las edades de 6 y 29 años respectivamente (Gutiérrez y Lopera, 2001).

Los árboles son el componente de la parte aérea que más carbono aportan (Acosta *et al.*, 2009). En los bosques manejados la mayor contribución de carbono lo aporta el fuste (70 % en promedio), seguido de ramas (16%) y finalmente el follaje en promedio aporta el 6 % de la biomasa total. Valores similares se han reportado para la especie de 72.2 a 82 % en el fuste, 8.6 a 10 % en ramas y 2.4 a 5 % en follaje (De los Santos *et al.*, 1993; Castellanos *et al.*, 1996; Díaz *et al.*, 2007; Figueroa *et al.*, 2010); sin embargo esta proporción se modificó en función de la edad del rodal. Con el aumento de la edad del árbol las porciones de biomasa en el fuste y corteza incrementan, y por otro lado la proporción en follaje y ramas disminuyeron. Este patrón de distribución ha sido observado en coníferas en varios trabajos (Son *et al.*, 2001; Helmisaari *et al.*, 2002; Peichl y Arain, 2007; Seo *et al.*, 2013). Esta tendencia ocurre porque la producción de este componente se modifica con el tamaño del árbol, lo que es causado por el gasto fisiológico que supone mantener el follaje que no aporta ganancias netas positivas de fotosíntesis (Figueroa *et al.*, 2010). Sin embargo es en el follaje donde se presenta la mayor concentración de carbono respecto a los otros componentes estructurales (Li *et al.*, 2013).

Las estimaciones indican que con 20 años de edad del rodal, la cantidad de carbono aéreo es más de la mitad que la contenida en el bosque natural de aproximadamente 80 años de edad. De tal manera que a los 40 años, podría igualar los almacenes de biomasa y carbono contenidos en el bosque natural. Algunos investigadores han

sugerido que los bosques manejados de manera sostenible fijan más carbono que los bosques no manejados (Nunery y Keeton, 2010), haciendo hincapié en las altas tasas de crecimiento de los árboles obtenidos en rodales cosechados (Ruddell *et al.*, 2007), y el C almacenado en los productos maderables (Malmshemer *et al.*, 2008). Los resultados de este estudio ayudan a comprender el almacenamiento C y su cambio con el desarrollo del rodal en los bosques manejados de *P. patula*, lo que evidencia que el manejo sostenible de los bosques de esta especie pueden representar un gran sumidero de carbono atmosférico a escala regional.

CAPÍTULO V

LITERATURA CITADA

- Acosta, M., K. Quednow, J. Etchevers, y C. Monreal. 2001. Un método para la medición del Carbono almacenado en la parte aérea de sistemas con vegetación natural e inducida en terrenos de ladera en México. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en ecosistemas forestales. 18-20 de Octubre de 2001. Valdivia-Chile.
- Acosta M., M. 2003. Diseño y aplicación de un método para medir los almacenes de carbono en sistemas con vegetación forestal y agrícolas de ladera en México. Tesis Doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 99 p.
- Acosta M., M., F. Carrillo A., y M. Díaz L. 2009. Determinación del carbono total en bosques mixtos de *Pinus patula* Schl. et Cham. *Terra Latinoamericana* 27(2): 105-114.
- Acosta M., M., F. Carrillo A., y R. G. Gómez V. 2011. Estimación de biomasa y carbono en dos especies de Bosque Mesófilo de Montaña. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(4): 529-543.
- Acosta M., M., J. Vargas H., A. Velázquez M., y J. Etchevers B. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca. México. *Agrociencia* 36 (6): 725–736.

- Aguirre C., O. A., J. Jiménez P., H. Kramer y A. Akça. 2003. Análisis estructural de ecosistemas forestales en el Cerro del Potosí, Nuevo León, México. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León*. 6(2): 219-225.
- Aguirre C., O. A., y J. Jiménez P. 2011. Evaluación del contenido de carbono en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*. 2(6): 73-84.
- Aguirre C., O. A., J. Jiménez P., y B. Meraz A. 1995. Optimización de inventarios para manejo forestal: Un caso de estudio en Durango, México. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales* 4(1): 107-118.
- Aguirre C., O. A., J. Jiménez P., E. J. Treviño G., y B. Meraz A. 1997. Evaluación de diversos tamaños de sitio de muestreo en inventarios forestales. *Madera y Bosques* 3(1): 71-79.
- Aguirre S., C. A. 2007. Almacenamiento de Carbono en bosques manejados de *Pinus patula*: Estimación mediante percepción remota. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 98 p.
- Aguirre S., C. A., J. R. Valdez L., G. Ángeles P., H. M. De Los Santos P., R. Haapanen, y A. I. Aguirre S. 2009. Mapeo de carbono arbóreo aéreo en bosque de Pino *patula* en Hidalgo, México. *Agrociencia*. 43(2): 209-220.
- Alcántara A., O., e I. Luna V. 2001. Análisis florístico de dos áreas con bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo, México: Eloxochitlán y Tlahuelompa. *Acta Botánica Mexicana* 54: 51-87.
- Álvarez G., S. 2009. Optimización de la planificación forestal considerando la captura de carbono en bosque de pino-encino de la Sierra Juárez, Oaxaca (México). Universidad Politécnica de Madrid. 208 p.
- Álvarez, S., y A. Rubio. 2013. Línea base de carbono en bosque mixto de pino-encino de la Sierra Juárez (Oaxaca, México). Aplicación del modelo CO2FIX V.3.2. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. 19(1): 125-137.
- Ángeles P., G. 1995. Efecto de la vegetación competidora en el desarrollo inicial de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 114 p.

- Antonio, N., M. Tomé, J. Tomé, P. Soares, and L. Fontes. 2007. Effect of the tree, stand and site variables of the allometry of *Eucalyptus globulus* tree biomass. *Canadian Journal of Forest Research* 37(5): 895-906.
- Arteaga M., B. 2003. Evaluación dasométrica de una plantación de *Pinus* spp. *Foresta Veracruzana* 5(1): 27-32.
- Avendaño H., D. M., M. Acosta M., F. Carrillo A., y J. D. Etchevers B. 2009. Estimación de biomasa y carbono en un bosque de *Abies religiosa*. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32(3): 233-238.
- Avilés H., V. 2005. Reservas de carbono en una toposecuencia en el bosque de *Fagus grandifolia* subsp. Mexicana. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 100 p.
- Bailey R., L. 1995. Upper-stem volumes from stem-analysis data: An overlapping bolts method. *Canadian Journal of Forest Research* 25: 170-173.
- Balderrama, S., C. Luján Á., G. Hernández, y L. U. Castruita. 2008. Captura de carbono en bosque de coníferas de la Sierra Tarahumara en Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 4(2): 203-214.
- Bautista H., J., y J. A. Torres P. 2003. Valoración económica del almacenamiento de carbono del bosque tropical del ejido Noh Bec, Quintana Roo, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 9(1): 69-75.
- Bi, H., J. Turner, and M. J. Lambert. 2004. Additive biomass equations for native eucalypt forest trees of temperate Australia. *Trees* 18: 467-479.
- Birdsey, R., G. Angeles P., W. A. Kurz, A. Lister, M. Olguin, Y. Pan, C. Wayson, B. Wilson, and K. Johnson. 2013. Approaches to Monitoring Changes in Carbon Stocks for REDD+. *Carbon Management* 4(5): 519-537.
- Carrillo A., F., M. Acosta M., y G. Tenorio G. 2004. Tabla de volumen para *Pinus patula* Schl. et Cham. en el Estado de Hidalgo. Folleto Técnico No. 2 INIFAP-SAGARPA. 16 p.
- Carvalho, J. P., and B. R. Parresol. 2003. Additivity in tree biomass components of Pyrenean oak (*Quercus pyrenaica* Willd). *Forest Ecology and Management* 179: 269-276.

- Castañeda M., A., J. Vargas H., A. Gómez G., J. I. Valdez H., y H. Vaquera H. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia*. 39:107-116.
- Castellanos B., J. F. 1993. Producción de biomasa y eficiencia de crecimiento en rodales coetáneos de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 75 p.
- Castellanos B., J. F., A. Velázquez M., J. Vargas H., C. Rodríguez F., y A. Fierros G. 1996. Producción de biomasa en un rodal de *Pinus patula*. *Agrociencia* 30: 123-128.
- Castellanos B., J. F., E. J. Treviño G., O. A. Aguirre C., J. Jiménez P., M. Musalem S., y R. López A. 2008. Estructura de bosques de pino pátula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2): 51-63.
- Clutter, J. L., J. C. Forston, L.V. Pienaar, G. H. Brister, and R. L. Bailey. 1983. *Timber Management a Quantitative Approach*. John Wiley & Sons Inc. USA. 333 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal). 2010. *Visión de México sobre REDD+*. Una estrategia nacional. Jalisco, México. 57 p.
- CONAFOR (Comisión Nacional Forestal) – SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2011. *Inventario nacional forestal y de suelos. Manual y procedimientos para el muestreo de campo. Re-muestreo 2011*. Jalisco, México. 140 p.
- Corral R., J. J., M. Barrio A., A. O. Aguirre C., and U. Diéguez A. 2007. Use of stump diameter to estimate diameter at breast height and tree volume for major pine species in El Salto, Durango (México). *Forestry* 80: 29-40.
- Cruz C., F. 2007a. Modelos de volumen y crecimiento en altura dominante para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 78 p.
- Cruz C., F., H. M. De los Santos P., y J. R. Valdez L. 2008. Sistema compatible de ahusamiento-volumen para *Pinus cooperi* Blanco en Durango, México. *Agrociencia* 42: 473-485.
- Cruz L., I. A., J. R. Valdez L., G. Ángeles P., y H. M. de los Santos P. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques

- manejados de *Pinus patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16(3): 75-97.
- Cruz L., I. A. 2008. Modelado espacial de los recursos forestales en el Ejido de Atopixco, Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 116 p.
- Cruz M., Z. 2007b. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México. 39 p.
- Cutini, A., F. Chianucci, and M. C. Manetti. 2013. Allometric relationships for volume and biomass for stone pine (*Pinus pinea* L.) in Italian coastal stands. *iForest-Biogeosciences and Forestry* 6(6): 331-337.
- Dalla S., G., A. Martínez M., H. Cochard, and P. Rozenberg. 2009. Variation of wood density and hydraulic properties of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) clones related to a heat and drought wave in France. *Forest Ecology and Management* 257(1): 182–189.
- De los Santos, H., A. Velázquez y H. Ramírez M. 1993. Modelos de crecimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula* Schl. et Cham. aclareados a diferentes intensidades. *In: Memoria de Resúmenes del Congreso Mexicano sobre Recursos Forestales*. Saltillo, Coahuila. México. 44 p.
- De-Miguel, S., T. Pukkala, N. Assaf, and Z. Shater. 2014. Intra-specific differences in allometric equations for aboveground biomass of Eastern Mediterranean *Pinus brutia*. *Annals of Forest Science* 71(1): 101-112.
- Díaz F., R., M. Acosta M., F. Carrillo A., E. Buendía R., E. Flores A., y J. D. Etchevers B. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y Bosques* 13(1): 25-34.
- Diéguez A., U., M. Barrio A., F. Castedo D., y M. Balboa M. 2003. Estimación del diámetro normal y del volumen del tronco a partir de las dimensiones del tocón para seis especies forestales comerciales de Galicia. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12: 131-139.
- DigitalGlobe, Inc. 2006. Imágenes satelitales GeoTIFF 2006-11-28. Longmont, CO; USA.

- Domínguez C., G.; O. A. Aguirre C., J. Jiménez P., R. Rodríguez L., y J. A. Díaz, B. 2009. Biomasa aérea y factores de expansión de especies arbóreas en bosques del sur de Nuevo León. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 59-64.
- Fang, Z., B. E. Borders, and R. L. Bailey. 2000. Compatible volume-taper models for loblolly and slash pine based on a system with segmented-stem form factors. *Forest Science* 46: 1-12.
- Feldpausch, T. R., J. Lloyd, S. L. Lewis, R. J. W. Brienen, M. Gloor, A. Monteagudo M., G. Lopez G., L. Banin, K. Abu Salim, K. Affum-Baffoe, M. Alexiades, S. Almeida, I. Amaral, A. Andrade, L. E. O. C. Aragão, A. Araujo M., E. J. M. M. Arets, L. Arroyo, G. A. Aymard C., T. R. Baker, O. S. Bánki, N. J. Berry, N. Cardozo, J. Chave, J. A. Comiskey, E. Alvarez, A. de Oliveira, A. Di Fiore, G. Djangbletey, T. F. Domingues, T. L. Erwin, P. M. Fearnside, M. B. França, M. A. Freitas, N. Higuchi, E. Honorio C., Y. Iida, E. Jiménez, A. R. Kassim, T. J. Killeen, W. F. Laurance, J. C. Lovett, Y. Malhi, B. S. Marimon, B. H. Marimon-Junior, E. Lenza, A. R. Marshall, C. Mendoza, D. J. Metcalfe, E. T. A. Mitchard, D. A. Neill, B.W. Nelson, R. Nilus, E. M. Nogueira, A. Parada, K. S.-H. Peh, A. Pena C., M. C. Peñuela, N. C. A. Pitman, A. Prieto, C. A. Quesada, F. Ramírez, H. Ramírez A., J. M. Reitsma, A. Rudas, G. Saiz, R. P. Salomão, M. Schwarz, N. Silva, J. E. Silva E., M. Silveira, B. Sonké, J. Stropp, H. E. Taedoumg, S. Tan, H. ter Steege, J. Terborgh, M. Torello R., G. M. F. van der Heijden, R. Vásquez, E. Vilanova, V. A. Vos, L. White, S. Willcock, H. Woell, and O. L. Phillips. 2012. Tree height integrated into pantropical forest biomass estimates. *Biogeosciences* 9: 3381–3403.
- Figueroa N., C. 2010. Almacenamiento de carbono en bosques manejados de *Pinus patula* en el Ejido La Mojonera, Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 82 p.
- Figueroa N., C. M., G. Angeles P., A. Velázquez M., y H. M. De los Santos P. 2010. Estimación de Biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtián, Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1(1): 105-112.

- Figuroa N., C., J. D. Etchevers B., A. Velázquez M., y M. Acosta M. 2005. Concentración de carbono en diferentes tipos de vegetación de la Sierra norte de Oaxaca. *Terra* 2: 57-64.
- Franklin, J. F., T. A. Spies, R. Van Pelt, A. B. Carey, D. A. Thornburgh, D. R. Berge, D. B. Lindenmayer, M. E. Harmong, W. S. Keeton, D. C. Shawh, K. Bible, J. C. 2002. Disturbances and structural development of natural forest ecosystems with silvicultural implications, using Douglas-fir forests as an example. *Forest Ecology and Management* 155: 399-423.
- García, E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Quinta Edición. México. 90 p.
- Gayoso, J. 2002. Medición de la captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 53 p.
- Goche T., J. R. 2007. Influencia de los aclareos sobre la densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* Schl. et Cham. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 90 p.
- Goche T., J. R., A. Velázquez M., A. Borja R., J. Capulín G., y C. Palacios M. 2011. Variación radial de la densidad básica en *Pinus patula* Schltl. et Cham. de tres localidades en Hidalgo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 2(7): 71-78.
- Gómez D., J. D., J. D. Etchevers B., A. I. Monterroso R., J. Campo A., and J. A. Tinoco R. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 261-272.
- Goodale, C. L., M. J. Apps, R. A. Birdsey, C. B. Field, L. S. Heath, R. A. Houghton, J. C. Jenkins, G. H. Kohlmaier, W. Kurz, S. Liu, G.-J. Nabuurs, S. Nilson, and A. Z. Shvidenko. 2002. Forest carbon sinks in the Northern Hemisphere. 2002. *Ecological Applications* 12(3): 891-899.
- Gorte, R. W. 2009. Carbon Sequestration in Forests. Congressional Research Service. 23 p.

- Gracia, C., J. Vayreda, S. Sabaté, and J. Ibáñez. 2004. Main components of the aboveground biomass expansion factors. Departamento de Ecología, Universidad de Barcelona. CREAM, Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Barcelona, España. 24 p.
- Gregoire, T. G., and H. T. Valentine. 2008. Sampling Strategies for Natural Resources and the Environment. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, Florida. 474 p.
- Gutiérrez G., B., J. D. Etchevers B., A. Velázquez M. y J. Almaraz S. 2004. Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. Terra Latinoamericana 23: 89-96.
- Gutiérrez V., V. H., y G. J. Lopera. 2001. Metodologías para la cuantificación de existencias y flujo de carbono en plantaciones forestales. En memorias del simposium internacional medición y monitoreo de la captura de carbono en ecosistemas forestales, 18 al 20 de octubre del 2001. Valdivia-Chile, Resumen No.10.
- Helmisaari, H.-S., K. Makkonen, S. Kellomaki, E. Valtonen, and E. Malkonen. 2002. Below- and above-ground biomass, production and nitrogen use in Scots pine stands in eastern Finland. Forest Ecology and Management 165: 317–326.
- Hernández P., D. 2012. Modelos de volumen comercial variable para *Pinus patula* en Zacualtipán, Hidalgo. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 69 p.
- Hernández P., D., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., y V. H. Volke H. 2013. Funciones de ahusamiento y volumen comercial para *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. Revista Mexicana de Ciencias Forestales 4(16): 34-45.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001a. Subprovincias fisiográficas. Conjunto de Datos Vectoriales Fisiográficos. Escala 1:1'000,000. Serie I. Aguascalientes, México.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001b. Climas. Conjunto de Datos Vectoriales de unidades climáticas. Escala 1:1 000,000. Serie I. Aguascalientes, México.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2001c. Suelos. Conjunto de datos Vectoriales edafológicos. Escala 1:1 000,000. Serie I. Aguascalientes, México.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. Agriculture, forestry and other land use. Volume 4. *In: Guidelines for national greenhouse gas inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme.* Eggleston, H., L. Buendia , K. Miwa , T. Ngara, y K. Tanabe , (Ed.). Kanagawa, Japan. 196.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2008. Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático. Ginebra, Suiza. 104 p.
- Jenkins, J. C., D. C. Chojnacky, L. S. Heath, and R. A. Birdsey. 2003. National-scale biomass estimators for United States trees species. *Forest Science* 49: 12–35.
- Ketterings, Q. M., R. Coe, M. V. Noordwijk, Y. Ambagau, and C. A. Palm. 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: 199-209.
- Klooster, D. and O. Masera. 2000. Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change.* 10(4): 259-272.
- Le Quéré, C., G. P. Peters, R. J. Andres, R. M. Andrew, T. Boden, P. Ciais, P. Friedlingstein, R. A. Houghton, G. Marland, R. Moriarty, S. Sitch, P. Tans, A. Arneeth, A. Arvanitis, D. C. E. Bakker, L. Bopp, J. G. Canadell, L. P. Chini, S. C. Doney, A. Harper, I. Harris, J. I. House, A. K. Jain, S. D. Jones, E. Kato, R. F. Keeling, K. Klein Goldewijk, A. Körtzinger, C. Koven, N. Lefèvre, A.

- Omar, T. Ono, G.-H. Park, B. Pfeil, B. Poulter, M. R. Raupach, P. Regnier, C. Rödenbeck, S. Saito, J. Schwinger, J. Segschneider, B. D. Stocker, B. Tilbrook, S. van Heuven, N. Viovy, R. Wanninkhof, A. Wiltshire, S. Zaehle, and C. Yue. 2013. Global carbon budget. *Earth System Science Data Discuss* 6: 689–760.
- Lee, W. K., J. Seo H., M. Son Y., K. Lee H., and V. Gadow K. 2003. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. *Forest Ecology and Management* 172: 69-77.
- Lehtonen, A., E. Cienciala, F. Tatarinov, and R. Mäkipää. 2007. Uncertainty estimation of biomass expansion factors for *Norway spruce* in the Czech Republic. *Annals of Forest Science* 64: 133–140.
- Lehtonen, A., R. Mäkipää, J. Heikkinen, R. Sievänen, and J. Liski. 2004. Biomass expansion factors (BEF) for Scots pine, *Norway spruce* and birch according to stand age for boreal forests. *Forest Ecology and Management* 188: 211–224.
- Levy, P. E., S. E. Hale, and B. C. Nicoll. 2004. Biomass expansion factors and root:shoot ratios for coniferous tree species in Great Britain. *Forestry* 77: 421–430.
- Li, X., Y. M. Son, K. H. Lee, R. H. Kim, G. Jin, Y. Son, P. S. Park, and M. J. Yi. 2013. Biomass and carbon storage in an age-sequence of Japanese red pine (*Pinus densiflora*) forests in central Korea. *Forest Science and Technology* 9(1): 39-44.
- Lim, H., K.-H. Lee, K. H. Lee, and I. H. Park. 2013. Biomass expansion factors and allometric equations in an age sequence for Japanese cedar (*Cryptomeria japonica*) in southern Korea. *Journal of Forest Research* 18: 316–322.
- Litton, C. M., M. G. Ryan, D. B. Tinker, and D. H. Knight. 2003. Belowground and aboveground biomass in young postfire lodgepole pine forests of contrasting tree density. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 351–363.
- Losi, C. J., T. G. Siccamo, R. Condit, y J. E. Morales. 2003. Analysis of alternative methods for estimating carbon stock in young tropical plantations. *Forest Ecology and Management* 184: 355–368.

- Lynch, T. B., S. T. Chang, and J. P. Chandler. 1992. Estimation of individual tree volume by importance sampling and antithetic variates from the cylindrical shells integral. *Canadian Journal of Forest Research* 22: 326-335.
- Magnani F., M. Mencuccini, and J. Grace. 2000. Age-related decline in stand productivity: the role of structural acclimation under hydraulic constraints. *Plant Cell and Environment* 23: 251–263.
- Malmsheimer, R. W., P. Heffernan, S. Brink, D. Crandall, F. Deneke, C. Galik, E. Gee, J. A. Helms, N. McClure, N. Mortimer, S. Ruddell, M. Smith, J. Stewart. 2008. Preventing GHG emissions through wood substitution. *Journal of Forestry* 106: 132–135.
- Manzano, M. F. 2006. Tablas de producción y rendimiento maderable para los bosques de *Pinus patula* en la Unión Zapoteca Chinanteca (UZACHI) de la Sierra Norte de Oaxaca. Reporte Técnico del Proyecto. PROCYMAF-OAX-EST-024/2006. 31 p.
- Martínez P., F. 2010. Programa de Manejo Forestal de nivel intermedio para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables en el Ejido Tzincoatlpan. Servicios Forestales de Hidalgo, S. C. 75 p.
- Méndez G., J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A., y J. A. Nájera L. 2011. Ecuaciones alométricas y estimación de incrementos en biomasa aérea y carbono en una plantación mixta de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl., en Guanajuato, México. *Agrociencia* 45: 479-491.
- Monroy R., C., y J. J. Návar C. 2004. Ecuaciones de aditividad para estimar componentes de biomasa de *Hevea brasiliensis* Mull. Arg., en Veracruz, México. *Madera y Bosques* 10 (2): 29-43.
- Montero, G., R. Ruiz-Peinado, y M. Muñoz. 2005. Producción de biomasa y fijación de CO₂ por los bosques españoles. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid. 270 p.
- Mostacedo, B., and T. S. Fredericksen. 2000. Manual de Métodos Básicos de Muestreo y Análisis en Ecología Vegetal. Santa Cruz, Bolivia. 87 p.

- Návar, J., N. González, y J. Graciano. 2001. Ecuaciones para estimar componentes de biomasa en plantaciones forestales de Durango. México. *In: Memorias del Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales*. 18-20 de Octubre, 2001. Valdivia, Chile. 1– 12.
- Návar C., J. J. 2010a. Los bosques templados del estado de Nuevo León: el manejo sustentable para bienes y servicios ambientales. *Madera y Bosques*. 16(1): 51-69.
- Návar C., J. J., E. Méndez, and V. Dale. 2002. Estimating stand biomass in the Tamaulipan thornscrub of northeastern México. *Annals of Forest Science* 59 (8): 813-821.
- Návar C., J. J., N. González, y J. Graciano. 2005. Carbon stocks and fluxes in reforested sites of Durango, Mexico. *Madera y Bosques* 11(2):15-34.
- Návar C., J. J. 2010b. Alometría para biomasa en especies arbóreas del Noroeste de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 12: 507-519.
- Návar, J. 2010c. Measurement and Assessment Methods of Forest Aboveground biomass: A Literature Review and the Challenges Ahead. *In: Biomass*. Maggy Ndombo Benteke Momba (Ed.). Agosto, 2010. Rijeka, Croatia. InTech. 27-64.
- Nunery, J. S., and W.S. Keeton. 2010. Forest carbon storage in the northeastern United States: Net effects of harvesting frequency, post-harvest retention, and wood products. *Forest Ecology and Management* 259: 1363–1375.
- Ordóñez D., J. A. B. 1999. Captura de carbono en un bosque templado: el caso de San Juan Nuevo, Michoacán. Instituto Nacional de Ecología-SEMARNAP. México, D.F. 73 p.
- Ordóñez D., J. A. B. 2008. Cómo entender el manejo forestal, la captura de carbono y el pago de servicios ambientales. *Ciencias* 90: 37-42.
- Ordóñez, J. A. B., y O. Maser. 2001. Captura de carbono ante el cambio climático. *Madera y Bosques* 7(1): 3-12.
- Ordóñez, J. A., B. H. J. de Jong, y O. Maser 2001. Almacenamiento de carbono en un bosque de *Pinus pseudostrabus* en Nuevo San Juan, Michoacán. *Madera y Bosques* 7 (2): 27-47.

- Pacheco E., F. C., A. Aldrete, A. Gómez G., A. M. Fierros G., V. M. Cetina-Alcalá, y H. Vaquera H. 2007. Almacenamiento de carbono en la biomasa aérea de una plantación joven de *Pinus greggii* Engelm. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(3): 251-254.
- Pan, Y., R. A. Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P. E. Kauppi, W. A. Kurz, O. L. Phillips, A. Shvidenko, S. L. Lewis, J. G. Canadell, P. Ciais, R. B. Jackson, S. W. Pacala, A. D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes. 2011. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science* 333: 988-993.
- Pardos, J. A. 2010. Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global. Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria. I. G. Solprint S. L. Madrid. 253 p.
- Parresol, B. R. 1999. Assessing tree and stand biomass: A review with examples and critical comparisons. *Forest Science* 45(4): 573-593.
- Parresol, B. R. 2001. Additivity of nonlinear biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 865:878.
- Pearson, T. R. H., S. L. Brown, R. A. Birdsey. 2007. Measurement guidelines for the sequestration of forest carbon. Forest Service-USDA. Delaware, OH. 42 p.
- Peichl M., and M. A. Arain. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age-sequence of white pine forests. *Forest Ecology and Management* 253: 68–80.
- Petrokofsky, G., H. Kanamaru, F. Achard, S. J. Goetz, H. Joosten, P. Holmgren, A. Lehtonen, M. C. S. Menton, A. S. Pullin, and M. Wattenbach. 2012. Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. *Environmental Evidence* 1(6): 1-21.
- Pham, A. T., D. Grandpré D., and S. Gauthier. 2004. Gap dynamics and replacement patterns in gaps of the northeastern boreal forest of Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 34:253-364.

- Pimienta T., D. J., G. Domínguez C., O. Aguirre C., F. J. Hernández, y J. Jiménez P. 2007. Estimación de biomasa y contenido de carbono de *Pinus cooperi* Blanco, en Pueblo Nuevo, Durango. *Madera y Bosques* 13(1): 35-46.
- Pittermann, J., S. J. Sperry, K. J. Wheeler, G. U. Hacke, and H. E. Sikkema. 2006. Mechanical reinforcement of tracheids compromises the hydraulic efficiency of conifer xylem. *Plant Cell and Environment* 29: 1618–1628.
- Ponce V., A., I. Luna V., O. Alcántara A., y C. A. Ruiz J. 2006. Florística del bosque mesófilo de montaña de Monte Grande, Lolotla, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 77: 177-190.
- Pregitzer, K. S., and E. S. Euskirchen (2004) Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10: 2052–2077.
- Reyes V., J. R. 2006. Sistema de cubicación para *Eucalyptus grandis* y *E. Urophylla* en los límites de Veracruz y Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma Chapingo.
- Ríos-Carrasco, E., R. Hoogh, and J. Návar. 2009. Projections of carbon stocks in sites reforested with pinyon pine species in northeastern Mexico. *Arid Land Research and Management* 23: 1-17.
- Rodríguez L., R., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C., y E. J. Treviño G. 2006. Estimación del carbono almacenado en un bosque de niebla en Tamaulipas, México. *Ciencia Universidad Autónoma de Nuevo León* 9(2): 179-187.
- Rodríguez L., R., J. Jiménez P., O. A. Aguirre C., E. J. Treviño G., y R. Razo Zárte. 2009. Estimación del carbono almacenado en un bosque de pino-encino en la Reserva de la Biósfera El Cielo, Tamaulipas, México. *Ra Ximhai* 5(3): 317-327.
- Rodríguez O., G., A. Aldrete, V. A. González H., H. M. de Los Santos P., A. Gómez G., y A. M. Fierros G. 2011. ¿Afectan los aclareos la acumulación de biomasa aérea en una plantación de *Pinus patula*? *Agrociencia* 45: 719-732
- Rodríguez O., G., H. M. De Los Santos P., V. A. González H. A. Aldrete, A. Gómez G. y A. M. Fierros G. 2012. Modelos de biomasa aérea y foliar en una

- plantación de pino de rápido crecimiento en Oaxaca. *Madera y Bosques*. 18(1): 25-41.
- Romanh de la V., C. F. 1994. *Dendrometría*. Universidad Autónoma de Chapingo. Texcoco, México. 309 p.
- Ruddell, S., R. Sampson, M. Smith, R. Giffen, J. Cathcart, J. Hagan, D. Sosland, J. Godbee, J. Heissenbuttel, S. Lovett, J. Helms, W. Price, and R. Simpson. 2007. The role for sustainably managed forests in climate change mitigation. *Journal of Forestry* 105: 314–319.
- Rügnitz T., M., M. Chacón L., y R. Porro. 2008. *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales*. Consorcio Iniciativa Amazónica (IA) y Centro Mundial Agroforestal (ICRAF). Belém, Brasil. 63 p.
- Rügnitz T., M., M. Chacón L., y R. Porro. 2009. *Guía para la Determinación de Carbono en Pequeñas Propiedades Rurales*. Centro Mundial Agroforestal (ICRAF) - Consórcio Iniciativa Amazônica (IA). Lima, Perú. 80 p.
- Ruiz P., R., M. del Rio, y G. Montero. 2011. New models for estimating the carbon sink capacity of the Spanish softwood species. *Forest Systems* 20(1): 176-188.
- Salas, R., y J. A. Infante C. 2006. Producción primaria neta aérea en algunos ecosistemas y estimaciones de biomasa en plantaciones forestales. *Revista Forestal Latinoamericana* 40: 47-70.
- Santiago G., W. 2009. *Sistema de crecimiento y rendimiento para Pinus patula de Zacualtipán, Hidalgo, México*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 89 p.
- Santiago G., W., H. M. De los Santos P., G. Ángeles P., J. R. Valdez L., D. H. Del Valle P., y J. J. Corral R. 2013. Auto-aclareo y guías de densidad para *Pinus patula* mediante el enfoque de regresión de frontera estocástica. *Agrociencia* 47(1): 75-89.
- SAS Institute Inc. 2011. *SAS/STAT® 9.3. User's Guide*. Cary, NC. SAS Institute Inc.
- Schlegel, B., J. Gayoso, y J. Guerra. 2000. *Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial*. Manual

- de procedimientos Muestreos de biomasa forestal. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 24 p.
- Schlegel, B., J. Gayoso, y J. Guerra. 2001. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Manual de procedimientos para inventarios de carbono en ecosistemas forestales. Proyecto FONDEF D98I1076. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 15 p.
- Schreuder, H. T., R. Ernst, and H. Ramirez M. 2004. Statistical techniques for sampling and monitoring natural resources. Forest Service-USDA. General Report RMRS-GTR-126. 111 p.
- Schulze, E. D., Ch. Wirth, and M. Heimann. 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* 289 (5487): 2058-2059.
- Seo, Y. O., Y. J. Lee, R. I. C. Lumbres, J. K. Pyo, R. H. Kim, Y. M. Son, and K. H. Lee. 2013. Influence of stand age class on biomass expansion factor and allometric equations for *Pinus rigida* plantations in South Korea, Scandinavian. *Journal of Forest Research*. 28(6): 566-573.
- Sheinbaum, C., and O. Masera. 2000. Mitigating carbon emissions while advancing national development priorities: The case of Mexico. *Climatic Change* 47(3): 259–282.
- Silva A., F. M., y J. J. Návar C. 2009. Estimación de factores de expansión de carbono en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(2): 155-160.
- Silva A., F. M., y J. J. Návar C. 2010. Factores de expansión de biomasa en comunidades forestales templadas del norte de Durango, México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 1: 55-62.
- Somogyi, Z., E. Cienciala, R. Mäkipää, P. Muukkonen, A. Lehtonen and P. Weiss. 2006. Indirect methods of large-scale forest biomass estimation. *European Journal of Forest Research* 126: 197–207.

- Son, Y., J. W. Hwang, Z. S. Kim, W. K. Lee, and J. S. Kim. 2001. Allometry and biomass of Korean pine (*Pinus koraiensis*) in central Korea. *Bioresource Technology* 78(3): 251-255.
- Tainaka, K., Y. Itoh, J. Yoshimura, and T. Asami. 2006. A geographical model of high species diversity. *Population Ecology* 48: 113-119.
- Tamarit U., J. C. 2013. Cubicación, crecimiento y rendimiento maderable e inventario operativo para *Tectona grandis* en el Sureste de México. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 97 p.
- Tateno, R., T. Hishi, and H. Takeda. 2004. Above- and belowground biomass and net primary production in a cool-temperate deciduous forest in relation to topographical changes in soil nitrogen. *Forest Ecology and Management* 193: 297–306.
- Taylor, A. R., J. R. Wang, and H. Y. H. Chen. 2007. Carbon storage in a chronosequence of red spruce (*Picea rubens*) forests in central Nova Scotia, Canada. *Canadian Journal of Forest Research* 37(11): 2260–2269.
- Teobaldelli, M., Z. Somogyi, M. Migliavacca, and V. A. Usoltsev. 2009. Generalized functions of biomass expansion factors for conifers and broadleaved by stand age, growing stock and site index. *Forest Ecology and Management* 257: 1004–1013.
- Torres R., J. M., O. S. Magaña T., y G. A. Valles G. 1993. Funciones de ahusamiento para 8 especies forestales del Estado de México. *In: I Congreso Mexicano de Recursos Forestales, Resumen de Ponencias*. Saltillo, Coahuila. 109 p.
- Torres R., J. M., y O. S. Magaña T. 2001. Evaluación de Plantaciones Forestales. Ed. Limusa. México, D. F. México. 472 p.
- Vásquez I., A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos “La Mojonera” y “Atopixco”, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. 120 p.
- Vázquez G., V. 2013. Género y bosques. Temas y enfoques en la literatura internacional. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 4(16): 10-21.

- Wang, C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222: 9–16.
- Williams, M. S., and H. T. Schreuder. 2000. Guidelines for choosing volume equations in the presence of measurement error in height. *Canadian Journal of Forest Research* 30(2): 306–310.
- Wirth, C., J. Schumacher, and E. D. Schulze. 2004. Generic biomass functions for Norway spruce in Central Europe a meta-analysis approach toward prediction and uncertainty estimation. *Tree Physiology* 24: 121-139.
- Xiao, C.-W., J. C. Yuste, I. A. Janssens, P. Roskams, L. Nachtergale, A. Carrara, B. Y. Sanchez, and R. Ceulemans. 2003. Above- and belowground biomass and net primary production in a 73-year-old Scots pine forest. *Tree Physiology* 23(8): 505–516.
- Zambrano, A., F. Franquis y A. Infante. 2004. Emisión y Captura de Carbono en los Suelos en Ecosistemas Forestales. *Revista Forestal Latinoamericana* 35: 11-20.
- Zimmermann, M. H., and C. L. Brown. 1980. *Tree structure and function*. Berlin Heidelberg. New York, USA. 336 p.