



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES**

**PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y  
DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE  
DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO**

**GRISELDA CHÁVEZ AGUILAR**

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

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

**2015**

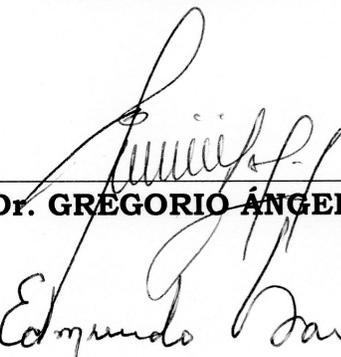
---

La presente tesis titulada: **PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO** realizada por la alumna: **GRISELDA CHÁVEZ AGUILAR** bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS  
FORESTALES**

**CONSEJO PARTICULAR**

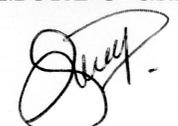
CONSEJERO

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. GREGORIO ÁNGELES PÉREZ**

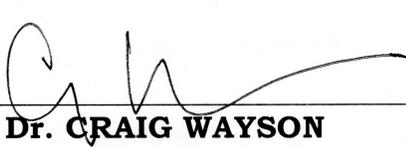
ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. EDMUNDO GARCÍA MOYA**

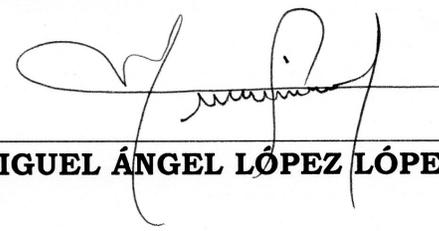
ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
**Dra. MARLÍN PÉREZ SUÁREZ**

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. CRAIG WAYSON**

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ**

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Marzo de 2015.

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

# PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Griselda Chávez Aguilar, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

## RESUMEN GENERAL

La gestión forestal representa una alternativa para la conservación y mejoramiento de los ecosistemas forestales a través del incremento de la productividad. La biomasa como función de dicha productividad, permite reactivar la mayoría de los procesos funcionales del ecosistema, después de la aplicación de una corta de repoblación. Sin embargo, la biomasa aérea no ha sido considerada como un componente importante de la productividad primaria neta y un criterio determinante para la gestión forestal sostenible; es decir, sólo se ha utilizado con fines técnicos, en la estimación de los rendimientos totales de madera. Por su parte, el seguimiento del crecimiento de la biomasa subterránea, que también juega un papel decisivo en el éxito del establecimiento de la vegetación, ha sido muy limitado debido a la complejidad en el uso de metodologías poco estandarizadas y adecuadas a las condiciones específicas de cada sitio de estudio. La presente investigación tuvo por objetivo la cuantificación de la biomasa aérea y su asignación hacia los diferentes componentes estructurales aéreos de los árboles, la estimación de la productividad primaria neta aérea (PPNA), el seguimiento del crecimiento, producción y tasas de recambio en raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et. Cham., en la región de Zacualtipán en el estado de Hidalgo. La biomasa aérea fue estimada mediante el uso de ecuaciones alométricas específicas, mientras que la PPNA a través de la remediación de sitios permanentes. La biomasa de raíces en el almacén del suelo, se cuantificó a través de núcleos de suelo, mientras que el crecimiento, la producción y las tasas de recambio de raíces finas se siguió a través de la metodología de “crecimiento interno” (*Ingrowth cores*). Los resultados obtenidos mostraron que la biomasa y la PPNA aumentaron con la edad del rodal. El rodal de 30 años de edad (1982) presentó el 75% de la biomasa aérea encontrada en área sin aprovechamiento forestal, como área de referencia (AR), de aproximadamente 80 años de edad (178.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente); y una PNA de 16.5 y 19.1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente. El rodal mas joven (1998) presentó

# PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Griselda Chávez Aguilar, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

una biomasa de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> y una PPNA de 14.7 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Por su parte, la asignación de biomasa aérea presentó el siguiente orden decreciente: fuste > ramas > corteza > follaje. Como consecuencia de la aplicación de prácticas silvícolas, la asignación de biomasa hacia el fuste fue mayor, lo que representó una mayor producción maderable. Las raíces finas representaron entre el 18 y 40% de la biomasa total de raíces en el almacén el suelo, porcentaje que dependió de la edad del rodal. El patrón de crecimiento estacional de raíces finas fue diferente entre las edades de la cronosecuencia; únicamente los rodales de anualidad 2005 y 1983 coincidieron al presentar su máximo crecimiento en el período de julio a septiembre, en el verano, con 181.3 y 35.9 g m<sup>2</sup>, respectivamente. Así mismo, la producción anual de raíces finas disminuyó con la edad de los rodales con aprovechamiento forestal, siendo el rodal de anualidad 2005 donde se presentó la mayor producción (601.3 g m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>), la cual presentó 20% mayor producción que la encontrada en el AR (237.2 g m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). Las tasas de recambio de las raíces finas fueron menores en los rodales con aprovechamiento forestal (entre 1.0 y 1.5 año<sup>-1</sup>) comparadas con las observadas en AR (1.7 año<sup>-1</sup>). Con base a los resultados del presente trabajo se concluye, que los bosques repoblados con *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et. Cham., que es una especie de rápido crecimiento, pueden ser usados para implementar adecuadamente, planes de gestión forestal sustentable. Lo anterior, con la finalidad de incrementar y mejorar la productividad del ecosistema; a través de la acumulación de la biomasa aérea y subterránea, para el mantenimiento del mismo ecosistema, que permita la permanencia de los recursos forestales a corto, mediano y largo plazo.

**Palabras clave:** productividad primaria neta aérea, incrementos en biomasa aérea, modelos de crecimiento, bosques templados, raíces finas, núcleos de crecimiento interno de raíces finas, producción de raíces finas, tasas de recambio de raíces finas.

PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN  
BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Griselda Chávez Aguilar, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

**ABSTRACT**

Forest management is an alternative for the conservation and enhancement of forest ecosystems, through increasing productivity. The biomass as a function of the productivity permits to reactivate the functional ecosystem processes, after harvesting. However, the aboveground biomass has been only considered for technical purposes to calculate the total timber yield, but not as an important component net primary productivity and an important criterion for the selection of appropriate forest management practices. Meanwhile, monitoring the growth of belowground biomass that plays a key role in the establishment of forest vegetation has been very limited due to complex, non-standardized, and inappropriate methods for specific site conditions. For this reason, the objective of this study was evaluate the aboveground biomass and its allocation into to structural tree components, as well as aboveground net primary production (ANPP); and fine roots growth, production and turnover rates in a chronosequence of *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et. Cham. forest in Zacualtipán, Hidalgo. The aboveground biomass was calculated using specific allometric equations, while the ANPP by re-measurement of permanent plots. The roots biomass stock was quantified by soil cores, while fine roots growth, production and turnover rates, by the ingrowth core method. Results in this study showed that aboveground biomass and ANPP increased with stand age. The 30 years old stand (1982) presented 75% of the aboveground biomass reference stand (AR) of 80 years old (178.1 and 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively); and ANPP were 16.5 and 19.1 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>, respectively. The youngest stand (1998) presented a biomass of 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> and ANPP of 14.7 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. Meanwhile, the aboveground biomass allocation presented the following decreasing order: stem> branches> bark> foliage. As a result of the application of silvicultural practices, biomass allocation was favored to stem growth, which is the commercial timber product. On the other hand, the fine roots biomass represented between 18 and 40% of the total roots biomass stock, this percentage depended on the age stand. The seasonal growth pattern of the fine roots growth was different between stand ages of

PRODUCCIÓN DE BIOMASA AÉREA Y DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN  
BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

Griselda Chávez Aguilar, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2015

the chronosequence; only 2005 and 1983 stands presented their maximum fine roots growth from July to September, on the summer; with 81.3 and 35.9 g m<sup>2</sup>, respectively. The fine roots annual production decreased with stand age, and the 2005 stand showed the highest production (601.3 g m<sup>2</sup> year<sup>-1</sup>) and presented almost 20% more than production found in AR (237.2 g m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>). The fine roots turnover rate, were lower in the harvesting stands (between 1.0 and 1.5 year<sup>-1</sup>) compared with AR (1.7 year<sup>-1</sup>). These results led to conclude that the regenerated *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et. Cham. (fast growing specie) stands in the study site, can be used to implement sustainable forest management. This assumption is for increases and improves the ecosystem productivity, through of increase above and belowground biomass, and thus permanence in the short, mid and long-term.

**Key words:** aboveground net primary production, biomass increment, growth models, temperate forests, fine roots, ingrowth cores, fine roots production, turnover rates.

*“Para triunfar en la vida, no es importante llegar primero. Para triunfar simplemente hay que llegar, levantándose cada vez que se cae en el camino”*

*Anónimo*

*Porque la vida esta llena de tropiezos, dudas, sacrificios, añoranzas, desilusiones, pero también de grandes ilusiones y sueños, que indudablemente sin la presencia de todos y cada uno de esos “ángeles” que envían a la Tierra, convertidos en amigos y familiares, no sería posible la realización de cada uno de esos sueños.*

*Esta investigación no hubiera sido posible, sin la ayuda de un sin fin de grandes personas, que de una u otra forma, participaron en su desarrollo y conclusión; quienes además, me permitieron compartir con ellas, una bonita y perdurable amistad. Sus funciones fueron diversas, pero nunca fue una menos importantes que la otra. Por ello, la ayuda de cada uno de ustedes fue invaluable y quedará plasmada en cada letra del presente escrito, dedicada exclusivamente para ustedes, con enorme cariño.*

## **A Dios**

Porque a pesar de todos mis tropiezos y aún sin darme cuenta ha estado conmigo en todo momento. Porque tomó y colocó mis preocupaciones en sus manos, acogiéndome siempre en su amor y esperanza. Por compartirme su sabiduría y dirigir mi camino, para alcanzar mis objetivos. Por hacerme recuperar la fe y por enseñarme que no importa lo que pase, él permanecerá conmigo a través de los tiempos. *¡Amén!*

## **A mi padre *Francisco Chávez Galván (†)***

Un gran hombre, trabajador, responsable, honesto y necio. De quien aprendí, que la necesidad es el mejor sinónimo de tenacidad; porque con ello se pueden alcanzar las más grandes e inimaginables quimeras. Por haberme inculcado que el amor y la responsabilidad al trabajo es la clave del éxito. *¡Siempre estarás presente en mi vida, para seguir siendo inspiración continua en el alcance y logro de nuevas metas!*

## **A mi madre *Abigail Aguilar Aguilar***

Una gran señora, con gran fortaleza emocional y física, merecedora de mi más grande admiración y respeto. Porque a pesar de todas las adversidades y golpes que ha recibido en la vida, ha sido valiente y se ha mantenido con enorme entereza. Porque de ella aprendí, que el amor de una madre a sus hijos, es el más grande y verdadero sentimiento. *¡Gracias por todo tu apoyo y amor!*

## **A mis hermanas *Rosy, Tere, Mary, Marbe, Cata y Zefe***

Porque a pesar de todas las diferencias que pudieran existir entre nosotras, el amor de hermanas siempre estará presente y logrará vencer cualquier adversidad. Porque gracias a ellas, aprendí lo que es tener una verdadera familia y el verdadero significado de nunca estar sola. *¡Gracias por estar siempre a mi lado!*

## **A mis hermanos *Alfredo, Pancho, Nayo, Millo y Luis***

Por compartir conmigo cada momento importante en mi vida, por toda su confianza y por los hermosos momentos compartidos en familia. *¡Gracias por todo su apoyo!*

### ***A Ale, Alan y Santi***

Por quienes me he motivado a mejorar día a día y porque gracias a ellos puedo sonreír ante cualquier situación, por muy difícil que ésta fuera. Porque son mi alegría de vivir y de quienes aprendí, que a pesar de las diferencias de opinión, el AMOR que existe entre nosotros, será siempre mucho más grande y nos mantendrá unidos por siempre como parte de una hermosa familia. *¡Los amo!*

### ***A los demás integrantes de mi familia***

A mi tío Fidencio, a todos mis cuñados y mis amados sobrinos primeros, segundos y políticos; por compartir conmigo momentos llenos de alegría, felicidad y por toda la armonía que han inyectado a ésta familia. *¡Gracias por formar parte de mi gran familia!*

### ***A Marlín***

Porque por más de veinte años hemos pasado por situaciones tan contrastantes, que me han hecho entender y aprender que sólo la verdadera amistad puede superar cualquier adversidad. Además, porque las alegrías compartidas son mayores y son las que nos rediseñan y nos fortalecen en ese gran arte, que es la AMISTAD. *¡Te quiero mucho!*

### ***Al Sr. Tomás Pérez, la Sra. Elodia Suárez y Jorge Ramírez***

Por estar siempre presentes en cada momento importante de mi vida, por darme su plena confianza y mostrarme que la familia no sólo se lleva en la sangre, sino también en el corazón. *¡Gracias por todo su apoyo y cariño!*

## AGRADECIMIENTOS

Al *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACyT)*, que en representación de todos los mexicanos, me otorgaron la oportunidad de financiar mis estudios profesionales.

Al *Colegio de Postgraduados*, por ser una Institución de excelencia y en especial al *Postgrado en Ciencias Forestales*, como a todos sus integrantes, quienes entregan su trabajo, dedicándose día a día a la ciencia y transmitiendo acertadamente sus conocimientos y experiencias.

Al *Dr. Gregorio Ángeles Pérez*, por su acertada y valiosa dirección en la presente investigación. Por su apoyo, esfuerzo e interés en el desarrollo y realización del trabajo de campo y laboratorio. Además, por sus valiosas contribuciones y recomendaciones para la mejora de la escritura de ésta tesis.

A la *Dra. Marlín Pérez Suárez*, no sólo por su gran apoyo, sus acertados comentarios y aportaciones en la mejora de este trabajo, sino por su paciencia, dedicación y preocupación desinteresado en mi formación profesional. Además, porque no he conocido persona más fiel y enamorada de la ciencia, que ella.

Al *Dr. Edmundo García Moya*, por su valioso tiempo y dedicación a la revisión y mejora de ésta tesis, pero también, por su constante ánimo, su retroalimentación y su compromiso para transmitir sus conocimientos a los demás.

Al *Dr. Miguel Ángel López López*, por su valiosa asesoría, sugerencias y recomendaciones en la mejora del presente trabajo y por su amable disponibilidad siempre mostrada.

Al *Dr. Craig Wayson*, por sus productivas aportaciones, que contribuyeron a resolver diversas problemáticas en el desarrollo de ésta investigación.

Al *personal administrativo del Postgrado en Ciencias Forestales*, principalmente a Lupita, por su dedicación, gran capacidad laboral y porque siempre esta dispuesta a ayudar, pero sobretodo por ofrecerme una gran amistad desinteresada.

A los *bibliotecarios del Colegio de Postgraduados*, en especial a Raymundo Flores Aguilar, Ana María Mancilla Falcón, Guadalupe Galván Ramírez, Mario Espejel Miranda y Mariana Morales Espejel, por su importante cooperación y disponibilidad para la facilitación del material bibliográfico.

A las *Autoridades del Comisariado Ejidal del Ejido Atopixco y La Mojonera*, por las facilidades y la disponibilidad que siempre prestaron en el establecimiento y seguimiento de la investigación de campo.

Al *Dr. J. Tulio Arredondo Moreno*, por haberme proporcionado las facilidades necesarias para llevar acabo los análisis de laboratorio del presente trabajo, a través del *Instituto Potosino de Investigación Científica Tecnológica*, pero sobretodo por siempre haber sido un excelente jefe y gran amigo.

A *todo un equipo especial*, que fue parte de éste enorme esfuerzo, por que sin su valiosa ayuda y cooperación en el trabajo de campo y laboratorio, la presente investigación no hubiera sido concluida exitosamente. A Ahmed Cruz L., Ofelia Castillo A., Estebán Betancourth, Odette Cadena M., Oscar Molinar, Edgar Flores M., Analy Rodríguez A., Karina Reza R., Eddy Ventura, Zaira Zaragoza C., Benjamín Méndez L., Rosario Ramírez S., Gerónimo Quiñonez B., Luis Ubaldo Castruita E., Javier López Upton, Manuel Barrera, Raúl López L., Lauro Franco, Marlín Pérez S. y, Dionicio Palafox C.

A *mis entrañables amigos*, Angy, Cony, Chayo, Olga, Saúl, Ofe, Gero, Luis, Rosalba, Martín, Chely, Brenda, Esteban, Moni, Isaac, Roberto, César, Efraín, Daniel, Yunuen y Gabriel; a quien tuve el gran honor de conocer y coincidir en esta importante etapa de mi vida profesional. Además, porque durante nuestra estancia en el colegio, compartimos grandes y nuevas aventuras, experiencias, muchas risas y alegrías, algunas veces también tristezas y desvelos, pero siempre unidos persiguiendo una meta en común.

A *mis siempre grandes amigos*, Angélica, Dulce, Rebeca, Reyes, Ulises, Josué, Laura y Mony, por brindarme su bella amistad y permitirme formar parte de la alegre convivencia con ustedes en diferentes etapas de mi vida. *¡Los quiero!*

***¡Gracias!***

# CONTENIDO

RESUMEN GENERAL.....	i
ABSTRACT .....	iii
CAPÍTULO I .....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo general .....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	4
1.2.1. Antecedentes del aprovechamiento forestal en el área de estudio.....	6
CAPITULO II.....	9
2. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL SOBRE LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA Y PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA EN UN BOSQUE DE <i>Pinus patula</i> EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO .....	9
2.1. RESUMEN .....	9
2.2. ABSTRACT .....	10
2.3. INTRODUCCIÓN .....	11
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
2.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo e inventario forestal.....	13
2.4.2. Estimaciones de la biomasa aérea e incrementos .....	14
2.4.3. Medición de la caída de hojarasca.....	15
2.4.4. Estimación de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) .....	15
2.4.5. Análisis estadísticos .....	16
2.5. RESULTADOS .....	16
2.5.1. Modelos de crecimiento en biomasa aérea.....	16
2.5.2. Biomasa aérea total y sus incrementos .....	19
2.5.3. Biomasa aérea de <i>Pinus patula</i> .....	22
2.5.4. Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA) .....	25
2.6. DISCUSIÓN.....	25
2.7. CONCLUSIONES.....	31
CAPÍTULO III .....	32
3. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL EN LA ASIGNACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UN BOSQUE DE <i>Pinus patula</i> EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO .....	32
3.1. RESUMEN .....	32
3.2. ABSTRACT .....	33
3.3. INTRODUCCIÓN .....	34
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	36
3.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo y medición de variables dasométricas .....	36
3.4.2. Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural.....	37
3.4.3. Análisis estadístico.....	37
3.5. RESULTADOS .....	38
3.5.1. Biomasa aérea total .....	38
3.5.2. Biomasa aérea por componente .....	40

3.6. DISCUSIÓN.....	44
3.7. CONCLUSIONES.....	48
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>49</b>
<b>4. DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE CON APROVECHAMIENTO FORESTAL DE <i>Pinus patula</i> EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO.....</b>	<b>49</b>
4.1. RESUMEN .....	49
4.2. ABSTRACT .....	51
4.3. INTRODUCCIÓN .....	52
4.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	54
4.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo.....	54
4.4.2. Muestreo de la biomasa de raíces totales en el almacén del suelo .....	55
4.4.3. Seguimiento del crecimiento en biomasa de raíces finas .....	56
4.4.4. Caracterización de los suelos en las unidades de muestreo .....	57
4.4.5. Cálculos y análisis estadísticos.....	58
4.5. RESULTADOS .....	59
4.5.1. Biomasa de raíces en el almacén del suelo .....	59
4.5.2. Crecimiento en biomasa de raíces finas.....	62
4.5.3. Producción anual de raíces finas .....	64
4.5.4. Tasas de recambio de raíces finas .....	67
4.5.5. Características de los suelos y producción de raíces finas.....	68
4.6. DISCUSIÓN.....	71
4.7. CONCLUSIONES.....	77
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>79</b>
<b>5. CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>79</b>
<b>CAPÍTULO VI .....</b>	<b>81</b>
<b>6. LITERATURA GENERAL.....</b>	<b>81</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

<b>Cuadro 2. 1.</b> Estimadores estadísticos del modelo alométrico obtenidos por tipo de especie, en la estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en la región de Zacualtipán, Hidalgo.....	14
<b>Cuadro 2. 2.</b> Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos para estimar la producción de biomasa aérea en función a la edad en un bosque con aprovechamiento forestal de <i>Pinus patula</i> en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. ....	17
<b>Cuadro 2. 3.</b> Densidad y mortalidad del estrato arbóreo en rodales de diferente edad en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de <i>Pinus patula</i> con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. ....	22
<b>Cuadro 2. 4.</b> Biomasa aérea e incrementos ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) del estrato arbóreo en rodales de diferente edad, en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de <i>Pinus patula</i> con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera Zacualtipán, Hidalgo. ....	22
<b>Cuadro 2. 5.</b> Productividad Primaria Neta Aérea ( $\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ) en un bosque de <i>Pinus patula</i> con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. ....	25
<b>Cuadro 3. 1.</b> Área basal y densidad en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de <i>Pinus patula</i> con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. ....	40
<b>Cuadro 3. 2.</b> Biomasa aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) por componente en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de <i>Pinus patula</i> con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. ....	42
<b>Cuadro 4. 1.</b> Variación estacional sobre la dinámica de las raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).....	62
<b>Cuadro 4. 2.</b> Características físicas y químicas del suelo en una cronosecuencia de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). ....	70

## ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. 1.** Ubicación geográfica del área de estudio en la Región de Zacualtipán, Hidalgo, México..... 5
- Figura 1.2.** Delimitación del área de estudio en la región de Zacualtipán, Hidalgo. El delineado rojo muestra los límites de cada rodal en el ejido La Monojera y el azul los del ejido Atopixco. Dentro de cada rodal se observa el año en que se aplicó la corta de repoblación..... 7
- Figura 2. 1.** Relación biomasa área-edad en rodales con aprovechamiento de *Pinus patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. .... 18
- Figura 2. 2.** Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de los rodales con aprovechamiento de *Pinus patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo..... 18
- Figura 2. 3.** Biomasa aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) del estrato arbóreo en rodales de diferente edad, en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). ..... 21
- Figura 2. 4.** Biomasa aérea ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) de *Pinus patula* en rodales de diferente edad en un período de siete años de crecimiento (2005-2012) en un bosque con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad)..... 24
- Figura 3. 1.** Biomasa aérea total ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad)..... 39
- Figura 3. 2.** Asignación de biomasa aérea (%) por componente en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). ..... 43
- Figura 4. 1.** Diseño de muestreo espacial de los núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo (Modificado de Metcalfe *et al.*, 2008). ..... 54
- Figura 4. 2.** Diseño vertical de los núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo (Modificado de Metcalfe *et al.*, 2008). ..... 55
- Figura 4. 3.** Biomasa ( $\text{g m}^{-2}$ ) de raíces totales (finas y gruesas) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad)..... 59
- Figura 4. 4.** Biomasa de raíces gruesas ( $>2\text{mm}$ ) y finas ( $\leq 2\text{mm}$ ) ( $\text{g m}^{-2}$ ) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (gruesas o finas)

los valores con la misma letra significan medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ). .....	60
<b>Figura 4. 5.</b> Masa de raíces vivas y muertas ( $\text{g m}^{-2}$ ) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (RV o RM) los valores con la misma letra significan medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ). .....	61
<b>Figura 4. 6.</b> Proporción (%) de raíces finas vivas (RF_Vivas) y muertas (RF_Muertas) a lo largo de un año, en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). .....	64
<b>Figura 4. 7.</b> Producción de raíces finas ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) totales (vivas más muertas), en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido de Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). .....	65
<b>Figura 4. 8.</b> Producción anual de raíces finas vivas y muertas ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (vivas o muertas) los valores con la misma letra significan medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ). .....	66
<b>Figura 4. 9.</b> Condiciones climáticas (precipitación y temperatura) y biomasa bimensual de raíces finas, a lo largo de un año de seguimiento, en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido de Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). .....	67
<b>Figura 4. 10.</b> Tasas de recambio de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de <i>Pinus patula</i> en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). .....	68

## CAPÍTULO I

### 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

Actualmente, la gestión forestal representa una de las mejores alternativas en la reducción de la degradación y deforestación de los ecosistemas forestales (Durán *et al.*, 2007), a través del aprovechamiento sostenible de los recursos maderables y no maderables (Velázquez, 2006; Jandl *et al.*, 2007; Porter *et al.*, 2012). Con el aprovechamiento forestal, se busca el incremento en productividad maderable, mediante la aplicación de prácticas silvícolas diversas (Mendoza, 1993), obteniendo un aumento de la biomasa y producción del ecosistema. Estos componentes juegan un papel importante en el aprovechamiento forestal sostenible a través de la recuperación de procesos funcionales dentro del ecosistema (Escobar *et al.*, 2008). Por ejemplo, uno de los principales servicios ecosistémicos, es la fijación y almacenamiento de carbono en la biomasa forestal. Además de ser una estrategia de mitigación del CO<sub>2</sub> atmosférico, redunda en beneficios ambientales, ecológicos y económicos para la sociedad; logrando además, la permanencia y conservación de los recursos forestales a mediano y largo plazo (von Gadow *et al.*, 2004).

El CO<sub>2</sub> absorbido por la vegetación, participa en la composición de las estructuras durante el desarrollo del árbol, aumenta su volumen e incrementa su biomasa. Esta última, es subsecuentemente asignada a los diversos componentes estructurales de los árboles (tronco, ramas, follaje, corteza, estructuras reproductivas, raíces, etc.), los cuales participan activamente en los procesos del ecosistema (Bazzas, 1997). El 50% de la biomasa, definida como la cantidad de materia orgánica viva almacenada, tanto en la parte aérea como subterránea del ecosistema, esta compuesta por carbono (Penman *et al.*, 2003). Por lo tanto, la biomasa representa los recursos almacenados y disponibles en el ecosistema y, es reflejo de la autoregulación de éste mismo para la producción maderable del bosque (Escobar *et al.*, 2008)

A pesar de la importancia de la biomasa en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas forestales, aún existen muchos vacíos de información sobre su contribución en el ciclo de carbono, lo que ha limitado su uso como criterio en la aplicación y mejoramiento de las técnicas silvícolas utilizadas en los aprovechamientos forestales (Castellanos *et al.*, 2008). Una forma de atender dicha problemática es evaluar la

productividad y contribución de los bosques en el ciclo del carbono, a través de la medición y evaluación de dicha biomasa en ecosistemas con aprovechamiento forestal (IPCC, 2003). El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2003), recomienda en sus guías de buenas prácticas, documentar la cantidad de biomasa que se tiene acumulada en los bosques y estimar las emisiones en este sector, a través de la evaluación de cinco principales reservorios: biomasa aérea, mantillo, material leñoso depositado sobre el suelo, biomasa subterránea y almacenes en el suelo.

Bajo este contexto, la presente investigación tuvo como finalidad darle seguimiento a dos, de dichos reservorios terrestres: la biomasa aérea y biomasa subterránea. Estos, son dos temas complementarios y que son necesarios para el conocimiento del balance de flujos de carbono en los ecosistemas. Dentro del primer tema, se estimó la biomasa aérea como una función directa de la productividad del bosque de *Pinus patula* Schiede ex Schltdl et. Cham. (*P. patula*) con aprovechamiento forestal (Capítulo II) y el efecto de las prácticas silvícolas sobre dicha productividad. La productividad se estimó a través de la acumulación de biomasa a lo largo del tiempo, así como su importancia en la recuperación de las funciones del ecosistema a partir de la aplicación de la corta de repoblación en cada rodal de diferentes edades.

La biomasa aérea varía en cada componente estructural de los árboles y con la edad del rodal, la calidad del sitio, la composición de especies, variables ambientales, densidad del rodal y tratamiento silvícola, entre otros. De esta forma, la asignación de biomasa dependerá de la función de cada uno de los componentes dentro del ecosistema, lo cual está directamente relacionado con la etapa de desarrollo del rodal. Por ello, el segundo tema evaluado fue, la asignación de biomasa en los diferentes componentes estructurales del bosque de *P. patula* (Capítulo III) en rodales de diferente edad.

El tercer tema evaluado, abordó la dinámica de raíces finas (Capítulo IV) en una cronosecuencia de bosque de *P. patula*. Se le dio seguimiento al crecimiento en biomasa, a la producción y a las tasas de recambio de raíces finas. Estas participan activamente en la recuperación de los procesos funcionales del ecosistema; realizan funciones como el transporte, absorción y almacén de agua y nutrientes. De dichas funciones depende ampliamente el desarrollo del sistema radical y el éxito del establecimiento de las especies en los rodales después de la aplicación de la corta de repoblación, para posteriormente dar paso a crecimiento y desarrollo de la madera en los rodales.

De esta forma, la acumulación de biomasa en los bosques con aprovechamiento forestal, provee mecanismos altamente eficaces para el establecimiento de compartimentos y reservorios, tanto aéreos como subterráneos para el almacén de nutrientes y carbono (Vitousek y Reiners, 1975). Sin embargo, los estudios al respecto son escasos en México, por ello la presente investigación pretende aportar información sobre la contribución potencial de los bosques de *P. patula* para la captura y almacenamiento de carbono (aéreo y subterráneo), en la región de Zacualtipán, Hidalgo. Los resultados generados a través de la presente investigación contribuirán a mediano y largo plazo, a mejorar el desarrollo del sistema de Medición, Reporte y Verificación de Carbono Forestal Nacional. Este sistema es un requisito para que México pueda participar en el programa REDD+ (Reducción de Emisiones por Deforestación y Degradación), el cual es un mecanismo internacional que busca desacelerar, frenar y revertir la pérdida de cubierta forestal y, por tanto, de carbono, cuya meta es reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, considerando además la conservación, el aprovechamiento sostenible y mejoramiento de los reservorios de carbono en los bosques (Mollicone *et al.*, 2007; Parker *et al.*, 2009; Miles y Dickson, 2010). Lo anterior en su conjunto permitirá, mejorar la calidad de vida de propietarios y usuarios de éstos bosques (INEGI, 2003), sirviendo simultáneamente como ejemplo para el aprovechamiento forestal sostenible de bosques ubicados en otros lugares de México.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo general**

Determinar la biomasa aérea y su asignación hacia los diferentes componentes estructurales del árbol, la Productividad Primaria Neta aérea y, evaluar la dinámica de las raíces finas en una cronosecuencia de bosque de *P. patula*, con aprovechamiento forestal, en la región de Zacualtipán, Hidalgo, México.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Estimar la biomasa aérea y sus incrementos en rodales de diferente edad de *P. patula* y comparar con un área de referencia, en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

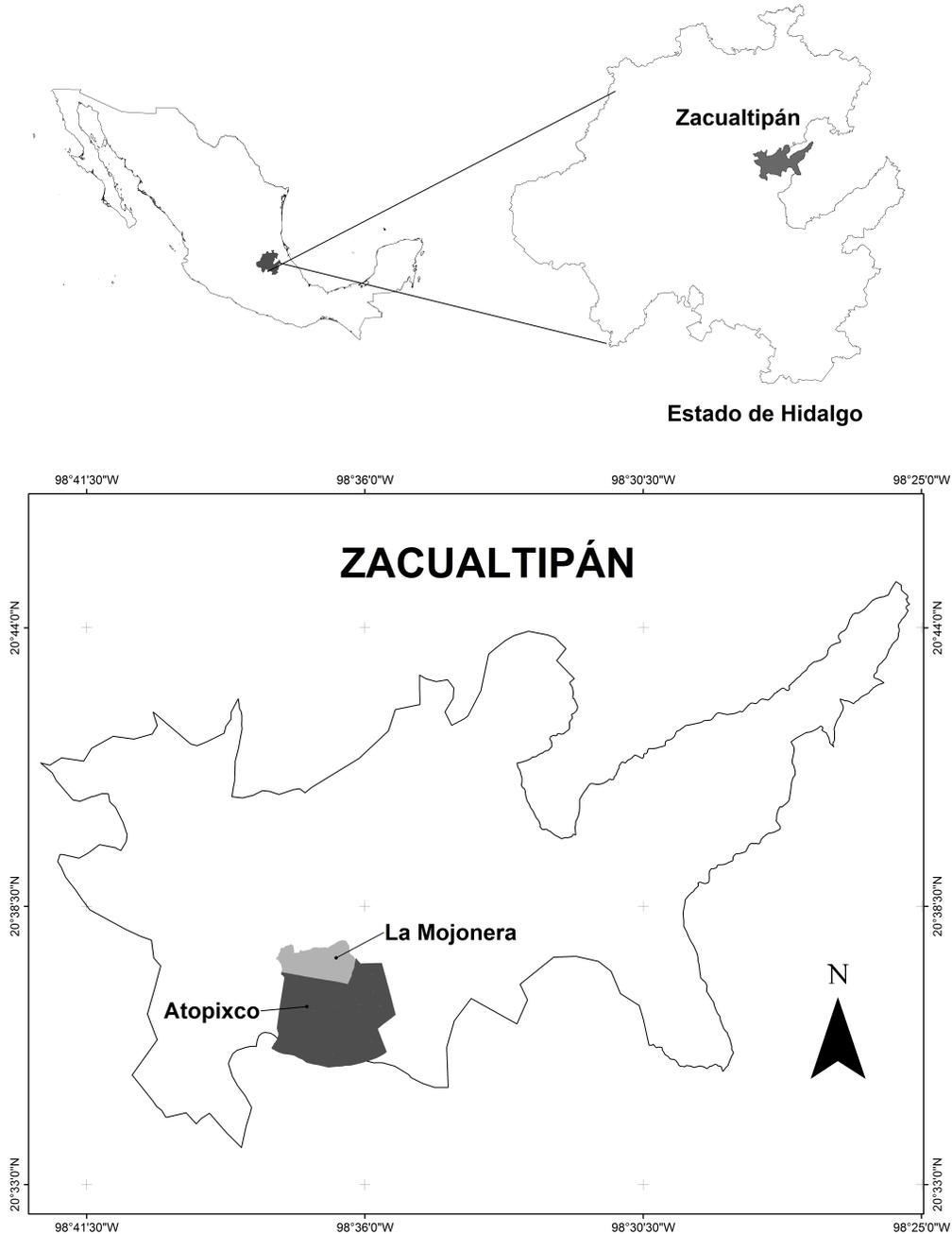
- Determinar la PPNA en rodales de diferente edad de *P. patula* y comparar con un área de referencia, en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.
- Evaluar la biomasa de raíces en el almacén del suelo en rodales de diferente edad y comparar con un área de referencia, en una cronosecuencia de bosque de *P. patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.
- Darle seguimiento al crecimiento en biomasa de las raíces finas en rodales de diferente edad y comparar con un área de referencia, en una cronosecuencia de bosque de *P. patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.
- Estimar la producción, mortalidad y tasas de recambio de las raíces finas en rodales de diferente edad y comparar con un área de referencia, en una cronosecuencia de bosque de *P. patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo.

## 1.2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se localiza en la región de Zacualtipán de Ángeles en el estado de Hidalgo, en la zona centro de México (Ángeles, 1995). El ejido La Monojera se localiza a 20°37'11" y 20°37'43" N y 98°36'22" y 98°37'37" O; mientras que el de Atopixco a 20°37'26" y 20°35'20" N y 98°37'48" y 98°35'23" O (Figura 1.1). Ambos ejidos, se encuentran al sureste del municipio de Zacualtipán de Ángeles y ambos comparten las mismas características fisiográficas.

La fisiografía en ambos ejidos comprende la Sierra Madre Oriental, conocida como Sierra Alta Hidalguense y una parte de la Faja volcánica transmexicana (eje neovolcánico), subprovincia Carso Huasteco. Están conformados por pendientes, mesetas y cañones, con una altitud media de 2,100 m. El relieve en el área de estudio, es generalmente accidentado con pendientes de 0 a 25% y la exposición dominante es norte y noroeste. El clima que predomina es clima templado húmedo (C(m)) y templado subhúmedo (C(w2)) con temperatura media anual entre 12 y 18° C, temperatura del mes más frío entre -3 y 18°C y temperatura promedio en el mes más cálido de 22 °C. La precipitación media anual oscila entre 700 y 2,050 mm (Servicio Meteorológico Nacional, 2014) y una precipitación del mes más seco, menor de 40 mm. Se presentan lluvias casi todo el año (García, 2004) y las lluvias de verano e invierno suelen

comprender del 5% al 10.2% de la total anual (Servicio Meteorológico Nacional, 2014). El período de lluvias es de junio a septiembre, aunque se presenta un período de sequía aproximadamente entre febrero y mediados de mayo. La región de Zacualtipán cuenta con tres ríos principales: El Pánuco, El Zoyatla y El Mimiahuaco, además de la laguna Chapultepec.



**Figura 1.** 1. Ubicación geográfica del área de estudio en la Región de Zacualtipán, Hidalgo, México.

La zona presenta abundante pedregosidad y el sustrato geológico data del período Cenozoico (terciario superior) y está conformado por rocas ígneas extrusivas del tipo toba ácida (Ts-Ta, al norte) y basalto (Ts-B, al sur). La unidad geológica Ts (Ta) está representada por tobas e ignebritas de composición riolítica y dacítica asociadas con intercalaciones gruesas de obsidiana y derrames basálticos y riolíticos.

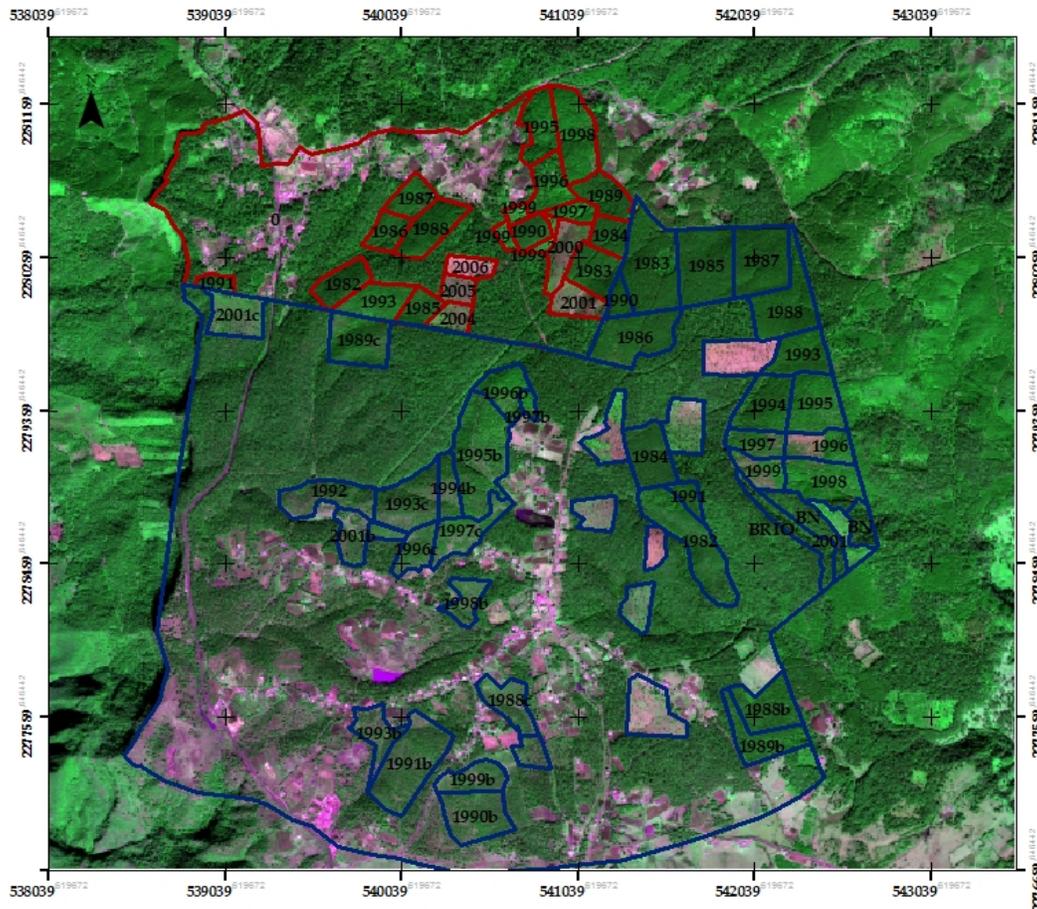
Los principales tipos de vegetación a nivel regional que se presentan en la región son, bosques de encino y pino-encino. Aunque, en la comunidad de La Monojera se encuentra una superficie importante de bosque Mesófilo de Montaña dominado por *Fagus grandifolia* subesp. *mexicana* (Ponce-Vargas *et al.*, 2006), que es uno de los ecosistemas más vulnerables, con alta presión antropógena y que alberga un gran número de especies vegetales de restringida distribución natural (Rzedowski, 1996). Otras especies importantes son *Quercus eugeniifolia* Liebm., *Q. sartorii* Liebm., *Q. trinitatis* Trel., *Pinus greggii* Engelm., *P. patula* y *P. oocarpa* Shiede. (menor proporción). Entre los árboles medianos se puede encontrar a *Clethra mexicana* D.C., *Magnolia schiedeana* Schldl. Mientras que en el estrato bajo se encuentran especies como *Befaria laevis* Benth., *Cleyera theaeoides* (Sw.) Choisy, *Ocotea klotzchiana* Hemsl. y *Turpinia occidentalis* (Sw.) G. Don, entre otras (Rzedowski, 1972; Ángeles, 2009).

El suelo predominante en la región es feozem haplico y secundariamente el regosol calcárico y litosol, con buen drenaje, textura media y alto contenido de materia orgánica y nutrimentos.

### 1.2.1. Antecedentes del aprovechamiento forestal en el área de estudio

El aprovechamiento de los recursos forestales y no forestales en la región de Zacualtipán Hidalgo, son variados. Como consecuencia, la deforestación y el cambio de uso de la tierra han sido frecuentes (Ángeles, 1995). Este problema se ha agravado debido al crecimiento de la población y el consecuente incremento de la demanda de productos agrícolas y vivienda, lo que ha conllevado a una reducción del período de barbecho de terrenos y la disminución de la productividad y de la superficie de los recursos forestales (Ángeles, 2009). A raíz de lo anterior, varios ejidos de la región de Zacualtipán se incorporaron a los aprovechamientos forestales a partir de 1982. Actualmente cuentan con programas de aprovechamiento forestal cuidadosamente

planeados que permiten mantener el buen estado de conservación de los bosques. Entre éstos, se encuentra el ejido La Monojera y Atopixco, donde se llevo a cabo el presente trabajo de investigación.



**Figura 1.2.** Delimitación del área de estudio en la región de Zacualtipán, Hidalgo. El delineado rojo muestra los límites de cada rodal en el ejido La Monojera y el azul los del ejido Atopixco. Dentro de cada rodal se observa el año en que se aplicó la corta de repoblación.

El ejido La Monojera está constituido por 316 ha en total, de las cuales aproximadamente 160 se encuentran con aprovechamiento maderable; mientras que el ejido Atopixco cuenta con una superficie de 1,170 ha. De esta forma, ambos ejidos se encuentran con aprovechamiento maderable a partir de 1982, mediante el Método de Desarrollo Silvícola (MDS), en el cual se utiliza el método de repoblación de árboles padres. Este método produce rodales coetáneos, donde la especie de mayor importancia económicamente es *P. patula*. Actualmente las edades de los rodales fluctúan entre 1 a

30 años (Figura 1.2). Además de la corta de repoblación por el método de árboles padres (Castelán- Lorenzo y Arteaga- Martínez, 2009), se aplican cortas intermedias como preparación del sitio, limpias, cortas de liberación, cortas de saneamiento, podas y aclareos.

Constancia de la buena gestión que se le ha dado a éstos bosques es que el 30 de abril de 1991, el Ejido Atopixco recibió el Premio Nacional al Mérito Forestal por parte de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) como reconocimiento al buen aprovechamiento y conservación de sus recursos forestales.

En los rodales intervenidos se encuentran especies como *P. patula*, *P. teocote* Schiede ex Schltdl. y en menor abundancia *P. greggii* y *P. montezumae* Lamb. Principalmente *P. patula* representa la especie de mayor distribución e interés económico en los bosques con aprovechamiento forestal (Velázquez *et al.*, 2004; Castelán- Lorenzo y Arteaga- Martínez, 2009). En las áreas de vegetación natural se encuentran especies como, *Q. excelsa* Liebm., *Q. laurina* Hump et Bonpl, *Q. rugosa* Neé, *Q. castanea* Neé, *Clethra mexicana* D.C., *Cleyera theaeoides*, *Vaccinium leucanthum* Schltdl., *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex D.C., *Viburnum* sp., *Alnus* sp., *Arbutus xalapensis* Kunth., *Prunus serótina* Ehrh., entre otras (Ángeles, 2009; Figueroa *et al.*, 2010), que también pueden estar asociadas en los rodales con aprovechamiento forestal en menor proporción que la especie de interés económico.

## CAPITULO II

### 2. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL SOBRE LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA Y PRODUCTIVIDAD PRIMARIA NETA AÉREA EN UN BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

#### 2.1. RESUMEN

La gestión forestal representa una alternativa para la conservación y mejoramiento de los ecosistemas forestales, a través del incremento de la productividad. La biomasa es función de la productividad y ambos procesos reactivan la mayoría de los procesos funcionales del ecosistema. Sin embargo, la biomasa solo se ha empleado con fines técnicos para estimar los rendimientos totales de madera, sin considerarla como un componente importante de la productividad primaria neta del ecosistema y criterio determinante para la planeación de una gestión forestal sostenible. En el presente capítulo se analizó el efecto del aprovechamiento forestal sobre la acumulación de la biomasa y PPNA en un bosque de *P. patula*, relacionados a la etapa de desarrollo (edad) del rodal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. La biomasa aérea fue estimada con el uso de ecuaciones alométricas específicas, mientras que la PPNA fue estimada con la metodología propuesta por Clark *et al.* (2001). Los resultados mostraron que la biomasa y la PPNA aumentaron con la edad del rodal. El rodal de 30 años de edad (anualidad 1982) presentó una biomasa aérea del 75% de aquella encontrada en el AR (178.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente); con una PPNA de 16.5 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el primero rodal y de 19.1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> para el AR. El rodal más joven (1998) presentó una biomasa de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> y una PPNA de 14.7 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. Con los resultados obtenidos, se concluye que los bosques repoblados con *P. patula* en el área de estudio pueden ser usados para llevar a cabo planes de aprovechamiento forestal sostenible y la información generada es requerida para incrementar y mejorar los almacenes de carbono aéreo a mediano y largo plazo.

**Palabras claves:** silvicultura, aprovechamiento forestal, incrementos en biomasa aérea, caída de hojarasca, ecuaciones alométricas, modelo de Chapman-Richards.

## 2.2. ABSTRACT

Forest management is an alternative for the conservation and improvement of forest ecosystems through increasing productivity. The biomass is a function of the productivity and both processes reactivate most functional ecosystem processes. However, aboveground biomass has been only considered to determine total timber yield, and few attention has been placed in regard it as an important component of net primary productivity (PPN) of the ecosystem and as a determining criterion for sustainable forest management. In this chapter, the effect of forest management on the accumulation of aboveground biomass and PPN was analyzed in a forest of *P. patula*, related to stand development at ejido La Monojera Zacualtipán, Hidalgo. The aboveground biomass was calculated by using specific allometric equations for *P. patula*, and the aboveground PPN was determined with the methodology proposed by Clark *et al.* (2001). The results showed that aboveground biomass and NPP increased with stand age. The 30 years old stand (1982) presented 75% of aboveground biomass found in AR (178.1 and 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectively), while the aboveground PPN was 16.5 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for 1982 stand and 19.1 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup> for AR. The youngest stand (1998) showed an aboveground biomass of 33.1 Mg ha<sup>-1</sup>, and an aboveground NPP of 14.7 Mg ha<sup>-1</sup> yr<sup>-1</sup>. We concluded that the forest regeneration with *P. patula* in the stands in the study site could be used to implement sustainable forest management plans to increase and improve carbon stocks in the mid and long-term, and therefore the timber production.

**Key words:** forestry, forest management, biomass increment, litterfall, allometric equations, Chapman-Richards model.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

La gestión forestal representa una alternativa importante en la reducción de la degradación y deforestación de los ecosistemas forestales (Durán *et al.*, 2007), a través del aprovechamiento sostenible de los recursos maderables y no maderables (Velázquez, 2006). Con el aprovechamiento forestal, se busca lograr el incremento en productividad maderable, mediante la aplicación de diversas prácticas silvícolas (Mendoza, 1993), de tal forma, que éste incremento viene acompañado por el aumento de la biomasa forestal, la cual juega una función importante en el aprovechamiento forestal sostenible a través de la recuperación de diversos procesos funcionales dentro del ecosistema (Escobar *et al.*, 2008). Dichos procesos funcionales redundan no solo en beneficios económicos para la sociedad, sino también en beneficios ambientales y ecológicos que permiten la permanencia de los recursos forestales a largo plazo (von Gadow *et al.*, 2004). Por ejemplo, la conservación de la biodiversidad, formación y mantenimiento de la fertilidad del suelo, circulación de nutrimentos, regulación del microclima, regulación del ciclo hidrológico, almacén de carbono, entre otros (Badano, 2011; Gerez- Fernández y Pineda- López, 2011); en general, servicios ecosistémicos de soporte, regulación, culturales, etc. (MEA, 2005).

La biomasa es una función directa de la productividad del bosque (Keeling y Phillips, 2007). En estos términos, la productividad primaria neta (PPN) es el carbono total asimilado menos la respiración, mientras que la biomasa es la parte de la PPN destinada a la producción de estructuras vegetales (fuste, hojas, ramas, raíces, frutos, etc.). De acuerdo con el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (Penman *et al.*, 2003) el 50% de la biomasa está compuesta por carbono y es definida como la cantidad de materia orgánica viva almacenada en la parte aérea y subterránea del ecosistema. Por tanto, la biomasa representa los recursos (materia orgánica, nutrimentos, energía, etc.) disponibles en el ecosistema (Escobar *et al.*, 2008), los cuales son reflejo de la autoregulación de éste mismo para la producción de madera.

La acumulación de biomasa en los bosques con intervención, provee mecanismos altamente eficaces para el establecimiento de compartimentos y reservorios aéreos y subterráneos para el almacén de nutrientes y carbono (Vitousek y Reiners, 1975). Esto es reflejo directamente de la acumulación y asignación de la biomasa, de la cual una parte es transferida al suelo formando la capa de hojarasca, compuesta por hojas, ramas,

flores, frutos, corteza y otros desechos provenientes de la cosecha forestal (Lupi *et al.*, 2012; Velázquez, 2006). Cuando éstos componentes son incorporados al piso forestal representan una de las principales vías de la circulación de nutrientes y carbono (Goya *et al.*, 2003), participan activamente en la recuperación de los procesos funcionales del ecosistema después del aprovechamiento forestal e influyen en la productividad del mismo (Smith *et al.*, 2000).

El incremento de la productividad, a través de la acumulación de la biomasa a lo largo del tiempo es determinante en la recuperación de dichas funciones en el ecosistema. Por ello, los bosques con intervención forestal son sometidos a un turno con rotación de la vegetación (Barrero *et al.*, 2011; Vignote *et al.*, 2011). A lo largo del turno se aplican diversos tratamientos intermedios (limpias, podas, aclareos, etc.) con el objetivo de mejorar la composición vegetal. Por ejemplo, para eliminar la competencia y favorecer la producción de la madera, el buen desarrollo de los fustes o mejorar la composición de especies (Rush y Sarasola, 2011; Vignote *et al.*, 2011). Así mismo, el desarrollo del rodal a lo largo del turno, debe ser vigilado con el propósito de tomar decisiones adecuadas para una gestión forestal sostenible, el cual está basado en información sobre las condiciones presentes y futuras de los recursos forestales (von Gadow *et al.*, 2004) y donde los datos de períodos largos son indispensables. Para ello, los modelos de crecimiento forestal describen la dinámica del bosque y permiten examinar las opciones de aprovechamiento y alternativas silvícolas. Además, permiten determinar el rendimiento sostenible de madera y los impactos de la gestión forestal sobre otros valores del bosque (Vanclay, 1994; Barrero *et al.*, 2011).

A pesar de lo anterior, en México poco se ha documentado sobre el efecto de la gestión forestal sobre la acumulación de la biomasa y PPNA a lo largo del desarrollo del rodal, lo cual está directamente relacionado con la edad, la especie y el tratamiento silvícola que sea aplicado (Soriano *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2012).

De la superficie forestal en México (138.04 millones de ha) solo el 6% se encuentra con aprovechamiento forestal maderable (CONABIO, 2008), siendo las especies de pino las que representan mayor valor comercial, debido a las propiedades de su madera y alta productividad (Peichl y Arain, 2006). *P. patula* es una de las especies nativas de mayor importancia para la industria maderable por su rápido crecimiento, buena calidad de madera y altos rendimientos (Dvorak, 2000; Velázquez *et al.*, 2004). Sin dejar de

mencionar, que su importancia ecológica reside, en ser una especie pionera que permite la protección y rápida recuperación del suelo en sitios altamente degradados por la deforestación (Velázquez *et al.*, 2004). Sin embargo, pese a existir un amplio número de estudios que cuantifican la biomasa en los bosques de ésta especie, la mayoría van encaminados a la generación de modelos alométricos (Acosta- Mireles *et al.*, 2002; Díaz-Franco *et al.*, 2007; Figueroa *et al.*, 2010; Soriano *et al.*, 2014) o bien, con fines meramente técnicos para la estimación de los rendimientos comerciales en la extracción de la madera (Programas de Aprovechamiento Forestal). Hasta la fecha, la cuantificación de la PPN no se ha considerado como un componente importante, que a su vez, es un criterio determinante para una gestión forestal sostenible (Escobar *et al.*, 2008).

Por lo anterior, el objetivo en éste capítulo fue evaluar el efecto de la gestión forestal sobre la producción de la biomasa y la PPNA en un bosque de *P. patula* en rodales de diferente edad en el ejido La Monojera, en la región de Zacualtipán, en el estado de Hidalgo. Lo cual conllevará también a conocer la contribución potencial de éstos bosques para la captura y almacenamiento de carbono en su biomasa aérea.

## **2.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo e inventario forestal**

En el ejido La Monojera (Figura 1.1) fueron seleccionados rodales de diferente anualidad 1998, 1995, 1990, 1988, 1986, 1984 y 1982 (Figura 1.2). Cada anualidad correspondió al año en que fue aplicada la corta de repoblación. Además, dentro del mismo ejido se seleccionó un área sin aprovechamiento forestal de aproximadamente 80 años de edad, la cual fue utilizada como bosque de referencia (AR). En cada rodal y AR, en el año 2005 fueron establecidas tres unidades de muestreo permanentes (UMP) de 400 m<sup>2</sup> localizadas al azar. Las UMPs permitieron evaluar el incremento de la biomasa aérea a través del tiempo (variación temporal). Dentro de cada UMP se identificaron y etiquetaron todos los individuos de especies arbóreas con una altura  $\geq 1.3$  m y diámetro normal  $\geq 2.5$  cm. Estas variables dasométricas fueron documentadas en los mismos individuos en los años: 2005, 2008 y 2012. En el caso del AR sólo se realizaron registros en el año 2005 y 2012. La edad de cada rodal fue estimada por la diferencia entre el año de realizada la corta y el año de medición.

## 2.4.2. Estimaciones de la biomasa aérea e incrementos

La biomasa aérea total y por tipo de especie fue estimada con el modelo alométrico obtenidos por Soriano *et al.* (2014) para las mismas especies en el área de estudio. Éste modelo utilizó la altura y el diámetro normal como variables independientes que en conjunto, proporcionaron mayor precisión en la estimación de la biomasa aérea. El comportamiento de la biomasa aérea de *P. patula* se analizó en forma separada y en conjunto a la del resto del estrato arbóreo, que incluyó especies latifoliadas como *Quercus excelsa* Liebm., *Q. laurina* Hump et Bonpl, *Q. rugosa* Neé, *Clethra mexicana* D.C., *Cornus disciflora* Moc. & Sessé ex D.C., *Arbutus xalapensis* Kunth., *Vaccinium leucanthum* Schltdl., entre otras. El modelo alométrico presentó la siguiente forma:

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

Donde:  $B$  es la biomasa por árbol,  $dn$  es el diámetro normal,  $h$  es la altura total del árbol y,  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los estimadores, cuyos valores se presentan en la Cuadro 2.1.

**Cuadro 2. 1.** Estimadores estadísticos del modelo alométrico obtenidos por tipo de especie, en la estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural en la región de Zacualtipán, Hidalgo.

Parámetro	<i>Pinus patula</i>	Latifoliadas
<i>Biomasa total:</i>		
$\beta_0$	4.554805	3.109407
$\beta_1$	1.047218	0.952688
<i>Fuste:</i>		
$\beta_0$	4.682959	4.196867
$\beta_1$	1.033543	0.988965
<i>Ramas:</i>		
$\beta_0$	5.510841	6.663739
$\beta_1$	0.951067	1.208846
<i>Corteza:</i>		
$\beta_0$	7.441298	5.630984
$\beta_1$	1.103910	0.949278
<i>Follaje:</i>		
$\beta_0$	4.750974	2.437957
$\beta_1$	0.709796	0.574860

Fuente: Soriano *et al.* (2014).

Por su parte, los incrementos en biomasa aérea (IBA) se obtuvieron por diferencia entre cada año de medición y fueron anualizados de la siguiente forma; de 2005 a 2008 tres

años crecimiento, de 2008 a 2012 cuatro años crecimiento y de 2005 a 2012 siete años crecimiento. Para estimar los incrementos se realizó una corrección por mortalidad de acuerdo al método de Clark *et al.* (2001), donde se estimó la masa de los árboles muertos durante un intervalo de medición de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\text{Inc} = \left( \sum \text{BAS} + \sum \text{BC} \right)$$

Donde: *BAS* es el incremento en biomasa de los árboles que sobrevivieron al final del período de registro y; *BC* es el incremento de los árboles recién incorporados (nuevo crecimiento) al período de registro.

#### **2.4.3. Medición de la caída de hojarasca**

La producción de hojarasca incorporada al suelo y como un componente principal en la estimación de la PPNA, se evaluó con receptores (trampas) de hojarasca (Del Valle, 2003; Bernier y Curtis, 2008; Rocha y Ramírez, 2009). En cada rodal fue seleccionada una UMP al azar, donde fueron colocadas cuatro trampas sistemáticamente a un metro de altura del suelo, con orientación Este-Oeste. Cada trampa representó una superficie de colecta de 0.5 m<sup>2</sup>. Las trampas fueron hechas con malla de Nylon de trama mediana y gran flexibilidad, lo que permitió el paso de la luz, aire y buen drenaje. El contenido de cada trampa se colectó mensualmente de octubre 2006 a septiembre 2008. Finalmente, se obtuvo el peso seco total del material, que incluyó a especies de coníferas y latifoliadas. La hojarasca fue cuantificada en todos los rodales excepto en el de anualidad 1988 y 1984.

#### **2.4.4. Estimación de la Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA)**

La PPNA fue estimada a partir de la siguiente fórmula dada por Clark *et al.* (2001):

$$\text{PPN} = \Delta B + M$$

Donde:  $\Delta B$  corresponde a los incrementos de biomasa aérea anual y *M* son las pérdidas anuales de las plantas por mortalidad (hojarasca).

La proporción en porcentaje de la PPNA de cada uno de los rodales se obtuvo respecto al AR. Ésta variable incluyó a especies de coníferas y latifoliadas. El consumo por herbivoría no fue considerada en este estudio.

#### 2.4.5. Análisis estadísticos

Para predecir el comportamiento de la acumulación de la biomasa aérea con la edad del rodal, se ensayaron con diversos modelos de crecimiento: Gompertz, Chapman-Richards (Peng *et al.*, 2001; Zhao-gang y Fen-ri, 2003; Lei y Zhang, 2004) Holling type III y Schumacher (Peng *et al.*, 2001). En esta modelación, se incluyeron rodales más jóvenes, es decir rodales de anualidades menores a 1998. Sólo se consideraron los registros del año 2012.

La comparación de la biomasa aérea total (especies de latifoliadas más *P. patula*), de la biomasa aérea de *P. patula* y de los incrementos en biomasa aérea total, entre los rodales de diferente edad y entre los distintos años de registro; se realizó a través de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía, para el factor de edad del rodal por un lado y por otro, el año de registro. Posterior a este ANOVA se aplicó una prueba de Tukey, HSD ( $\alpha \leq 0.05$ ). Los modelos de crecimiento y el ANOVA se desarrollaron con la ayuda del paquete estadístico SAS (2009).

### 2.5. RESULTADOS

#### 2.5.1. Modelos de crecimiento en biomasa aérea

De los modelos de crecimiento utilizados en éste estudio para predecir el comportamiento de la producción de biomasa aérea respecto a la edad del rodal, el de Chapman- Richards, Holling Type III y Schumacher fueron los que presentaron el mejor ajuste (Cuadro 2.2). No obstante de acuerdo a los criterios de bondad de ajuste, el primer modelo fue el que presentó el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) más alto, el cuadrado medio (CME) y suma de cuadrados del error (SCE) menores y cuyos parámetros fueron altamente significativos ( $p < 0.0001$ ) (Figura 2.1; Cuadro 2.2).

El modelo de Chapman- Richards presentó una tendencia proporcional entre la producción de biomasa aérea y edad del rodal, mostrando un crecimiento en biomasa aérea acumulado de tipo sigmoidal. El modelo arrojó como resultado tres etapas principales (Figura 2.1). La primera, ocurrió durante los primeros 10 años de edad, donde la producción de biomasa tiende a ser más lenta (mayor acumulación en rodales jóvenes) y aumentó proporcionalmente a la edad del rodal. En la segunda, la

producción se vuelve más acelerada en un menor tiempo hasta llegar a un punto de inflexión entre los 29 y 30 años (152.0 y 170.2 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). En la tercer etapa la producción se volvió mucho más lenta que en la anterior, lo cual sugiere que tiende a su estabilización. De acuerdo al modelo ésta última etapa ocurrirá aproximadamente a la edad de 83 años, con un valor estimado de 290.0 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 2.1).

**Cuadro 2. 2.** Estadísticos de ajuste y parámetros de los modelos para estimar la producción de biomasa aérea en función a la edad en un bosque con aprovechamiento forestal de *Pinus patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

Modelo	Ecuación	Valor de los parámetros	CME	SCE	R <sup>2</sup>	P<0.05
Chapman-Richards	$Ba = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 t})^{\beta_2}$	$\beta_0=244.4219$ $\beta_1=0.0407$ $\beta_2=1.2962$	834.9	85990.9	0.7588	<0.0001 0.0001 <0.0001
Holling type III	$Ba = \frac{\beta_0 t^2}{\beta_1^2 + t^2}$	$\beta_0=213.1237$ $\beta_1=17.5395$	899.1	93506.5	0.7377	<0.0001 <0.0001
Schumacher	$Ba = \beta_0 e^{\frac{-\beta_1}{t}}$	$\beta_0=251.3755$ $\beta_1=14.7470$	940.4	97800.7	0.7257	<0.0001 <0.0001

Ba= Biomasa aérea, t=edad del rodal,  $\beta_i$ = parámetros estimados, CME= Cuadrado Medio del Error y SCE= Suma de Cuadrados del Error.

De acuerdo al modelo de Chapman- Richards el valor máximo del Incremento Corriente Anual (ICA) se presentó a los cinco años con 6.38 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 2.2). No obstante, a esa edad el rodal contaba con 27.3 Mg ha<sup>-1</sup> en biomasa aérea. Por su parte, el Incremento Medio Anual (IMA) alcanzó su máximo a los 12 años de edad, punto en el cual el ICA=IMA con tasas de biomasa aérea de 5.9 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 2.2). A ésta edad la biomasa aérea del rodal fue de 71.3 Mg ha<sup>-1</sup>.

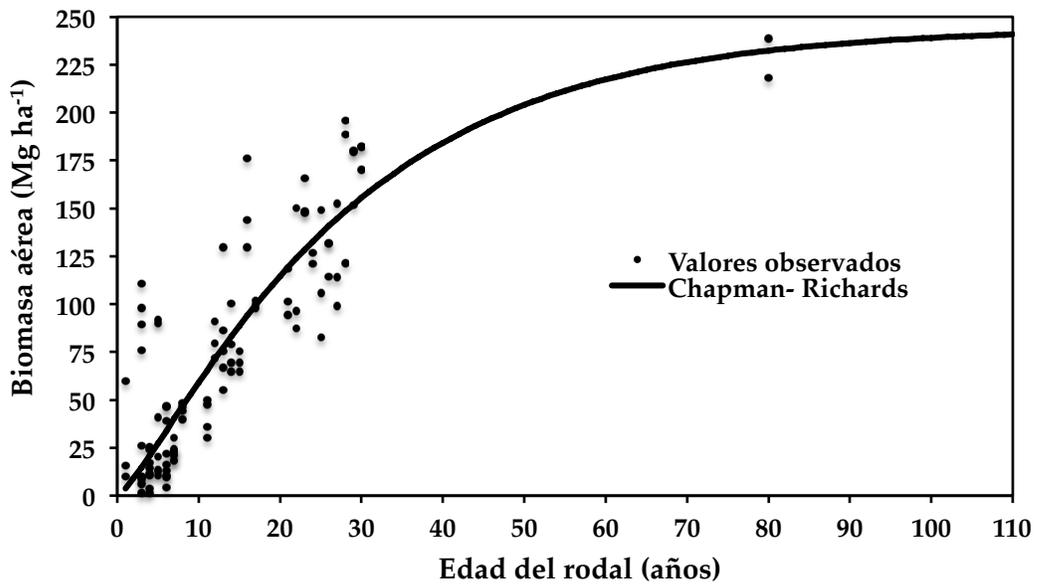


Figura 2. 1. Relación biomasa área-edad en rodales con aprovechamiento de *Pinus patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

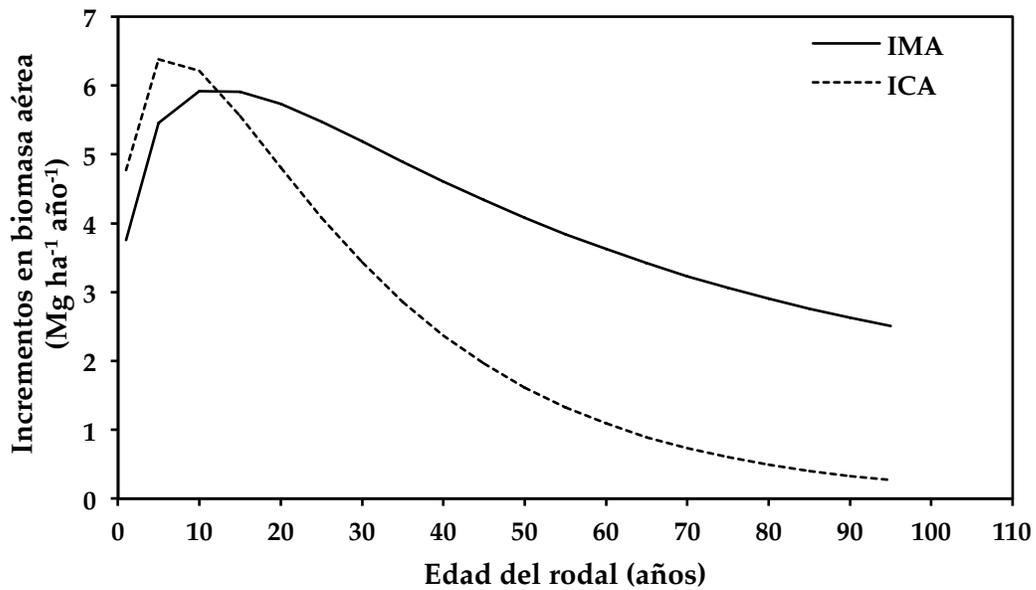


Figura 2. 2. Incremento Corriente Anual (ICA) e Incremento Medio Anual (IMA) de los rodales con aprovechamiento de *Pinus patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

### 2.5.2. Biomasa aérea total y sus incrementos

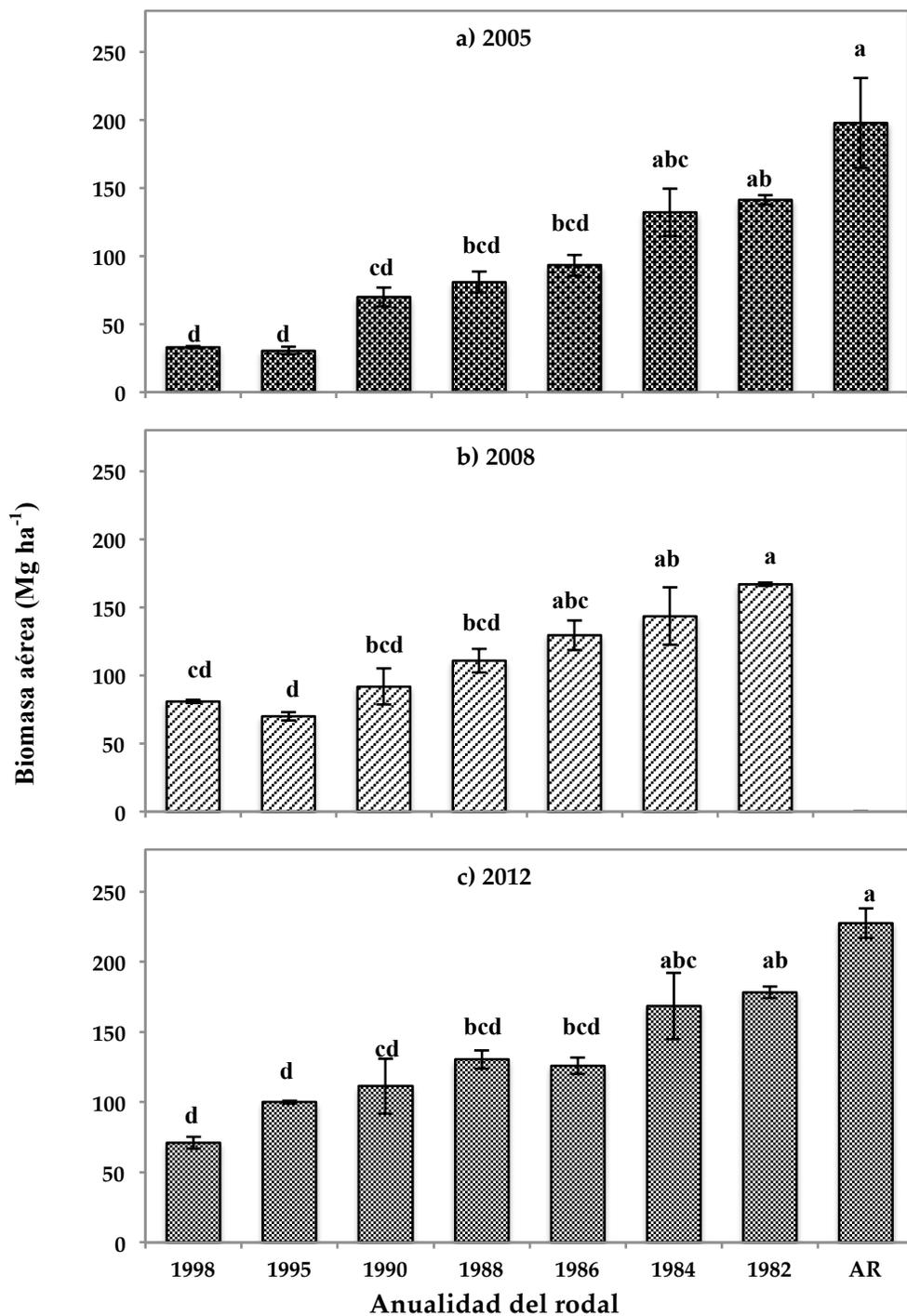
La biomasa aérea total aumentó con la edad del rodal (Figura 2.3), con diferencias estadísticamente significativas entre los rodales ( $p \leq 0.05$ ). En la medición 2005 el rodal más joven de anualidad 1998 (siete años), presentó una biomasa de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> que representó casi una sexta parte de la encontrada en el AR (197.7 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 2.3a), mientras que en la medición 2012, la biomasa del rodal 1998 fue tan sólo tres veces menor a la del AR (71.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) (Figura 2.3c). Por su parte, el rodal de anualidad 1982 a la edad de 23 años (Figura 2.3a), presentó una biomasa de 141.2 Mg ha<sup>-1</sup>, la cual representó el 71% de la encontrada en el AR. Sin embargo después de transcurrir siete años, este mismo rodal (1982) a la edad de 30 años presentó el 78% de la biomasa aérea encontrada en el AR (178.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 2.3c), aunque no presentaron diferencias estadísticas significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los rodales de diferente edad.

Una excepción al comportamiento general de la biomasa aérea con la edad del rodal se presentó en el rodal de anualidad 1995 (Figura 2.3 a y b), el cual presentó entre 9 y 14% menos biomasa aérea que el rodal de menor edad (1998). Éste hecho coincidió con que en el primer rodal la densidad fue dos veces menor que en el rodal de anualidad 1995 (Cuadro 2.3). Es decir, el rodal de anualidad 1998 presentó una densidad de 4,692 y 4,100 árboles.ha<sup>-1</sup> en la medición 2005 y 2008, respectivamente; mientras que el rodal de anualidad 1995 presentó una densidad de 2,292 y 2,208 árboles.ha<sup>-1</sup> en la medición 2005 y 2008, respectivamente. Sin embargo, en la medición 2012 la densidad en el rodal de anualidad 1998 disminuyó drásticamente (>50% de extracción de árboles. ha<sup>-1</sup>), debido a un aclareo aplicado en el año 2011. Por su parte el rodal de anualidad 1995 para éste mismo año de medición (2012) superó en biomasa aérea al rodal 1998 (Figura 2.3c).

Por otra parte, el rodal de anualidad 1998 también presentó una variación temporal en la producción de biomasa aérea, es decir, en la medición 2012 la biomasa aérea fue menor que en la del 2008 (80.8 y 71.1 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), a pesar que no se presentaron diferencias estadísticas significativas (Cuadro 2.4), la densidad en la medición 2012 fue tres veces menor que la del 2008 (Cuadro 2.3). Éste mismo rodal (1998) junto con el rodal de anualidad 1988 y 1986 fueron los que presentaron la mayor extracción de árboles (58, 46 y 28%, respectivamente) (Cuadro 2.3). Sin embargo, de éstos tres rodales, el de anualidad 1988 fue el único en donde la biomasa aérea,

disminuyó de la medición 2008 a la 2012, dado que el aclareo en éste rodal fue aplicado en el año 2009, lo que permitió una recuperación e incluso un aumento de la biomasa aérea removida.

Con relación a los incrementos anuales en biomasa aérea por rodal, se observó una disminución con el aumento de la edad (Cuadro 2.4) y con una variación temporal estadísticamente significativa ( $p \leq 0.05$ ). Por ejemplo, el incremento anual a los tres años de medición (2005-2008) para algunos rodales fue diferente, de aquel obtenido a los siete años (2005-2012) (Cuadro 2.4), pero con tendencia a disminuir a través del tiempo. Sin embargo, en el período de medición de siete años (2005-2012) el AR presentó el mayor incremento comparado con el resto de los rodales con aprovechamiento ( $10.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Por su parte el rodal más joven (7 años) de anualidad 1998, presentó los mayores incrementos ( $16.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).



**Figura 2. 3.** Biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>) del estrato arbóreo en rodales de diferente edad, en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

**Cuadro 2. 3.** Densidad y mortalidad del estrato arbóreo en rodales de diferente edad en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

Anualidad	Densidad (árboles.ha <sup>-1</sup> )			Mortalidad**** (árboles.ha <sup>-1</sup> )	
	2005**	2008	2012	2008	2012
1998	4692	4100	1708	592(12.6%)	239(58.3%)
1995	2292	2208	1917	83 (3.6%)	292(13.2%)
1990	1525	1458	1317	67 (4.4%)	142(9.7%)
1988	1133	1100	592	33 (2.9%)	508(46.2%)
1986	1117	1092	783	25 (2.2%)	308(28.3%)
1984	2308	1908	1808	400(17.3%)	100(5.2%)
1982	4083	3908	3583	175(4.3%)	325(8.3%)
AR*	2150	.***	1867	.	283(13.2%)

\* AR= es un área de referencia (80 años de edad).

\*\* Año en que se realizó la medición.

\*\*\* Los puntos en las celdas indican que no se realizaron mediciones en los años indicados.

\*\*\*\*Entre paréntesis se muestra el porcentaje de mortalidad o extracción de árboles.

**Cuadro 2. 4.** Biomasa aérea e incrementos (Mg ha<sup>-1</sup>) del estrato arbóreo en rodales de diferente edad, en un período de cuatro años de crecimiento (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera Zacualtipán, Hidalgo.

Anualidad	Biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> )			Incrementos en biomasa aérea (Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )		
	2005**	2008	2012	2005-2008	2008-2012	2005-2012
1998	33.1b***	80.8a	71.1a	16.3a	6.1b	7.7b
1995	30.5c	69.7b	99.9a	13.2a	8.3c	10.2b
1990	69.8a	91.8a	111.3a	7.6a	5.8a	6.5a
1988	80.8b	110.7ab	130.3a	10.1a	8.7a	8.8a
1986	93.1a	129.5a	125.9a	12.2a	6.1b	7.6b
1984	131.9a	143.5a	168.4a	11.8a	6.6b	8.8ab
1982	141.2b	166.8a	178.1a	10.4a	6.0b	7.7ab
AR*	197.7a	.****	227.6a	.	.	10.8

\* AR= es un área de referencia (80 años de edad).

\*\* Año en que se realizó la medición.

\*\*\* Dentro de cada rodal, las letras indican una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de los diferentes años de medición ( $\alpha > 0.05$ ).

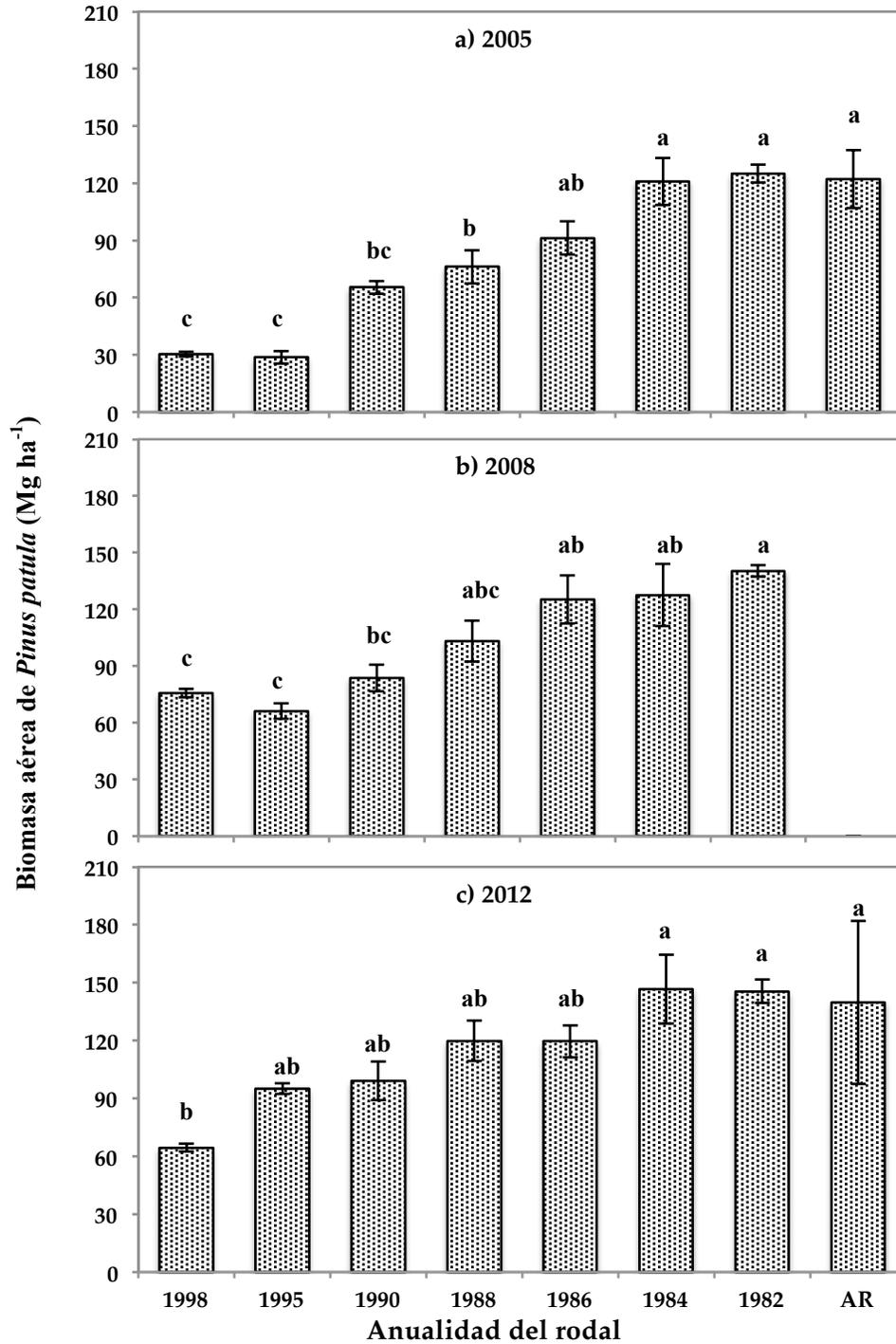
\*\*\*\*Los puntos en las celdas indican que no se hicieron mediciones en los años indicados.

### 2.5.3. Biomasa aérea de *Pinus patula*

El bosque intervenido en éste estudio se encuentra representado en su mayoría por *P. patula* que es la especie de interés comercial para la región. El 94% de la biomasa aérea

estuvo constituida por ésta especie, mientras que sólo el 6% correspondió a latifoliadas. Comparativamente, en el AR la proporción de pino fue menor (65%), debido a una mayor diversidad en la composición arbórea de forma natural.

La tendencia de la biomasa aérea de *P. patula* siguió un patrón ascendente a través del tiempo de medición (Figura 2.4). En la medición 2005 el rodal de anualidad 1998 y el más joven, representó una cuarta parte de la encontrada en el AR (122.6 y 30.4 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente), mientras que para la medición 2012, llegó a representar tan sólo la mitad de la biomasa aérea encontrada en el AR (Figura 2.4 a y c); es decir, el rodal contenía el 47% de la biomasa aérea de *P. patula*. Por su parte, el rodal de anualidad 1982 a la edad de 23 años (Figura 2.4a) contenía una biomasa muy similar a la encontrada en el AR (125.0 y 122.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Mientras que en la medición 2012, los rodales de anualidad 1984 y 1982, superaron en un 35% la biomasa aérea del AR (Figura 2.4c), aun cuando estos tres rodales (1984, 1982 y AR) no presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ).



**Figura 2. 4.** Biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>) de *Pinus patula* en rodales de diferente edad en un período de siete años de crecimiento (2005-2012) en un bosque con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

#### 2.5.4. Productividad Primaria Neta Aérea (PPNA)

La PPNA, al igual que la biomasa aérea, mostró una tendencia, en general, a aumentar con la edad del rodal (Cuadro 2.5), siendo el AR donde se encontró el mayor valor de PPNA (19.1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Sin embargo, el rodal de anualidad 1982 de 30 años de edad fue tan sólo 13% menos productivo que el AR (Cuadro 2.5). Por su parte, la PPNA en el rodal de anualidad 1995, siendo un rodal de los más jóvenes (17 años) del área de estudio, presentó la misma PPNA que la del rodal de anualidad 1982 de 30 años de edad (16.1 y 16.5 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente). Este mismo comportamiento, fue observado en los rodales de anualidad 1998 y 1986, con los valores de PPNA de 14.7 y 14.3 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente.

Es importante mencionar que aunque en el rodal de anualidad 1998 fue donde se presentó el mayor porcentaje (58%) de mortalidad (extracción de individuos) (Cuadro 2.3), su PPNA no mostró ser afectada; ya que fue tan solo 23% menos productivo que el AR.

**Cuadro 2. 5.** Productividad Primaria Neta Aérea (Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

Anualidad	Productividad Primaria Neta área	
	Mg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	% **
1998	14.7	77
1995	16.1	84
1990	13.9	73
1986	14.3	75
1982	16.5	87
AR*	19.1	100

\* AR= es un área de referencia (80 años de edad)

\*\* Porcentaje respecto al AR

#### 2.6. DISCUSIÓN

El efecto del aprovechamiento forestal sobre la acumulación de la biomasa y la productividad primaria neta aérea en un bosque de *P. patula* fue documentado en este capítulo. Se encontró que éstas variables aumentaron con la edad del rodal y biomasa aérea fue muy cercana a la encontrada en un aérea natural e incluso, se encontraron por

arriba de ésta cuando se trató específicamente, de la producción en biomasa de *P. patula*. Lo anterior estuvo influenciado por la aplicación de diversas prácticas silvícolas, que no sólo estimularon la producción del bosque para el aprovechamiento maderable, sino que además, permitieron la recuperación de las funciones del ecosistema a través del aumento de la producción de biomasa.

De los modelos de crecimiento probados, el de Chapman- Richards fue el que presentó el mejor ajuste en relación con la producción de biomasa y edad del rodal (Cuadro 2.2). De esta forma, la acumulación de biomasa para el bosque de *P. patula* mostró un crecimiento sigmoideal (Figura 2.1), el cual es consistente con el crecimiento observado en otras especies forestales (Gower *et al.*, 1996; Ryan *et al.*, 2004; Tateno *et al.*, 2009; Barrero *et al.*, 2011). Los modelos de crecimiento en los ecosistemas con aprovechamiento forestal, representan una herramienta útil para la predicción de los recursos forestales, pero el objetivo más importante es tener el conocimiento del comportamiento del bosque, a través de su desarrollo y predecir los rendimientos futuros, para tomar decisiones acertadas en la aplicación de las prácticas silvícolas y mejorar la condición del bosque (Vanclay, 1994; Schöngart, 2008).

Existe una vasta literatura sobre modelos de crecimiento en ecosistemas forestales con aprovechamiento forestal. Sin embargo, la mayoría de ellos se centran en la descripción del crecimiento en volumen, altura, diámetro y área basal (Calvillo *et al.*, 2005), pero pocos son dirigidos al comportamiento de la biomasa aérea. Un ejemplo es la investigación realizada por Méndez *et al.* (2011) en una plantación de *Pinus devoniana* Lindl. y *P. pseudostrobus* Lindl. de aproximadamente 12 años de edad, en el estado de Guanajuato, México. Ellos encontraron que la máxima producción de biomasa aérea se presentó aproximadamente a los 20 años de edad, con un punto de intersección (ICA=IMA) de 3.96 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y una biomasa aérea predicha de 79.2 Mg ha<sup>-1</sup>. Al comparar dichos valores con los encontrados en el presente estudio, se observó que aunque la biomasa aérea predicha fue aproximadamente igualada en ambos estudios, la edad a la cual se alcanzó la máxima producción fue menor en *P. patula* en el presente estudio. Este hecho le infiere ventaja, por ser una especie de rápido crecimiento y con características bilógicas apropiadas para su rápido establecimiento en sitios degradados (Velázquez *et al.*, 2004).

Éstos resultados podrían beneficiar la reducción en lo sucesivo, de los turnos técnicos de *P. patula* en la región de Zacualtipán, lo cual es uno de los principales aspectos en el aprovechamiento forestal (Barrero *et al.*, 2011). Al respecto, Santiago (2009) encontró que la máxima productividad y rendimiento de ésta especie en la misma zona del presente estudio, ocurrió a la edad de 25 años. No obstante, para tomar esta decisión es importante considerar el turno desde el punto de vista biológico y financiero de la especie, ya que para llevarse a cabo un aprovechamiento forestal sostenible, con un turno técnico en biomasa de 12 años (encontrado en éste estudio), podría ser insuficiente para la autoregulación y recuperación de las funciones del ecosistema después de la corta de repoblación como lo señalan Restrepo y Alviary (2010). Actualmente, los turnos técnicos que se han utilizado en los bosques de *P. patula* con aprovechamiento forestal en México se encuentra entre 30 (Guillespie, 1992) y 40 años (Castelán, 2003).

A pesar de lo anterior, los resultados en éste estudio permitieron observar que la producción de biomasa aérea sigue aumentando con la edad del rodal, aunque sea en menor proporción, tal como lo indican la disminución de sus incrementos a través del tiempo (Cuadro 2.4). Lo anterior, coincide con otras observaciones previamente realizadas en la misma zona de estudio, como la de Cruz (2007), Figueroa *et al.* (2010) y Soriano *et al.* (2014), quienes documentaron que la acumulación de biomasa aérea aumenta con el desarrollo del rodal. Este comportamiento coincidió también con el estudio de Peichl y Arain (2006), quienes al cuantificar la biomasa aérea en bosques de *Pinus strobus* L. a diferentes edades (2, 15, 30 y 65 años), encontraron contenidos de forma ascendente con la edad del bosque (0.5, 66, 92 y 176 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Además, estos contenidos de biomasa aérea fueron muy cercanos a los encontrados en este estudio, en aquellos rodales de edad similar (Cuadro 2.4). Sin embargo, en México existen estudios realizados en ésta misma especie que difieren en gran medida a los encontrados en el presente estudio, tal es el caso de la investigación realizada por Mendoza y Galicia (2010), quienes cuantificaron la biomasa aérea en un bosque de *P. patula* de 12 años de edad en el Cofre de Perote, Veracruz, encontrando una biomasa aérea de 218 Mg ha<sup>-1</sup>, valor tres veces mayor por arriba de la del rodal de anualidad 1995 a la edad de 13 años con sólo 69.7 Mg ha<sup>-1</sup>. Aunque por otro lado, éstos mismos autores también cuantificaron la biomasa aérea en bosques mixtos (*P. patula*, *P. teocote* y *P.*

*oaxacana* Mirov.) de 28 y 30 años de edad, encontrando valores de 74 y 178.1 Mg ha<sup>-1</sup>, los cuales se encontraron por debajo de los registrados en aquellos rodales de edad similar en el presente estudio (Cuadro 2.4). Lo anterior implica que en los bosques templados la composición de especies, la etapa de desarrollo del rodal, el tipo de repoblación (o técnica silvícola) y uso de la tierra es determinante para estimar la heterogeneidad espacial de la capacidad de producción y almacenamiento de biomasa aérea en el ecosistema (Mendoza y Galicia, 2010). Además, los incrementos alcanzados en el bosque de esta especie (*P. patula*) indican que se trata de una especie altamente productiva (por ejemplo, 16 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en el rodal 1998).

Por otra parte, los valores de biomasa encontrados en el rodal de anualidad 1982 a la edad de 30 años, permitió observar que contiene alrededor del 78% de la biomasa aérea encontrada en el AR (178.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente) y con incrementos de 7.7 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>. De acuerdo con el modelo de Chapman- Richards, un rodal de 40 años de edad obtendrá una biomasa del 85% de la encontrada en el AR. Lo anterior es uno de los principales objetivos en la gestión forestal sostenible, es decir, la obtención de producción maderable en el menor tiempo, pero con la misma calidad y cantidad de producción a la de un bosque donde opera la sucesión de forma natural. Al respecto, estudios como el de Xiao *et al.* (2003) quienes cuantificaron la biomasa aérea en un bosque de *Pinus sylvestris* L. de 73 años de edad, encontraron una producción de biomasa aérea de 176.4 Mg ha<sup>-1</sup>, cuyo valor fue aproximadamente 23% menor al encontrado en el AR de éste estudio (227.6 Mg ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, dicho alcance dependerá de la correcta aplicación de los tratamientos intermedios (adicionales a la calidad del sitio) que trae como consecuencia el éxito en el establecimiento, desarrollo y madurez de un rodal en un menor tiempo que en condiciones naturales (Vargas *et al.*, 2008; Santiago *et al.*, 2013).

La densidad en un rodal es el segundo factor de mayor importancia para determinar la productividad en un sitio (Rodríguez *et al.*, 2011; Santiago *et al.*, 2013) y el aclareo es el tratamiento más recurrente que libera espacio de crecimiento, eliminando árboles con características no deseables que compiten por espacio y recursos del sitio en general. Sin embargo, este proceso crea las condiciones idóneas, tales como mayor disponibilidad de luz y la circulación de nutrimentos (Santiago *et al.*, 2013) para que los árboles remanentes mejoren sus características fisiológicas y comerciales (Rötzer *et al.*, 2010).

Las respuestas generalmente son positivas tales como, aumento en diámetro en menor tiempo, mayor producción de frutos y semillas, alta resistencia al ataque de plagas, mayor concentración de N y P en las hojas, aumento del área foliar y tasas de fotosíntesis (Castillo *et al.*, 2003), la mineralización de N en el suelo incrementa, al igual que el contenido de agua debido a la disminución en la evapotranspiración e intercepción de la copa y la regulación de las tasas de acumulación de biomasa durante el desarrollo del rodal (Tateno *et al.*, 2009).

Aunque el efecto de los aclareos en los rodales de éste estudio, se vio reflejado un año después de su aplicación, no necesariamente influyó sobre la biomasa final del rodal. Por ejemplo, los rodales de anualidad 1988 y 1986 fueron los que presentaron mayor extracción de árboles (después de rodal de 1998) (Cuadro 2.3), como consecuencia de los aclareos aplicados en la zona en el año 2009 y 2011. Sin embargo, su biomasa aérea total no ve vio comprometida (Cuadro 2.4), es decir, no disminuyó. La aplicación de los tratamientos intermedios y complementarios en su mayoría son aplicados para mejorar y aumentar la productividad maderable, pero también participan en la recuperación de los procesos de autoregulación del ecosistema (Rodríguez *et al.*, 2011; Santiago *et al.*, 2013). Al respecto, existen estudios que han realizado comparaciones entre diversos bosques con aprovechamiento forestal en Europa, revelando que la aplicación de los tratamientos silvícolas pueden llevar al bosque de ser sumideros de carbono a una fuente, después de la corta; sin embargo, se asume que éste proceso es temporal y en cuanto se establece la vegetación propia de la región el proceso es revertido (Kowalski *et al.*, 2004). Aunque el tiempo en que sucede este proceso no ha sido previamente documentado, con los resultados en el estudio presente, se observó que un rodal a la edad de 7 años (1998) presentó una biomasa de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> (Cuadro 2.4) que representó el 17% de la biomasa aérea encontrada en el AR, es decir casi un 8% de carbono almacenado en su biomasa.

El manejo de la densidad en éste bosque con aprovechamiento forestal es determinante para priorizar la producción de la especie de mayor interés maderable, que en éste caso es *P. patula* (Dvorak *et al.*, 2000 ; Velázquez *et al.*, 2004; Gutiérrez *et al.*, 2005), la cual representó el mayor porcentaje de biomasa aérea (94%) a diferencia de las demás latifoliadas presentes en la zona, tales como *Q. excelsa*, *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Clethra mexicana*, *Cleyera theaoides*, *Vaccinium leucanthum*, *Cornus disciflora*, *Arbutus xalapensis*,

entre otras (Ángeles, 2009; Figueroa *et al.*, 2010). *P. patula* es la especie más ampliamente utilizada en la región de Zacualtipán con alto valor económico y social, pero también es fundamental en la dinámica funcional y sostenibilidad del ecosistema (Velázquez *et al.*, 2004). En México pocos estudios han cuantificado la biomasa aérea de *P. patula* a nivel de ecosistema (Mendoza y Galicia, 2010), limitándose sólo a la estimación de la biomasa aérea a nivel de árbol, mediante modelos alométricos (Castellanos *et al.*, 2008; Acosta-Mireles *et al.*, 2002; Díaz-Franco *et al.*, 2007). Los modelos alométricos existentes en ocasiones, podrían sobreestimar la biomasa, ya que generalmente utilizan sólo el diámetro de los árboles como variable independiente (Mendoza y Galicia, 2010). En la región de Zacualtipán (Estado de Hidalgo) se adicionó la altura del árbol en el proceso de ajuste del modelo alométrico, mejorando significativamente su precisión (Figueroa *et al.*, 2010; Soriano *et al.*, 2014). Este modelo alométrico fue utilizado en el presente estudio, confiriéndole alta precisión a las estimaciones de biomasa aérea en el bosque de *P. patula* para diferentes etapas de desarrollo del rodal en dicha región.

La PPNA en el presente estudio como producto de la cosecha del bosque, no presentó un patrón definido respecto a la edad del rodal; por ejemplo, el rodal 1995 (17 años) presentó un valor de PPNA sólo 2.5% veces menor al rodal 1982 (30 años) (16.5 y 16.1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, respectivamente), mientras que la PPNA en el AR fue mayor al resto de los rodales (19.1 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Este hecho sugiere que la calidad del sitio en el primer rodal podría haber favorecido la producción en el rodal más joven (1995). Al respecto Tateno *et al.* (2009) considera que la disponibilidad de agua, nutrientes y carbono influyen sobre la variabilidad de la PPNA a través del desarrollo del rodal. Por su parte, Keyes y Grier (1981) quienes cuantificaron la PPNA en bosque de *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco, de 40 años de edad, encontrando 13.7 Mg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en PPNA, afirmando que las condiciones de disponibilidad de nutrientes (fertilidad) y agua son altamente determinantes y, que junto con las condiciones ambientales, predisponen el desarrollo de los procesos funcionales, como la formación y acumulación de la biomasa. Por lo anterior, se sugiere que la calidad del sitio es uno de los factores determinantes en la productividad del ecosistema y debería ser considerado en futuras evaluaciones de la biomasa aérea y PPNA en ecosistemas con aprovechamiento forestal.

## 2.7. CONCLUSIONES

La producción de la biomasa aérea en el bosque de *P. patula* aumentó con la edad del rodal; presentó diferencias estadísticamente significativas entre los rodales. El crecimiento en biomasa aérea presentó un crecimiento sigmoideal, similar al de otras especies forestales y la máxima producción de biomasa aérea, de acuerdo al modelo, se presentó aproximadamente a los 12 años de edad.

Los resultados encontrados en un rodal de 30 años (1982) comparados con el AR de aproximadamente 80, permite concluir que los tratamientos silvícolas aplicados en el bosque de *P. patula* con aprovechamiento forestal están contribuyendo, no sólo a que se logren altos rendimientos de producción por unidad de área en un menor tiempo, sino además, permite la autoregulación del ecosistema. Dado que los valores de PPNA obtenidos en este estudio se encontraron por arriba de otros estudios similares en bosques templados, debe ser considerada como un criterio para llevar a cabo un aprovechamiento forestal sostenible y como una alternativa en la mitigación del cambio climático.

Los resultados presentados en éste estudio no son suficientes para determinar la edad exacta en que un bosque recién cosechado pasa de ser una fuente a un sumidero de carbono, pero con los resultados obtenidos es posible proveer una robusta premisa que un rodal de *P. patula* después de siete años de haber sido cosechado, acumula activamente carbono en su biomasa aérea.

Los bosques repoblados con especies de rápido crecimiento como *P. patula* pueden ser usados para implementar nuevos planes de gestión forestal sostenible, ayudar a incrementar y mejorar los reservorios de biomasa aérea, la PPNA y los almacenes de carbono a corto, mediano y largo plazo.

## CAPÍTULO III

### 3. EFECTO DEL APROVECHAMIENTO FORESTAL EN LA ASIGNACIÓN DE BIOMASA AÉREA EN UN BOSQUE DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

#### 3.1. RESUMEN

La asignación de biomasa hacia los componentes estructurales de los árboles es determinante en bosques manejados, tanto en términos de productividad maderable como en la reactivación de los procesos ecosistémicos, tales como la descomposición de materia orgánica, reincorporación de nutrientes al suelo, protección del suelo, regulación del ciclo hidrológico y microclima, etc. En el presente capítulo se analizó el efecto de la gestión forestal sobre la biomasa aérea total y sobre su asignación en diferentes componentes estructurales (fuste, ramas, corteza y follaje) en rodales de diferente edad en un bosque de *P. patula* en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. La biomasa aérea total y por componente fue estimada por rodal y en diferentes años de registro (2005, 2008 y 2012) mediante el uso de modelos alométricos específicos. Se encontró que la biomasa aérea total aumentó con la edad del rodal, con diferencias estadísticas significativas ( $p < 0.0001$ ) entre los rodales de diferente edad. El rodal más joven (siete años) presentó una biomasa aérea de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup>, que representó una quinta parte de la biomasa estimada en un aérea sin aprovechamiento forestal (AR), mientras que el rodal de 30 años presentó una biomasa aérea de 178.1 Mg ha<sup>-1</sup>, sólo 20% menor a la del AR. La asignación de biomasa presentó el siguiente orden: fuste > ramas > corteza > follaje. Como consecuencia de la aplicación de las prácticas silvícolas, la asignación de biomasa fue favorecida hacia fuste como un producto maderable altamente comercial. No obstante el resto de los componentes participa activamente en la recuperación de diversos procesos funcionales del ecosistema, después de la aplicación de la corta de repoblación, generando la provisión de bienes y servicios que permiten la permanencia de los recursos forestales a largo plazo.

**Palabras clave:** gestión forestal, tratamientos silvícolas, aclareos, componente estructural, rodal, fuste, follaje, ramas.

### 3.2. ABSTRACT

The aboveground biomass allocation to the structural components of the trees in managed forests is crucial, both in terms of timber productivity and in the reactivation of ecosystem processes, such as organic matter decomposition, nutrients return to the soil, soil protection, regulation of microclimate and hydrological cycle, etc. In this chapter we analyzed the effect of forest management on aboveground total biomass and its allocation into structural components (stem, branches, bark and foliage) in stands of different age in *P. patula* managed forests in Zacualtipán, Hidalgo. The aboveground total biomass and its allocation on structural components were estimated by stand and in different years (2005, 2008 and 2012) by using specific allometric equations. We found that aboveground biomass increased with age, with highly significant differences ( $p < 0.0001$ ) between stand ages. The youngest stand (seven year-old) showed a aboveground biomass of 33.1 Mg ha<sup>-1</sup>, that represents one fifth of the aboveground biomass estimated for the unmanaged area (AR), on the other hand, in the 30 year-old stand the aboveground total biomass was 178.1 Mg ha<sup>-1</sup>, which was 20% lower than the AR. Aboveground biomass allocation resulted in the following order: stem > branches > bark > foliage. As a result of the silvicultural practices, the aboveground biomass allocation to stem was favored as a commercial timber product. However, the remaining components were highly involved in the recovery of various functional processes in the ecosystem after harvesting, which generates the provision of goods and services that allow the permanence of forest resources in the long-term.

**Key words:** managed forests, silvicultural practices, thinning, structural components, stand, stem, foliage, branches.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

El aumento de la producción maderable como resultado de la agestión forestal, trae como resultado el incremento de la biomasa y su redistribución en los distintos componentes estructurales de los árboles (Bazzaz, 1997). De tal forma que ésta redistribución influye en el funcionamiento del bosque detonando múltiples procesos del ecosistema como son: la fijación de carbono, recirculación de nutrimentos, mantenimiento de la fertilidad del suelo, protección contra la erosión, regulación del ciclo hidrológico, etc. (Castillo *et al.*, 2003; Escobar *et al.*, 2008; Gerez- Fernández y Pineda- López, 2011; León *et al.*, 2011), permitiendo la permanencia de los recursos forestales en el corto y largo plazo.

La asignación de biomasa dependerá de la función de cada uno de los componentes dentro del ecosistema (Bazzas, 1997). Por ejemplo, la asignación de biomasa hacia fuste influirá sobre la producción de madera o en la conducción de nutrimentos y agua (von Gadow *et al.*, 2004); hacia las ramas, influirá en la producción de mayor cantidad de combustible; mientras que hacia el follaje, podría influir sobre la cantidad de producción y las tasas de reincorporación de nutrimentos hacia el piso forestal. En éste último proceso el follaje y otros residuos (ramas, ramillas, despunte de trozas, etc.) productos del aprovechamiento forestal, se reincorporarán al piso forestal como componentes aún no senescentes. Éstos residuos tienen otro tipo de aprovechamiento, por ejemplo, pueden ser eliminados mediante quemas controladas que disminuyen la carga extrema de combustible (Mendham *et al.*, 2003), ser acomodados en franjas de acuerdo a las condiciones de sitio o bien, pueden ser distribuidos y reincorporados al suelo favoreciendo la reincorporación y disponibilidad de nutrimentos en el suelo (Lupi *et al.*, 2012).

Desde el punto de vista funcional estos residuos participarán activamente en los procesos funcionales del ecosistema (Smith *et al.*, 2000). Por ejemplo, los residuos del aprovechamiento contienen una proporción considerable de material vegetal fresco, lo que implica que tiene una composición química distinta al material que es desechado cuando un árbol presenta un proceso de senescencia natural sufriendo el proceso de resorción, proceso que permite economizar nutrientes (Aerts, 1996; Luysaert *et al.*, 2005). De acuerdo con varios estudios, el follaje verde tiene mayor calidad, es decir, mayor contenido de nutrimentos (principalmente nitrógeno) que el follaje senescente

(Pérez-Suárez *et al.*, 2009). Lo anterior tiene implicaciones en las tasas de reincorporación de nutrimentos al piso forestal, influyendo a largo plazo en la fertilidad y productividad del mismo (Smith *et al.*, 2000).

El período de tiempo en el que las funciones del ecosistema se restablecen después de la corta de repoblación es importante y aunque no se ha documentado el tiempo en el que la vegetación se establece; las condiciones en que se lleva a cabo el desarrollo del rodal es importante para que pueda llegar con éxito a su madurez. Los bosques con aprovechamiento forestal son sometidos a un turno de corta (rotación) que es el elemento silvícola que más influye sobre la cantidad y calidad de la madera producida (Vignote *et al.*, 2011). A medida que el bosque madura la asignación de biomasa se dirige al incremento de volumen en fuste, y en algunas especies con poda natural la cantidad de ramas se reduce, pero en consecuencia se restablecen funciones ecológicas del ecosistema. Para que lo anterior ocurra, diversos tratamientos intermedios son aplicados a lo largo del turno con el fin de controlar la densidad, mejorar la composición vegetal y que la biomasa se distribuya de tal forma, que permita el mantenimiento de los recursos forestales (von Gadow *et al.*, 2004).

Además de la etapa (edad) de desarrollo del bosque y el tratamiento silvícola aplicado (Soriano *et al.*, 2014; Rodríguez *et al.*, 2012), también el tipo de especie influye directamente sobre la asignación de la biomasa. En México, *P. patula* es una especie nativa que tiene alto potencial silvícola debido a su elevada capacidad de producción de biomasa y rápido crecimiento (Dvorak, 2000; Velázquez *et al.*, 2004). Se establece en suelos más ácidos que otras coníferas (pH=3.1- 6.0), presenta alta relación C:N y altos contenidos de materia orgánica (Velázquez *et al.*, 2004). Éstas capacidades le permite desarrollar fustes rectos, libres de ramas (40 al 60% de su altura) con poda natural adecuada (Perry, 1991), buena calidad de la madera (baja contenido de resinas) y puede alcanzar alturas y diámetros normales morfológicamente adecuados para la industria del aserrío (Velázquez *et al.*, 2004). Además, el crecimiento del follaje tiende a formar copas pequeñas que cubren márgenes reducidos respecto a la altura total del árbol (Patiño y Kageyama, 1992; Velázquez *et al.*, 2004). Finalmente, *P. patula* es una especie perennifolia que presenta al menos dos flujos de crecimiento durante un año y en promedio mantiene sus hojas dos años; conforme se alargan los flujos de crecimiento las hojas senescentes van cayendo paulatinamente, propiciando un aporte continuo de

materia orgánica al piso forestal (Vela, 1980; Velázquez *et al.*, 2004). Éste enriquecimiento es complementado con follaje de otras especies latifoliadas como *Quercus* sp., que se establecen en los bosques intervenidos de *P. patula* (Velázquez *et al.*, 2004).

Aunque los estudios en biomasa para conocer la asignación en los diversos componentes de los árboles en especies forestales son frecuentes (Acosta- Mireles *et al.*, 2002; Gómez-Díaz *et al.*, 2011; Díaz- Franco *et al.*, 2007; Figueroa *et al.*, 2010; Soriano *et al.*, 2014), la mayoría son a nivel de individuo y están encaminados a la generación de funciones matemáticas para la estimación de biomasa total y de carbono; o bien, para el mejoramiento genético y establecimiento de plantaciones de la especie (Morales-González *et al.*, 2013). No obstante, no se ha considerado el efecto de la aplicación de los tratamientos silvícolas sobre la asignación de biomasa aérea hacia los diferentes componentes estructurales de los árboles. Bajo el esquema de gestión forestal, se esperaría que la asignación de biomasa estuviera dirigida principalmente hacia el incremento del fuste (Schuur, 2003; Pregitzer y Euskirchen, 2004; Keeling y Phillips, 2007), sin embargo ¿Cuál es la importancia de la asignación de biomasa hacia otros componentes como ramas, follaje y corteza? y ¿Cuál sería su contribución en la recuperación de las funciones del bosque después de un aprovechamiento forestal?

El objetivo del presente capítulo fue evaluar el efecto de la gestión forestal en la biomasa aérea total y en su asignación hacia diferentes componentes estructurales (fuste, ramas, corteza y follaje) en rodales de diferente edad en un bosque de *P. patula* con intervención forestal en el ejido La Monojera Zacualtipán, Hidalgo.

### **3.4. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo y medición de variables dasométricas**

En el ejido La Monojera (Figura 1.1) fueron seleccionados rodales con las siguientes anualidades 1998, 1995, 1991, 1988, 1984 y 1982 (Figura 1.2). Cada anualidad correspondió al año en que fue aplicada la corta de repoblación. Adicionalmente, se seleccionó un bosque sin intervención silvícola de aproximadamente 80 años de edad, el cual fue utilizada en el presente estudio como aérea de referencia (AR). En cada rodal y

AR se establecieron al azar tres unidades de muestreo permanentes (UMP), cada una de 400 m<sup>2</sup>, en el año 2005. Las UMPs permiten evaluar el comportamiento de la asignación de biomasa aérea del bosque a través del tiempo (variación temporal). Dentro de cada UMP se identificaron y etiquetaron todos los individuos arbóreos con una altura  $\geq 1.3$  m y diámetro normal  $\geq 2.5$  cm. Estas variables dasométricas fueron documentadas en los mismos individuos en los años 2005, 2008 y 2012; en el caso del AR se hicieron registros sólo en 2005 y 2012. La edad de los rodales con intervención fue resultado de la diferencia entre la anualidad y el año de registro.

### 3.4.2. Estimación de la biomasa aérea total y por componente estructural

La biomasa aérea total y por componente estructural (fuste, ramas, corteza y follaje) fue estimada con el modelo alométrico obtenido por Soriano *et al.* (2014) para la misma especie en la misma área de estudio. La biomasa aérea total incluyó diferentes especies de latifoliadas (*Quercus excelsa*, *Q. laurina*, *Q. rugosa*, *Clethra mexicana*, *Cornus disciflora*, *Arbutus xalapensis*, *Vaccinium leucanthum* y *P. patula*). El modelo alométrico presentó la siguiente forma:

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

Donde:  $B$  es la biomasa por árbol,  $dn$  es el diámetro normal,  $h$  es la altura total del árbol y;  $\beta_0$  y  $\beta_1$  son los estimadores, cuyos valores se presentan en la Cuadro 1.1 (Capítulo II).

### 3.4.3. Análisis estadístico

La comparación de biomasa aérea total entre los rodales se realizó a través de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía usando como factor la edad del rodal, seguido de una prueba de Tukey HSD ( $\alpha \leq 0.05$ ), con el paquete estadístico SAS (2009). La proporción en porcentaje para cada componente se estimó a partir de la biomasa total, para comparar la asignación de biomasa aérea entre las diferentes edades de los rodales. Esto se realizó para cada año de registro (2005, 2008 y 2012).

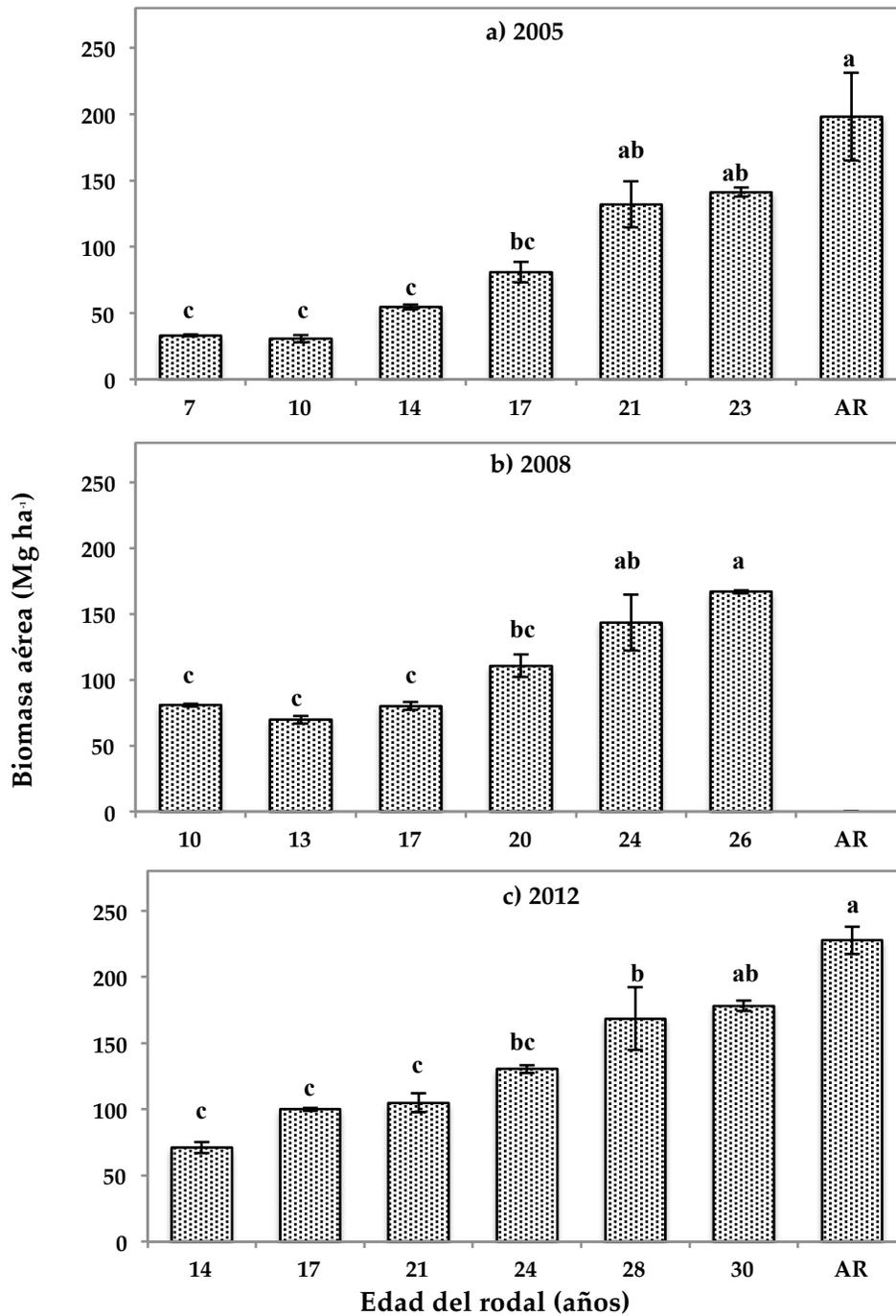
### 3.5. RESULTADOS

#### 3.5.1. Biomasa aérea total

La biomasa aérea total presentó una tendencia general a aumentar con la edad del rodal (Figura 3.1), con diferencias estadísticas altamente significativas ( $p < 0.0001$ ) entre los rodales. En la medición 2005 el rodal más joven (siete años) presentó una biomasa de 33.1 Mg ha<sup>-1</sup> que representó una quinta parte de la encontrada en el AR; mientras que el rodal de mayor edad (23 años) presentó una biomasa de 141.2 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 3.1a) la cual fue tan sólo 28% menor a la del AR (Figura 3.1a). Una excepción, se presentó en el rodal de 10 años de edad (Figura 3.1a) que presentó aproximadamente 10% menos de la biomasa aérea total de la encontrada en el rodal de siete años (Figura 3.1a), debido a que en el primer rodal la densidad fue dos veces mayor que en el segundo rodal (Cuadro 3.1). Lo mismo ocurrió para la medición 2008. Así mismo, se observó el efecto de la aplicación de aclareos sobre la biomasa aérea total; esto es, en algunos rodales para la medición 2012 presentaron una disminución en biomasa comparada con la que se observó en la medición 2008 (Figura 3.1c). Lo anterior, fue por efecto de la aplicación de aclareos, durante el período de seguimiento. Por ejemplo, el rodal de anualidad de 1998 tuvo una disminución en su densidad de 4,100 árboles.ha<sup>-1</sup> en 2008 a 1708 árboles.ha<sup>-1</sup> en 2012 (más del 50% de extracción de árboles).

Por su parte, el rodal de anualidad 1988 fue el segundo en donde se observó una alta disminución en densidad de árboles, de 1,100 a 592 árboles.ha<sup>-1</sup> de 2008 a 2012 (46% de extracción de árboles), sin embargo no se observó disminución en biomasa dado que el aclareo se realizó en 2009, y el rodal tuvo la oportunidad de recuperar e incluso aumentar la biomasa removida.

La variación temporal de la densidad de árboles fue menor en etapas más avanzadas de desarrollo de los rodales. El rodal de anualidad 1984 y 1982 presentaron sólo el 5 y 8% de disminución en la densidad. Éste último rodal a la edad de 30 años (Figura 3.1c) presentó el 78% de la biomasa aérea de la contenida en el AR con 80 años de edad aproximadamente (178.1 y 227.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente).



**Figura 3. 1.** Biomasa aérea total (Mg ha<sup>-1</sup>) en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

**Cuadro 3. 1.** Área basal y densidad en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

Anualidad	Área basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )			Densidad (árboles.ha <sup>-1</sup> )		
	2005	2008	2012	2005	2008	2012
1998	21.3	35.7	25.7	4692	4100	1708
1995	14.8	27.5	34.5	2292	2208	1917
1991	17.9	23.5	27.9	733	733	700
1988	24.5	30.4	31.4	1133	1100	592
1984	32.6	31.4	34.9	2308	1908	1808
1982	36.1	39.7	39.9	4083	3908	3583
AR	36.7	**	38.2	2150	.	1867

\* AR= área sin aprovechamiento forestal de aproximadamente 80 años de edad.

\*\* Los puntos en las celdas indican que no se realizó medición en ese año.

### 3.5.2. Biomasa aérea por componente

La distribución de la biomasa aérea en los diferentes componentes estructurales, dentro de cada rodal presentó el siguiente orden descendente: fuste > ramas > corteza > follaje (Cuadro 3.2). Así mismo, el contenido de biomasa en cada uno de los componentes aumentó con la edad del rodal, excepto en el rodal de anualidad 1998 que presentó aproximadamente 1.5 veces mayor biomasa en cada uno de éstos componentes, que el rodal de anualidad 1995 de mayor edad (Cuadro 3.2). Sin embargo, sólo en el rodal de anualidad 1995 se presentó una disminución de biomasa en todos los componentes en la medición 2012 respecto a la 2008 (Cuadro 3.2).

El fuste fue el componente estructural con mayor contenido y asignación respecto a la biomasa aérea total (Cuadro 3.2 y Figura 3.2). Este componente presentó una biomasa de 25 Mg ha<sup>-1</sup> en un rodal de siete años (anualidad 1998) que representó una quinta parte de la contenida en el AR. Mientras, que el rodal de mayor edad (30 años) presentó una biomasa de 125 Mg ha<sup>-1</sup> que fue aproximadamente 20% menor a la estimada en el AR (Cuadro 3.2). Éste rodal presentó una disminución en la asignación de biomasa hacia fuste, la cual se debió a la disminución en su densidad y mayor asignación hacia ramas. En las primeras etapas de desarrollo de los rodales (7, 10 y 14 años) se presentó una asignación de biomasa en fuste de 69 a 72% (Figura 3.2). A medida que los rodales aumentaron en edad la asignación se mantuvo relativamente constante entre 70 y 71%

de la biomasa total (Figura 3.2). Finalmente, la asignación de biomasa aérea hacia éste componente en el AR fue menor hasta en un 66% de la biomasa total (Figura 3.2a y c).

Las ramas fueron el segundo componente estructural con mayor contenido y asignación respecto a la biomasa aérea total (Cuadro 3.2 y Figura 3.2), el cual disminuyó con el aumento en edad de los rodales con aprovechamiento forestal. El mayor porcentaje se presentó en el rodal de siete años con una asignación del 17% de la biomasa total y disminuyó hasta un 14% en el rodal de mayor edad (30 años), mientras que la asignación de biomasa en las ramas en el AR fue más alta, hasta un 19% de la biomasa total (Figura 3.2).

Por su parte, la asignación hacia corteza presentó una tendencia general de aumento con la edad. Sin embargo, en las últimas etapas de desarrollo se mantuvo constante (23-30 años), incluyendo al AR, la cual presentó el mismo porcentaje, que fue del 9% (Figura 3.2).

Finalmente, el follaje fue el componente estructural con el menor contenido y asignación respecto a la biomasa aérea total (Cuadro 3.2 y Figura 3.2). Éste componente presentó un patrón general a disminuir con la edad del rodal. Aunque en los rodales más jóvenes fue donde se presentaron los mayores porcentajes, con 9 y 7% en el rodal de siete y 10 años, respectivamente (Figura 3.2), disminuyendo en los rodales de edad intermedia (14, 17 y 21 años), hasta un 4% (Figura 3.2a). En el rodal de 30 años ésta asignación representó el 5 % (Figura 3.2c) coincidiendo con el AR, hablando de biomasa aérea asignada a éste componente (Figura 3.2a y c).

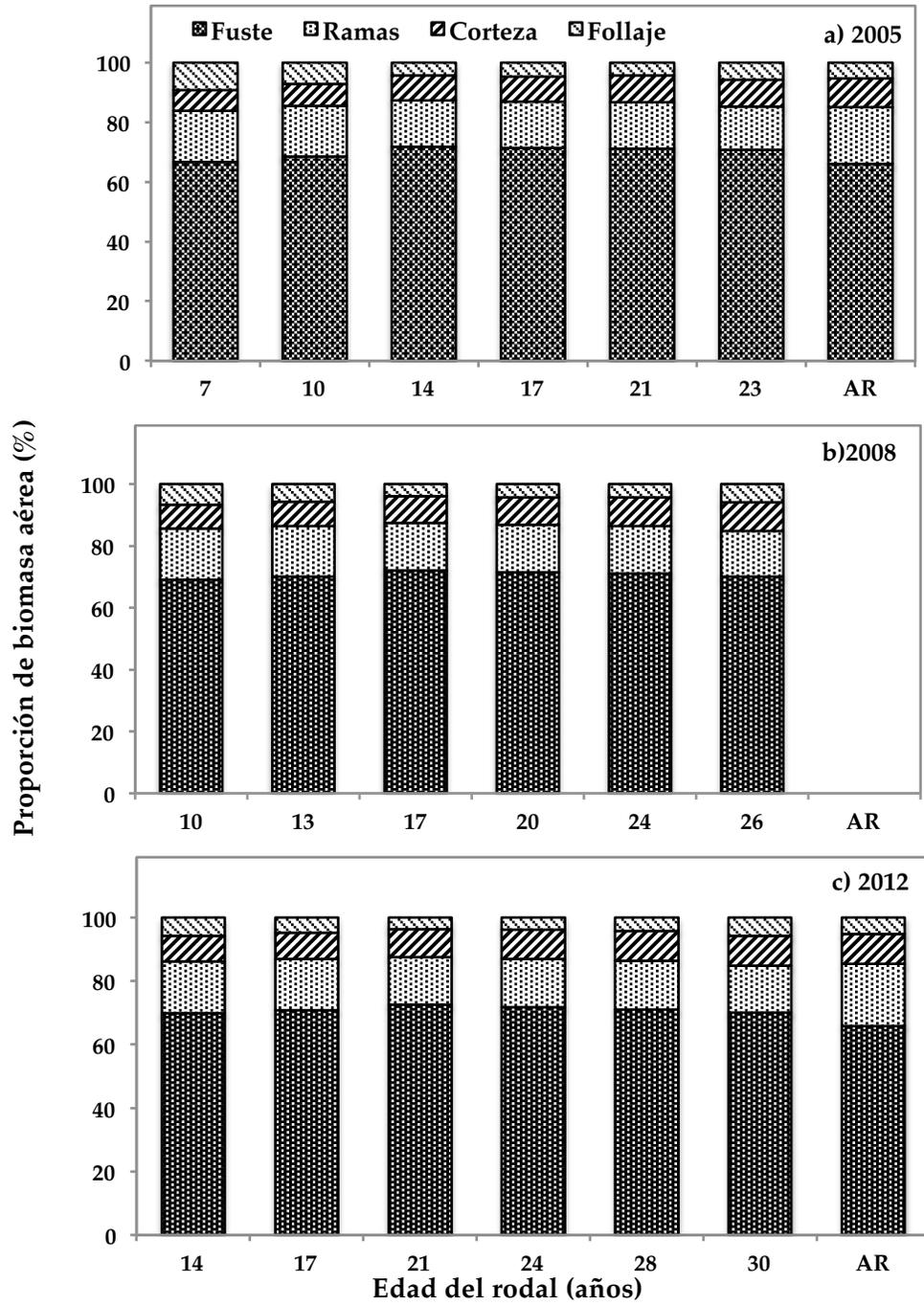
**Cuadro 3. 2.** Biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>) por componente en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo.

<b>Anualidad</b>	<b>Componente</b>	<b>2005</b>	<b>2008</b>	<b>2012</b>
1998	Fuste	25.65	62.38	53.68
	Ramas	6.65	15.04	12.62
	Corteza	2.66	6.84	6.21
	Follaje	3.55	6.03	4.38
	Total*	38.50	90.30	76.88
1995	Fuste	23.71	53.88	76.79
	Ramas	5.88	12.61	17.37
	Corteza	2.54	6.06	8.90
	Follaje	2.50	4.34	5.30
	Total	34.63	76.89	108.37
1991	Fuste	42.49	61.82	80.57
	Ramas	9.20	13.09	16.68
	Corteza	4.96	7.40	9.85
	Follaje	2.56	3.36	3.96
	Total	59.21	85.67	111.07
1988	Fuste	61.40	83.45	97.23
	Ramas	13.34	17.91	20.64
	Corteza	7.37	10.24	12.27
	Follaje	4.03	5.01	5.28
	Total	86.14	116.61	135.43
1984	Fuste	98.28	105.06	122.13
	Ramas	21.33	22.63	26.54
	Corteza	12.43	13.72	16.17
	Follaje	6.07	6.37	7.25
	Total	138.10	147.78	172.09
1982	Fuste	103.21	119.18	125.58
	Ramas	21.18	24.86	26.45
	Corteza	13.26	15.69	16.83
	Follaje	8.43	10.06	10.47
	Total	146.08	169.80	179.34
AR**	Fuste	127.55	.***	146.96
	Ramas	36.78	.	43.39
	Corteza	18.35	.	20.98
	Follaje	10.39	.	11.65
	Total	193.06	.	222.98

\* Biomasa aérea total estimada como la suma de la estimación por componente.

\*\* AR= es un área de referencia (80 años de edad)

\*\*\* Los puntos en las celdas indican que no se realizó medición en ese año.



**Figura 3. 2.** Asignación de biomasa aérea (%) por componente en rodales de diferente edad, a través de un período de siete años (2005-2012), en un bosque de *Pinus patula* con gestión forestal en el ejido La Monojera, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

### 3.6. DISCUSIÓN

En el presente trabajo se evaluó el efecto de la cosecha del bosque sobre la biomasa aérea total y su asignación hacia distintos componentes estructurales de los árboles en un bosque de *P. patula* en rodales de diferente edad en la región de Zacualtipán, Hidalgo; encontrando que la biomasa aérea total aumentó conforme aumentó la etapa de desarrollo del rodal. Esto coincide con otras observaciones previamente realizadas en la misma área de estudio, como la de Cruz (2007), Figueroa *et al.* (2010) y Soriano *et al.* (2014) quienes de igual forma, observaron que la acumulación de biomasa aérea aumenta con la edad de los rodales.

Uno de los principales objetivos de la gestión forestal sostenible es la producción de madera en el menor tiempo, pero con la misma calidad y cantidad de producción a la de un bosque donde opera la sucesión en condiciones naturales. Este objetivo se cumple parcialmente en el área de estudio, ya que en el rodal de mayor edad (30 años) presentó una biomasa aérea total alrededor del 78% de la estimada en el AR (Figura 3.1c). Lo anterior sugiere que los tratamientos aplicados durante el desarrollo de los rodales intervenidos, como parte del plan de aprovechamiento establecido para el área de estudio, han venido cumpliendo con el objetivo de la gestión forestal para aumentar la producción de biomasa aérea total. El aclareo es una corta intermedia que se aplica con mayor recurrencia a nivel regional y de acuerdo a la literatura es el segundo factor en importancia para controlar la estructura, la productividad, el tamaño de los árboles y la asignación de biomasa hacia los componentes estructurales de los árboles (Arias, 2004; Rodríguez, 2010; Rodríguez *et al.*, 2012). El aclareo estimula el crecimiento en diámetro de los árboles, y en menor medida en altura, a través del control de la densidad tanto como se requiera en cada rodal (Allen *et al.*, 2002; Velázquez *et al.*, 2004).

Durante el período de estudio, se registró la aplicación de aclareos en el año 2009 y 2011 en algunos rodales, que si bien es cierto que disminuyeron la densidad en los rodales de anualidad 1998 y 1988; los valores en el área basal (AB) sugirieron que la productividad de los rodales y la asignación de la biomasa hacia el fuste no se vio comprometida, ya que aumentaron con el aumento en edad del rodal (Cuadro 3.1). El rodal de mayor edad (30 años) presentó un AB 5% mayor que el AR (Cuadro 3.1). En términos de producción, si la biomasa aérea del rodal de mayor edad (30 años) se proyectara a la edad de 40 años, que corresponde al turno de corta determinado para la región y

bosques dominados por *P. patula*, la biomasa que contendrá será mucho más cercana a la del AR (Chávez *et al.*, 2014); aunque dependerá de los incrementos en biomasa y de la asignación de biomasa dirigida hacia el fuste.

Desde el punto de vista productivo del bosque, la mayor asignación de biomasa hacia el fuste sugiere que fue favorecida por la aplicación de los aclareos, los cuales promueven la redistribución del espacio de crecimiento entre los árboles remanentes (Rötzer *et al.*, 2010). Al respecto, Rodríguez *et al.* (2011) encontraron que en un bosque de *P. patula* sometido a diferentes niveles de aclareos presentó aumentos significativos en la asignación de biomasa hacia el incremento en diámetro del fuste a cualquier nivel de aclareo, mientras que la eliminación de especies competidoras también estimuló el crecimiento de los árboles en altura. Además, estos tratamientos permiten el logro de las dimensiones comerciales adecuadas de los árboles en menor tiempo. De acuerdo con Velázquez *et al.* (2004), las medidas comerciales reportadas para *P. patula* van de 10 a 20 m de altura y de 25 a 50 cm de diámetros normales.

La asignación de biomasa en fuste varió con la edad de los rodales, coincidiendo con el hecho que en un bosque joven será mayor que en un bosque viejo, tal como ocurrió en este estudio. Por ejemplo, mientras que un rodal de 14 años mostró una asignación de 70%, el AR de aproximadamente 80 años de edad mostró una asignación del 66% (Figura 3.2). Este comportamiento podría responder, a lo mencionado por algunos estudios, donde aseveran que un bosque joven requiere mayor cantidad de carbohidratos asignados al fuste para el incremento en biomasa, para soporte y para un desarrollo funcional eficiente en la conducción de nutrimentos y agua de las raíces hacia el fuste (Ryan *et al.*, 1997). Sin embargo, la asignación puede declinar con la edad del bosque, debido a la disminución de la productividad primaria neta y las tasas de acumulación de biomasa, por el aumento en los procesos de respiración (Tateno *et al.*, 2009). Aunque, la asignación de biomasa en un área sin aprovechamiento podría también estar influenciada por la composición de especies, dado que la distribución será diferente en coníferas que en latifoliadas (Villar *et al.*, 2004) y debido a que el hábito de crecimiento en uno y otro grupo de especies es diferente. Estos valores en asignación de biomasa hacia fuste coincidieron con los intervalos encontrados en otras investigaciones como la de Soriano *et al.* (2014) y Figueroa *et al.* (2010), quienes encontraron que entre el 68% y 85% de biomasa es asignada hacia fuste en *P. patula*.

Desde el punto de vista funcional del bosque, los aclareos podrían provocar un efecto similar al de la fertilización (Imbert *et al.*, 2004), ya que con la apertura del dosel existe mayor penetración de luz, aumentando la disponibilidad y recirculación de nutrientes al disminuir la competencia. Uno de los destinos de estos nutrientes podría ser hacia el almacén en los diferentes reservorios que también dependerá del incremento anual en biomasa del ecosistema (Vitousek y Reiners, 1975; Imbert *et al.*, 2004). Paralelamente, los aclareos también favorecen el establecimiento de una amplia diversidad de especies en el sotobosque (Guariguata y Ostertag, 2002), así como mayor producción de frutos y semillas, alta resistencia al ataque de plagas, mayor concentración de nutrientes en las hojas, aumento en área foliar y en las tasas de fotosíntesis (Castillo *et al.*, 2003), lo que repercute en la autoregulación del bosque.

Un componente importante con relación a la producción maderable, es la formación de ramas. En éste estudio los tratamientos silvícolas disminuyeron la asignación de biomasa hacia ramas conforme aumentó la edad del rodal. No así para el AR, donde la asignación de biomasa en ramas fue mayor debido a una riqueza de especies arbóreas, principalmente de especies latifoliadas con hábito de crecimiento simpódico y mayor distribución de biomasa hacia ramas. La presencia de ramas en el fuste es un aspecto no deseable desde el punto de vista comercial, dado que una menor cantidad de ramas es igual a menor cantidad de nudos, lo que determina la mejor calidad de la madera. Aunque *P. patula* presenta buena poda natural, de acuerdo con Velázquez *et al.* (2004) las ramas en rodales con alta densidad tienden a crecer más delgadas de lo normal, pero en casos contrarios las ramas crecerán muy gruesas e inclinadas hacia abajo, lo que traería como consecuencia una disminución considerable en la altura comercial de los árboles. Por ello, se recomienda que la producción de ramas sea controlada cuidadosamente durante el proceso de aprovechamiento.

Por su parte, el follaje que es un componente de gran importancia para el funcionamiento del ecosistema, sólo representó del 4 al 9% de la biomasa total; lo que coincide con otros estudios (Figueroa *et al.*, 2010; Soriano *et al.*, 2014). Su importancia radica en que es la maquinaria fotosintética que permite la producción de carbohidratos, su redistribución, y acumulación hacia el resto de los componentes, incluyendo las raíces y controlando directamente la productividad del bosque. (Ryan *et al.*, 1997; Vose y Ryan, 1994; Van y Franklin, 2000; Pretzsch, 2014). La asignación de

biomasa aérea al follaje en el presente estudio fue mayor en los rodales de menor edad (7 y 10 años), manteniéndose constante en los rodales maduros (30 años y AR). Éste hallazgo sugiere que en las primeras etapas de desarrollo, los árboles tienen mayor capacidad para capturar y usar la energía solar, incrementando el área foliar, las tasas fotosintéticas (Ryan *et al.*, 1997) y la producción de biomasa. Existen estudios para diferentes especies forestales que han encontrado que la biomasa foliar, área foliar y la estructura de la copa son factores determinantes en el crecimiento del árbol (Vose y Ryan, 1994; Van y Franklin, 2000; Yu *et al.*, 2003; Pretzsch, 2014).

Por otra parte, el follaje junto con otros residuos forestales que provienen del aprovechamiento (ramillas, estructuras reproductivas, frutos, corteza, etc.), juegan un papel importante en este tipo de bosques (Velázquez, 2006; Martínez, 2014). Mucho de éste material cuando cae al suelo aún es verde, el cual se ha reportado ser de mayor calidad nutrimental que el senescente. Al respecto, Pérez-Suárez *et al.* (2009) estudiaron la calidad del mantillo en hojas senescentes y verdes en un bosque semiárido de Pino-Encino, encontrando que la contribución relativa de C, N y P por las hojas verdes a la entrada anual total fue de 10.8, 12.6 y 9.4%, respectivamente. Por ello, el follaje verde presente en la hojarasca puede representar un mecanismo importante en las entradas de nutrimentos hacia el piso forestal.

El aporte del follaje al piso forestal puede constituir entre el 60 y 75% del material senescente (Imbert *et al.*, 2004). El aporte del follaje en los bosques de *P. patula* hacia el piso forestal es continua, por lo que enriquece significativamente el contenido de la materia orgánica, además éste aporte de follaje está acompañado por el de otras latifoliadas, lo que definiría la cantidad de nutrimentos que serán transferidos al suelo y que estarán en función de la biomasa vegetal (Imbert *et al.*, 2004). De acuerdo con Kimmins (1997), la cantidad relativa de cada nutriente aportada al suelo seguirá el siguiente patrón: en especies caducifolias N > Ca > K > Mg > P y en perennifolias Ca > N > K > Mg > P. Lo que sugiere la importancia en la estimación del aporte nutrimental del follaje senescente y verde en éstos bosques, para complementar el patrón de asignación de biomasa hacia este componente.

### 3.7. CONCLUSIONES

La gestión forestal sostenible del bosque de *P. patula* en la región de Zacualtipán, Hidalgo, presentó efectos positivos sobre la producción de biomasa aérea y su asignación hacia los diferentes componentes estructurales (fuste, hojas, ramas y corteza) de las especies forestales, en éstos bosques. La edad tuvo un efecto positivo sobre la biomasa aérea con valores muy cercanos a los que se presentaron en una aérea sin aprovechamiento forestal, como consecuencia de la aplicación de tratamientos intermedios, como los aclareos, los cuales favorecieron la asignación de biomasa aérea hacia el fuste con la obtención de productos con características morfológicas adecuadas para la industria maderable. Los aclareos también permitieron que la producción de ramas secundarias disminuyera a través del desarrollo de los rodales, lo cual aumenta la calidad de la madera, como resultado del control de la densidad y eliminación de especies competidoras. Por su parte, la asignación de biomasa aérea hacia follaje es determinante en las primeras etapas de desarrollo del rodal. El follaje junto con los desechos forestales, antes y después de los aprovechamientos, juegan un importante papel en el aporte y recirculación de nutrimentos hacia el piso forestal.

De ésta forma, la gestión forestal sostenible aplicada de forma adecuada, con la implementación de tratamientos intermedios adecuados y la redistribución de los residuos forestales, permiten la provisión de productos de madera, así como de otros servicios de regulación, tales como la reincorporación de nutrimentos al suelo, regulación del microclima, regulación del ciclo hidrológico y captura de carbono, entre otros.

## CAPÍTULO IV

### 4. DINÁMICA DE RAÍCES FINAS EN UN BOSQUE CON APROVECHAMIENTO FORESTAL DE *Pinus patula* EN ZACUALTIPÁN, HIDALGO

#### 4.1. RESUMEN

El sistema radical juega un papel determinante en los ecosistemas forestales, como fijador al sustrato y como vía principal en la absorción y transporte de agua y nutrientes; además de muchas otras funciones, como las asociaciones simbióticas con hongos y microorganismos y, el almacenamiento de sustancias de reserva (compuestos de carbono). No obstante, el tipo de función está en relación con el grosor de las raíces finas y gruesas. Las raíces finas participan activamente en la absorción de nutrientes y en la dinámica de la materia orgánica del suelo, por lo que su producción y tasas de recambio juegan un papel determinante en la productividad y dinámica de carbono de los ecosistemas forestales. En el presente capítulo se presentan los resultados sobre la cantidad de biomasa de raíces en el almacén; del crecimiento (variación estacional) a través del tiempo, de la producción (materia seca/ año) y de las tasas de recambio de las raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *P. patula* en la región de Zacualtipán, Hidalgo. Las raíces en el almacén del suelo, fueron cuantificadas a través de núcleos de suelo colectados en rodales de diferente edad; mientras que el crecimiento en biomasa, la producción y las tasas de recambio de las raíces finas fue seguido a través de la técnica de crecimiento interno (*Ingrowth cores*). Los resultados mostraron que, de las raíces en el almacén, las finas representaron entre el 18 y 40%, en función a la edad del rodal. Por su parte, el patrón de crecimiento (variación estacional) difirió entre los rodales de diferente edad en la cronosecuencia; únicamente los rodales de anualidad 2005 y 1983 coincidieron en su máximo crecimiento en el período de julio a septiembre (verano; 181.3 y 35.9 g m<sup>2</sup>, respectivamente). Lo anterior fue concordante con la mayor proporción (>40%) de raíces finas vivas durante el mismo período (verano); mientras que, la mayor mortalidad (>80%) de raíces finas se presentó en el período de noviembre a enero (invierno). Por su parte, la producción de raíces finas disminuyó con la edad del rodal, siendo el rodal de menor edad (7 años) de anualidad 2005, donde se observó la mayor producción (601.3 g m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>), la cual presentó aproximadamente el 20% más de la producción encontrada en el AR (237.2 g m<sup>2</sup> año<sup>-1</sup>).

Las tasas de recambio de las raíces finas, fueron menores en los rodales con aprovechamiento forestal (entre 1.0 y 1.5 años<sup>-1</sup>), comparada con el AR (1.9 años<sup>-1</sup>). Éstos resultados difieren ampliamente de los encontrados en otras especies forestales, debido principalmente, a las condiciones propias de cada sitio (ambientales, edáficas y composición de especies, principalmente). Sin embargo, los resultados demostraron que un rodal con un aprovechamiento forestal, tiene gran capacidad para desarrollar un sistema radical que permite el crecimiento y recuperación de las funciones del ecosistema después de la aplicación de la corta de repoblación.

*Palabras clave:* almacén de raíces; crecimiento de raíces finas, producción de raíces finas; tasas de recambio; crecimiento interno; incubación de raíces finas; rodal; cronosecuencia.

## 4.2. ABSTRACT

The root system plays an important role in forest ecosystems, such as fixing to the soil and to transport water and nutrients. The roots have many other functions, such as association with microorganisms and storage of reserve substances or carbon compounds. However, the type of root function is related to the roots thickness (coarse and fine). Fine roots are more highly dynamics in the process of nutrients absorption and soil organic matter dynamics, so their production and turnover rates play a key role in the productivity and carbon dynamics of forest ecosystems. In this chapter we evaluated roots stocks, fine roots growth (seasonal variation), fine roots production and fine roots turnover rates, related to stand age in a chronosequence of forest of *P. patula* in the ejido Atopixco Zacualtipán, Hidalgo. The roots stocks were quantified in soil cores collected in each stand, while the fine roots growth, production and turnover rates by the methodology *ingrowth cores*. The fine roots stocks represented between el 18 y 40% of the total roots biomass stock. Meanwhile, the seasonal fine roots growth pattern was different between stand ages. Only 2005 and 1983 stands agreed with the maximum growth in the period from July to September, in summer (181.3 and 35.9 g m<sup>-2</sup>, respectively). This coincided with the proportion of live fine roots (>40%) in this same period. The fine roots mortality (>80%) increased in the period from November to January (winter). The annual production of fine roots decreased with stand age. The 2005 stand had the highest production (601.3 g m<sup>-2</sup> year<sup>-1</sup>) and presented almost 20% more of the production found in the AR. The turnover rates of fine roots were lower in harvest stands (between 1.0 and 1.5 year<sup>-1</sup>) than the AR (1.9 year<sup>-1</sup>). Our results differ widely from those found in other forest species, mainly due to the each site characteristics (environmental, soil and species composition, mainly). However, we found that the forest with appropriate management practices can have a root system that allows the development, growth and recovery of ecosystem functions after harvesting

**Key words:** stock roots; fine roots ingrowth; fine roots production; rates turnover; ingrowth cores; time incubation fine roots; stand; chronosequence.

### 4.3. INTRODUCCIÓN

El sistema radical está formado básicamente por dos tipos de raíces: finas y gruesas (Persson y Stadenberg, 2009). Las raíces gruesas tienen como función principal el anclaje y soporte a las plantas y árboles; mientras que las raíces finas tienen un mayor número de funciones, participando activamente en la absorción de agua y nutrientes (Pregitzer, 2002; Trumbore y Gaudinski, 2003; Da-Lun *et al.*, 2010), así como en la formación de asociaciones simbióticas con hongos u otros microorganismos del suelo (Bardgett *et al.*, 2014). Además, las raíces en general y las finas en particular son un componente importante en la parte subterránea de los ecosistemas forestales (Xiao *et al.*, 2003; Da-Lun *et al.*, 2010), como una de las principales vías de transferencia de carbono hacia el suelo, que influye en la actividad microbial y en los procesos de descomposición (Janssens *et al.*, 2002). Aunque, las raíces finas aportan menos del 2% de la biomasa total del ecosistema, contribuyen aproximadamente cerca del 30 al 50% del carbono ciclado anualmente (Vogt *et al.*, 1996; Makkonen y Helmisaari, 1998; Janssens *et al.*, 2002, Persson, 2002) y el 33% de la producción primaria neta anual global en algunos bosques (Vogt *et al.*, 1998; Da-Lun *et al.*, 2010). Adicionalmente, las raíces finas pueden representar entre el 90 y 95 % de la longitud total del sistema radical; por lo tanto constituyen la mayor superficie de contacto con el suelo, que a su vez representa el mayor reservorio de carbono en los ecosistemas forestales (Baker *et al.*, 2001). En bosques templados, la biomasa de raíces ha sido estimada en menos del 36% de la biomasa aérea (Santantonio, 1980) con un valor aproximado de 220 g·m<sup>-2</sup> (Jarvis *et al.*, 2001).

Las raíces finas al ser altamente dinámicas, con tiempos de vida cortos, en constantemente proceso de cambio; su muerte y sustitución tienen lugar simultáneamente (Makkonen y Helmisaari, 1998; Eissenstat y Yanai, 2002). De tal forma que, tanto las tasas de retorno de las raíces, como la producción de exudados (compuestos de carbono), son las dos vías a través de las cuales el carbono es transferido al suelo y donde es almacenado por períodos de tiempo prolongados (Bardgett *et al.*, 2014). Por lo que las tasas de recambio, indican el tiempo en que el sistema radical se renueva completamente, es decir, el número de veces en que el sistema radical completo muere y vuelve a ser sustituido en el período de un año (Osawa y Aizawa, 2012; Lukac, 2012). Éstas tasas, se dan en función de la composición

de especies (Xiao *et al.*, 2008; Persson y Standenberg, 2009), la época de crecimiento de la vegetación dominante, de la calidad del sitio (nutrimentos y agua), condiciones ambientales, edáficas (Makkoven *et al.*, 1998), de las perturbaciones (Baker *et al.*, 2001; Hertel y Leuschner, 2002), de la asignación de biomasa y carbono y, de la edad del rodal.

En los bosques con aprovechamiento forestal, las diversas técnicas silvícolas aplicadas pueden modificar significativamente las condiciones del suelo, la composición vegetal, a corto, mediano o largo plazo (Da- Lun *et al.* 2010). Lo anterior contribuirá ampliamente a propiciar una mayor densidad de las raíces, aumentar su crecimiento y modificar las tasas de recambio de acuerdo a la etapa de desarrollo del rodal (Bowden *et al.*, 2004). Sin embargo se carece de información sobre la función del sistema radical en el establecimiento de las especies después de un disturbio, como es la gestión forestal. En su mayoría, los estudios existentes, han recurrido a la utilización de los estándares o promedios internacionales para referir la biomasa de las raíces finas como una relación con la parte aérea del ecosistema (Persson y Stadenberg, 2009). Por otra parte, diversos métodos directos e indirectos han sido desarrollados para la estimación de la producción de las raíces finas. Sin embargo, éstas mediciones generalmente aún no han llegado a ser estandarizadas y pueden llegar a presentar alto nivel de incertidumbre, producir cambios en las propiedad físicas y químicas del suelo o bien; ser muy intensas, laboriosas y extremas en los tiempos requeridos (Hirano *et al.*, 2009), lo cual hace más difícil la comparación de resultados (Campell *et al.*, 2002; Madji *et al.*, 2005).

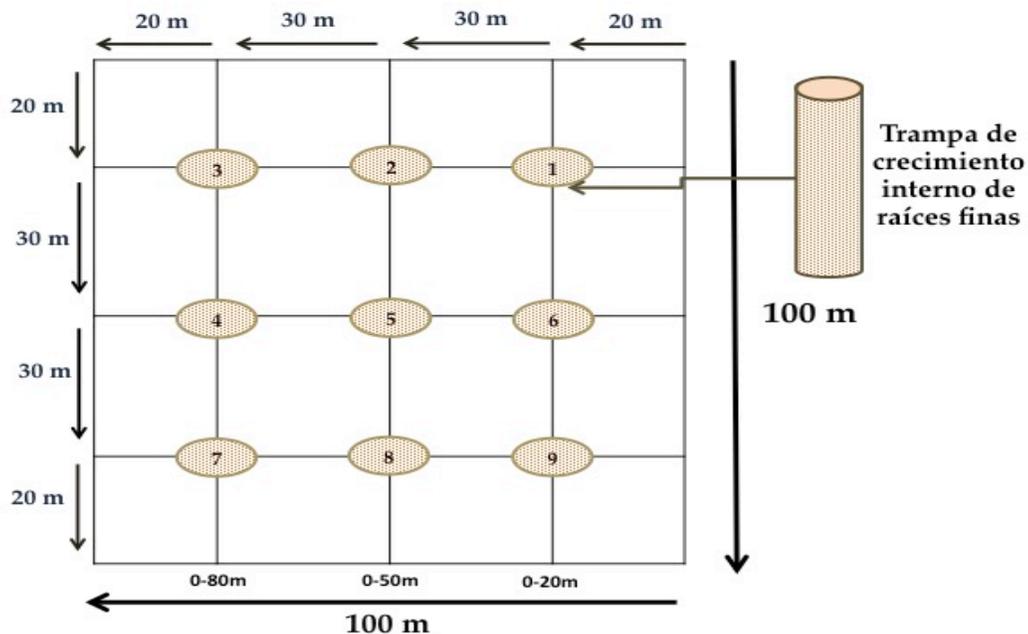
En el caso de México, son pocos los estudios dirigidos a la cuantificación de la producción del sistema radical, como uno de los principales disparadores en el establecimiento exitoso de las especies después de la aplicación de la corta de repoblación y relacionado con el desarrollo del rodal. Lo anterior, involucra una amplia gama de estrategias de las raíces para capturar recursos y para responder a cambios en su disponibilidad en el tiempo y espacio (Makkonen y Helmisaari, 1998; Bardgett *et al.*, 2014). De esta forma, la comprensión de la dinámica de las raíces finas, es importante para la evaluación de la productividad del ecosistema. Por ello, el objetivo del presente estudio fue, cuantificar el crecimiento, la producción, las tasas de recambio de las raíces finas, en una cronosecuencia en un bosque de *P. patula* con aprovechamiento forestal en el ejido Atopixco Zacualtipán, Hidalgo.

#### 4.4. MATERIALES Y MÉTODOS

##### 4.4.1. Establecimiento de las unidades de muestreo

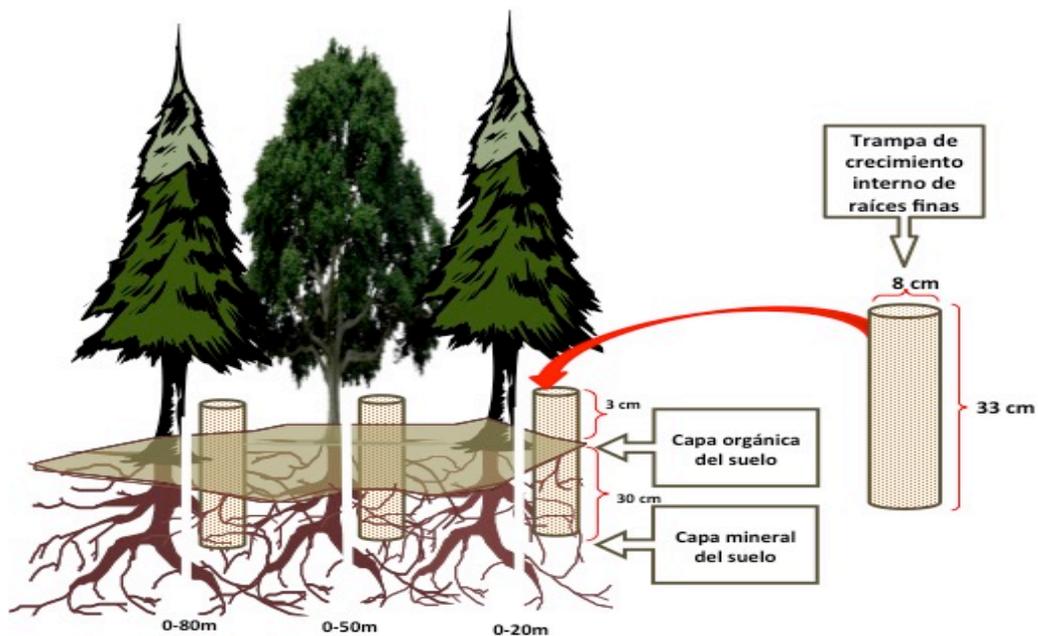
En el ejido Atopixco (Figura 1.1) se seleccionaron rodales correspondientes a las anualidades 1983, 1995 y 2005 (Figura 1.2). Cada anualidad correspondió al año en que fue aplicada la corta de repoblación. Como área de referencia (AR) se utilizó un área sin intervención silvícola, de aproximadamente 80 años de edad.

En cada rodal y AR se estableció una unidad de muestreo de 100 x 100 m (Figura 4.1) (Metcalfé *et al.*, 2008). Cada unidad de muestreo fue establecida en un área con homogeneidad interna relativa (suelo, vegetación, etc.). Para llevar a cabo el seguimiento del crecimiento de las raíces finas se utilizó la técnica de núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas, sugerida para especies de rápido crecimiento (Vogt *et al.*, 1998; Steingrobe *et al.*, 2001), tal como *P. patula*. Dentro de cada unidad de muestreo se instalaron nueve NCI a una equidistancia de 30 m entre cada núcleo. En el perímetro de cada NCI se dejó una distancia de 20 m con la finalidad de minimizar los efectos de borde del suelo y la vegetación circundante (Figura 4.1).



**Figura 4. 1.** Diseño de muestreo espacial de los núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo (Modificado de Metcalfé *et al.*, 2008).

Los NCI fueron elaborados extrayendo un núcleo intacto de suelo de 30 cm de profundidad con la ayuda de una barrena de 8 cm de diámetro. En el orificio dejada por dicha extracción se colocó una trampa de raíces de forma cilíndrica de 30 cm de largo y 8 cm de diámetro (mismas dimensiones del orificio), una vez que fue removida la capa orgánica superficial del suelo (Figura 4.2). Cada trampa fue hecha con malla de alambre de 4 x 4 mm y cubierta en la base con una malla de plástico de 2 mm. En cada trampa de los NCI se dejó una pestaña de tres cm por arriba del suelo, con la finalidad de facilitar la extracción posterior de la trampas (Figura 4.2). De esta forma, cada trampa fue rellena con suelo de los primeros 30 cm de profundidad, proveniente de sitios adyacentes a los experimentales. El suelo fue previamente tamizado, a través de dos tamaños de mallas (2 y 5 mm), para remover las raíces presentes (Metcalfé *et al.*, 2008).



**Figura 4. 2.** Diseño vertical de los núcleos de crecimiento interno (NCI) de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo (Modificado de Metcalfé *et al.*, 2008).

#### 4.4.2. Muestreo de la biomasa de raíces totales en el almacén del suelo

En los mismos rodales y sitios de muestreo donde se colocaron los NCI (Figura 4.1) se realizó la colecta de un núcleo intacto de suelo para cuantificar las raíces totales (finas y

gruesas) en el almacén del suelo, presentes en el área. Esto se llevó a cabo con la ayuda de un nucleador de acero inoxidable con un diámetro de 8.2 cm, a una profundidad de 30 cm. Se realizaron dos colectas, una previa a la instalación de los NCI (mayo 2012) y la segunda al finalizar el seguimiento de éstos (agosto 2013). La extracción de las raíces totales (finas y gruesas), se llevó a cabo por el método de flotación, a través del lavado de los núcleos de suelo con agua corriente.

Aunque éstas raíces no fueron clasificadas por categorías diamétricas, para fines del presente estudio y de acuerdo a la literatura, fueron separadas en raíces finas y gruesas. Las raíces finas fueron consideradas aquellas con diámetros de  $\leq 2$  mm y las gruesas con diámetros de  $\geq 2$  mm.

De la muestra de raíces finas, fue tomada una submuestra para la identificación de vivas (RV) y muertas (RM), mediante el método de tinción. Éstas raíces fueron sumergidas en una solución de 2, 3, 5 Triphenyltetrazolium Chloride al 0.5%, durante 24 horas. Al final de dicho procedimiento el tejido metabólicamente aún activo fue teñido de color rojizo a nivel de epidermis, exodermis o parénquima cortical. La verificación de la tinción y separación de las raíces vivas de las muertas, fue realizada a través de un microscopio fotónico simple (Estereoscopio Zeiss Stemi 2000-C). Cuando no fue posible observar la tinción del tejido vivo a nivel de epidermis, se realizó un corte transversal en la raíz, con la finalidad de verificar la tinción entre el cortex y la peridermis (Persson y Stadenberg, 2009). Otras características que también fueron utilizadas para identificar una raíz viva de una muerta fueron, textura, color y turgencia (Matamala y Schlesinger, 2000; Persson y Standenberg, 2009). Éste procedimiento previamente descrito, no se llevó a cabo en raíces gruesas.

Es importante mencionar que en éste estudio, las raíces no fueron diferenciadas por especie o estrato del bosque, es decir, se consideraron las raíces de árboles y de otras especies de plantas vasculares (arbustos, herbáceas y pastos) como la biomasa seca total de las raíces en el rodal.

#### **4.4.3. Seguimiento del crecimiento en biomasa de raíces finas**

Para darle seguimiento al crecimiento de las raíces finas, cada NCI fue incubado durante un período de 70 días, de los cuales 10 se consideraron como un pre-acondicionamiento del sustrato (Campell *et al.*, 2002). Por ésta razón, 10 días antes de la

colecta de cada NCI se instaló uno nuevo, para dar paso a dicho acondicionamiento; lo cual resultó en un traslape de 10 días entre cada colecta. El crecimiento durante los días de traslape se determinó en base a la producción promedio diaria de los NCI, de acuerdo a lo mencionado por Maher *et al.* (2010). El tiempo de incubación de los NCI fue seleccionado con la finalidad de reducir la posible sobrestimación de las tasas de crecimiento en períodos cortos de tiempo y minimizar la probabilidad de muerte y descomposición de las raíces crecidas dentro de los NCI (Idol *et al.*, 2000). Al finalizar el tiempo de incubación, todos los NCI fueron recolectados y en su lugar fueron colocados nuevos, siguiendo el procedimiento antes descrito. El suelo extraído de los NCI fue colectado en bolsas de polietileno y transportadas al laboratorio, para su posterior análisis.

La extracción de las raíces finas y su caracterización en vivas y muertas, se realizó a través de la combinación del método de flotación y tinción antes descritos. Todas las fracciones de raíces obtenidas (gruesas, finas, vivas y muertas) fueron secadas en una estufa a 70 °C por 72 horas, hasta alcanzar peso constante.

El seguimiento al crecimiento en biomasa de las raíces finas, se dio a lo largo de un año, considerando la variación estacional, debida a la etapa de crecimiento (marzo- abril) y letargo (octubre- noviembre) de las raíces. Este período, partió de Mayo del 2012 y terminó en Junio del 2013.

#### **4.4.4. Caracterización de los suelos en las unidades de muestreo**

La caracterización de los suelos en cada unidad de muestreo se llevó a cabo colectando muestras de suelo a dos profundidades (0-15 y de 15-30 cm), en un área aledaña a cada NCI, con ayuda de un muestreador de suelo de 4.8 cm de diámetro. Las muestras fueron transportadas al laboratorio en bolsas de polietileno, debidamente etiquetadas. Una vez en el laboratorio se procedió a secar cada muestras de suelo a temperatura ambiente, hasta alcanzar peso contante. Posteriormente, cada muestra fue tamiza, para separar el material diferente al suelo mineral (raíces, rocas, trozos de carbón, etc.). La porción de suelo mineral fue secado en una estufa a una temperatura de 105 °C.

En cada muestra de suelo pulverizada, fue determinado el potencial de iones hidrógeno (pH), con ayuda de un pH- metro; la capacidad de intercambio catiónico (CIC), por el método de extracción con acetato de amonio; el contenido de materia orgánica (MO), a

través del método de Walkey y Black (1945); la textura (arena, limo y arcilla), por el método de Bouyoucos; la clase textural, con ayuda de la carta para la determinación de la textura de los suelo y; el fósforo (P) disponible en suelo, a través del método de Bray y Kurtz 1. Estos análisis físicos y químicos, se realizaron en el Laboratorio de Física de Suelos (Postgrado de Edafología) del Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Por su parte, el carbono (C) y nitrógeno (N) total fueron analizados, en el Laboratorio Nacional de Biotecnología Agrícola, Médica y Ambiental del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, San Luis Potosí, San Luis Potosí; usando la técnica de absorción atómica, a través de un equipo de combustión elemental (Costech ECS 4010).

#### **4.4.5. Cálculos y análisis estadísticos**

La comparación de la biomasa de raíces totales y por categoría (finas y gruesas) en el almacén del suelo, se realizó a través de un análisis de varianza (ANOVA) de una vía usando como factor la edad del rodal, seguido de una prueba de Tukey HSD ( $\alpha \leq 0.05$ ), con el paquete estadístico SAS (2009). Un criterio similar, fue aplicado para la comparación del crecimiento en biomasa, es decir, para la variación estacional del crecimiento (promedio bimensual), tanto de las raíces finas totales, como por caracterización (vivas y muertas), usando como único factor, la fecha de seguimiento.

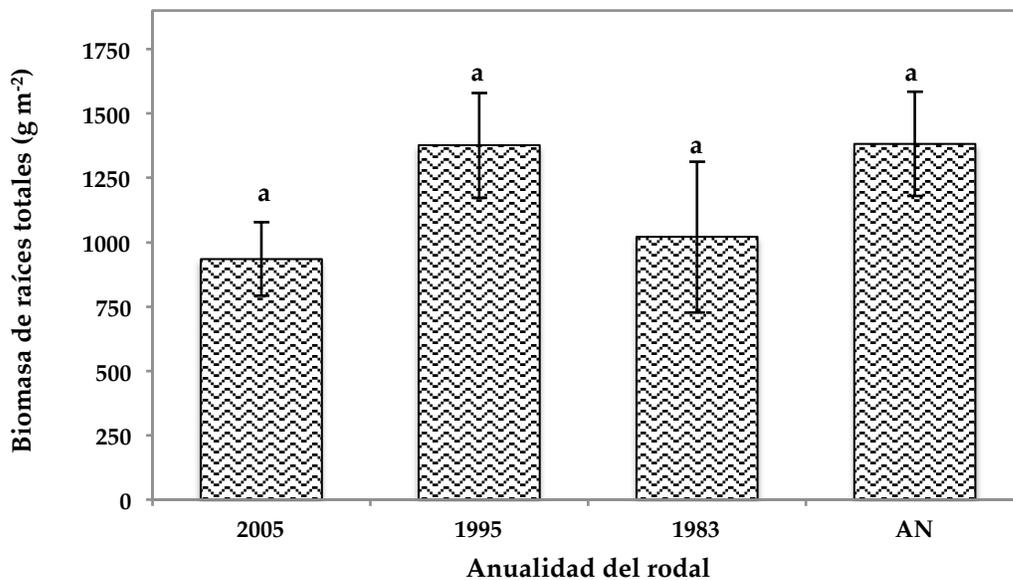
El crecimiento de las raíces finas en el período de traslape fue estimado en base a la producción promedio diaria de los NCI; de tal forma que, la producción anual total fue estimada, multiplicando el crecimiento promedio diario por el número de días dentro de cada período de incubación y, sumando el crecimiento en el período de traslape (Maher *et al.*, 2010). La comparación de la producción anual ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) se realizó, usando como único factor, la edad del rodal.

Finalmente, las tasas de recambio de las raíces finas fueron estimadas como el producto entre el promedio de la producción anual y la diferencia entre el máximo y mínimo de biomasa de raíces finas (Eissenstat y Yanai, 2002).

## 4.5. RESULTADOS

### 4.5.1. Biomasa de raíces en el almacén del suelo

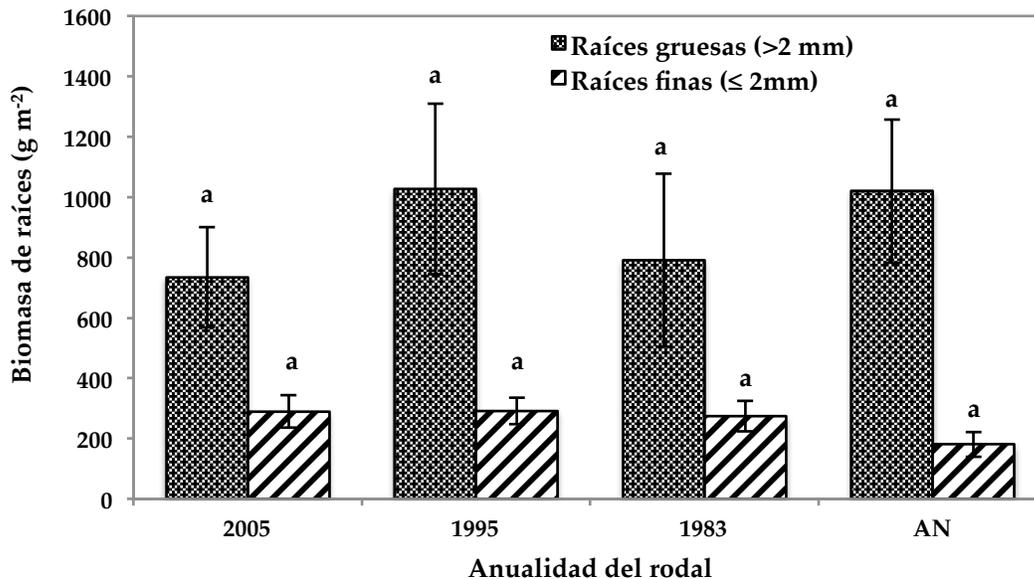
La biomasa de raíces totales (finas y gruesas) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), no mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre las diferentes edades de los rodales con aprovechamiento y el AR (Figura 4.3). Ésta biomasa, que incluyó a raíces vivas y muertas, fue mayor en el AR (1382.0 g m<sup>-2</sup>), la cual fue muy aproximada a la encontrada en el rodal de la anualidad 1995 (17 años de edad), con 1,376.6 g m<sup>-2</sup>. Éste comportamiento fue similar entre el rodal más joven de anualidad 2005 y el de mayor edad de anualidad 1983, es decir, presentaron una biomasa de raíces muy cercana entre ellos (935.0 y 1,020.0 g m<sup>-2</sup>, respectivamente), con tan sólo una diferencia del 9% entre los dos rodales. El rodal de mayor edad de anualidad 1983, presentó una biomasa de raíces 26% menor en comparación con la encontrada en el AR (Figura 4.3); mientras que el rodal más joven de anualidad 2005, siendo el que presentó la menor biomasa de raíces (935 g m<sup>-2</sup>), representó aproximadamente el 32% menos de la biomasa encontrada en el AR (1381.9 g m<sup>-2</sup>).



**Figura 4. 3.** Biomasa (g m<sup>-2</sup>) de raíces totales (finas y gruesas) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

De la biomasa de raíces en el almacén, las gruesas representaron entre el 60 y 82%, dependiendo de la edad del rodal (Figura 4.4), las cuales se encontraron en mayor cantidad que las raíces finas (18 al 40%). Dentro de cada categoría (finas y gruesas) de raíces, no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los rodales de diferente edad en la cronosecuencia.

El comportamiento de la biomasa de las raíces finas difirió de las gruesas, dado que el mayor porcentaje de biomasa de raíces finas (18 al 40%), se presentó en los rodales con aprovechamiento forestal, en un intervalo de 274.2 a 292.3  $\text{g m}^{-2}$ ; mientras que en el AR el promedio se presentó una biomasa 35% menor (181.0  $\text{g m}^{-2}$ ), aunque no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los rodales, dentro de cada tipo de raíces (finas y gruesas).

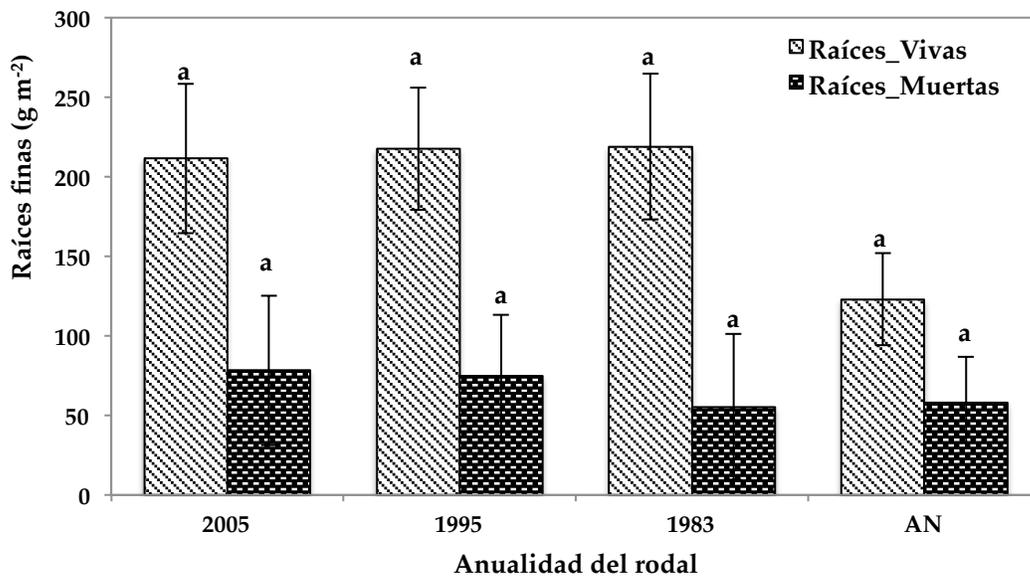


**Figura 4. 4.** Biomasa de raíces gruesas (>2mm) y finas (≤2mm) ( $\text{g m}^{-2}$ ) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (gruesas o finas) los valores con la misma letra significan medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ).

De la caracterización de las raíces finas, entre vivas (RV) y muertas (RM); se observó que la biomasa de las primeras (RV) fue de 52 a 75% mayor (dependiendo de la edad) a las RM (Figura 4.5). Dentro de cada caracterización de raíces (RV y RM), no se

presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre los rodales de diferente edad, dentro de la cronosecuencia.

El comportamiento de la biomasa de las RV, fue en aumento ligero con la edad del rodal (Figura 4.5), con  $211.4 \text{ g m}^{-2}$  para el rodal de anualidad 2005,  $217.5 \text{ g m}^{-2}$  para el de anualidad 1995, y de  $218.8 \text{ g m}^{-2}$  para el de anualidad 1983. Sin embargo, ésta biomasa disminuyó drásticamente en el AR, la cual fue 56% menor ( $122.9 \text{ g m}^{-2}$ ) comparada con los rodales con aprovechamiento. Contrario a las RV, el comportamiento de las RM tendió a disminuir ligeramente con la edad del rodal (Figura 4.5), es decir, el rodal más joven (2005) presentó una masa 30% mayor a la del rodal de anualidad 1983 ( $78.2$  y  $55.3 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente). Sin embargo, en el AR la cantidad de RM fue ligeramente (5%) mayor a la del rodal de anualidad 1983, aun cuando no se presentaron diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) entre estos rodales.



**Figura 4. 5.** Masa de raíces vivas y muertas ( $\text{g m}^{-2}$ ) en el almacén del suelo (30 cm de profundidad), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (RV o RM) los valores con la misma letra significaron medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ).

#### 4.5.2. Crecimiento en biomasa de raíces finas

La variación estacional del crecimiento total (suma de RV y RM) de raíces finas, solamente mostró diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) dentro del rodal 2005 (Cuadro 4.1) y fue donde se presentó el máximo valor de crecimiento ( $181.3 \text{ g m}^{-2}$ ), lo cual coincidió con el período de verano (julio-septiembre). En cada uno de los rodales, solamente se presentó un máximo crecimiento en biomasa total de raíces finas, que coincidió con la primavera, para los rodales de anualidad 2005 y 1995 ( $181.3$  y  $35.9 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente), con el verano (mayo-septiembre) para AR ( $89.6 \text{ g m}^{-2}$ ) y, para finales de invierno (enero a mediados de marzo) para el rodal de anualidad 1995, con una biomasa de  $55.2 \text{ g m}^{-2}$ . Contrariamente, el menor crecimiento se presentó en el período de noviembre a enero (invierno) en el AR, con una biomasa de  $16.4 \text{ g m}^{-2}$ .

**Cuadro 4. 1.** Variación estacional sobre la dinámica de las raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

Anualidad	Parámetro	2012 ( $\text{g m}^{-2}$ )			2012-2013 ( $\text{g m}^{-2}$ )		
		7/05-21/07*	6/07-18/09	8/09-16/11	7/11-18/01	8/01-12/03	4/03-16/05
2005	Muertas	61.6ab***	148.7a	38.0b	87.3ab	43.5ab	29.4b
	Vivas	25.6a	33.0a	16.4a	19.8a	19.5a	11.6a
	Crecimiento**	87.1ab	181.3a	54.4b	107.1ab	63.0b	41.1b
1995	Muertas	15.5a	32.2a	25.4a	18.4a	35.6a	21.6a
	Vivas	7.7ab	6.9b	9.7ab	3.3b	19.6a	9.9ab
	Crecimiento	23.2a	39.2a	35.1a	21.7a	55.2a	31.2a
1983	Muertas	12.4ab	27.5a	14.7ab	14.4b	6.8b	14.9ab
	Vivas	6.3a	8.4a	4.0a	3.7a	3.6a	10.7a
	Crecimiento	18.7a	35.9a	18.7a	18.0a	10.5a	25.6a
AR	Muertas	77.9a	17.4a	35.2a	15.0a	30.9a	17.3a
	Vivas	11.8ab	3.4ab	5.7ab	1.5b	15.2a	8.3ab
	Crecimiento	89.6a	18.5a	40.9a	16.4a	46.1a	25.6a

\* Período de incubación de los NCI de raíces finas (día/mes).

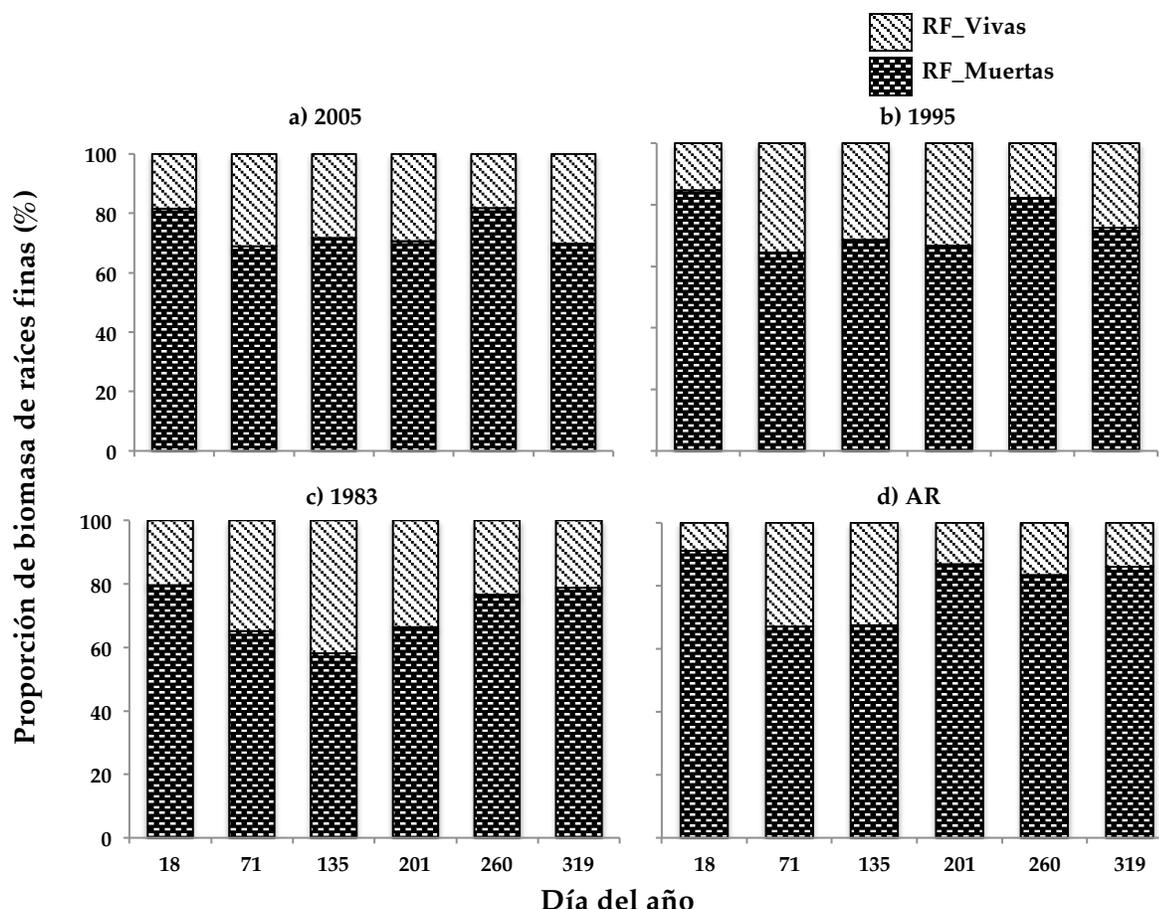
\*\* Crecimiento en biomasa total, como producto de la suma de raíces vivas y muertas ( $\text{g m}^{-2}$ ).

\*\*\* Dentro de cada anualidad los valores con la misma letra en cada parámetro, mismas letras significaron medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ ).

El patrón de la variación estacional tanto para la masa de RV como RM, presentó diferencias estadísticamente significativas ( $p \leq 0.05$ ) dentro de todos y cada uno de los

rodal (Cuadro 4.1). Los máximos valores fueron para RM. La máxima mortalidad se presentó en el período de julio a septiembre (verano) en el rodal de anualidad 2005 ( $148.7 \text{ g m}^{-2}$ ), que representó 52% mayor mortalidad de la observada en AR ( $77.9 \text{ g m}^{-2}$ ). El valor de máxima mortalidad coincidió con el mayor crecimiento de RV para el mismo rodal de anualidad 2005 (7 años de edad), en el mismo período (verano) con  $33.0 \text{ g m}^{-2}$ . Por su parte, el rodal 1995 y el AR, presentaron su máximo crecimiento en RV ( $19.6$  y  $15.2 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente) en el período de enero a marzo, que coincidió con la finalización del invierno e inicio de la primavera. Contrariamente, el menor crecimiento de RV ( $1.5 \text{ g m}^{-2}$ ), se presentó en el período de noviembre a mediados de enero (invierno), dentro del AR.

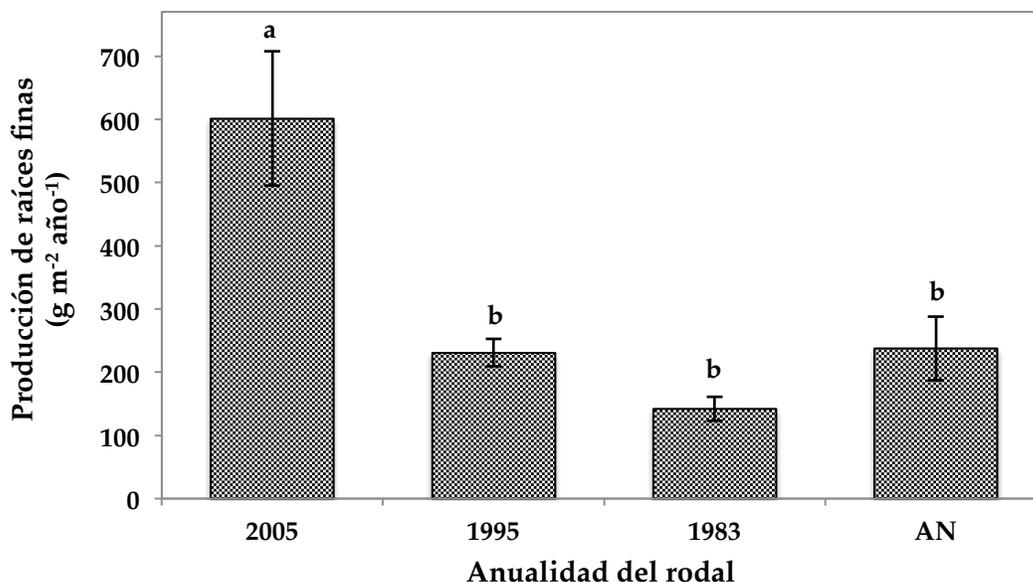
De la misma forma, la proporción promedio bimensual de las RM fue mayor a la de RV, en un intervalo del 58 al 91%, dependiendo de la edad del rodal (Figura 4.6). La mayor proporción de RM se observó en el mes de enero (invierno), dentro de todos y cada uno de los rodales. La mayor proporción de RM alcanzó hasta un 91% (Figura 4.6d) en el período de enero; mientras que la menor fue del 58% (Figura 4.6c), en el mes de mayo. La máxima proporción de RV (41%) coincidió en éste mismo mes (mayo) (Figura 4.6c), que coincidió con la primavera.



**Figura 4. 6.** Proporción (%) de raíces finas vivas (RF\_Vivas) y muertas (RF\_Muertas) a lo largo de un año, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

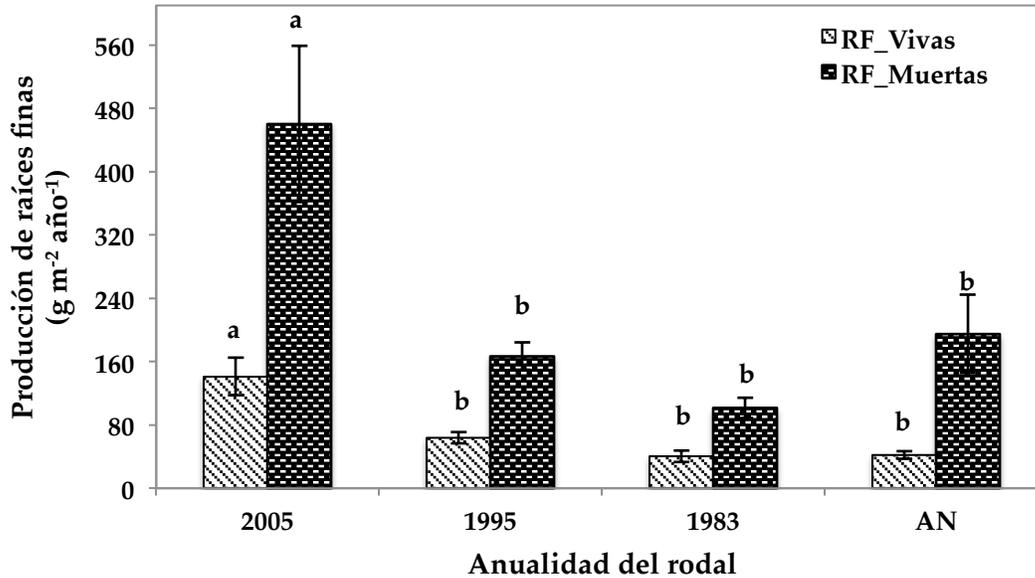
#### 4.5.3. Producción anual de raíces finas

La producción anual de raíces finas totales (vivas más muertas), disminuyó con la edad del rodal (Figura 4.7). De tal forma que, el rodal más joven, de anualidad 2005, fue donde se presentó la mayor producción ( $601.3 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) y que además, fue el único rodal que fue estadísticamente diferente ( $p \leq 0.05$ ) al resto de los rodales analizados. La producción en éste rodal (2005), representó aproximadamente el 60% más de la encontrada en el AR ( $601.3$  y  $237.26 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , respectivamente). Por su parte, en el rodal de anualidad 1983 (29 años), fue donde se presentó la menor producción ( $142.0 \text{ g m}^{-2}$ ), en comparación con el resto de los rodales, incluyendo el AR ( $237.2 \text{ g m}^{-2}$ ).



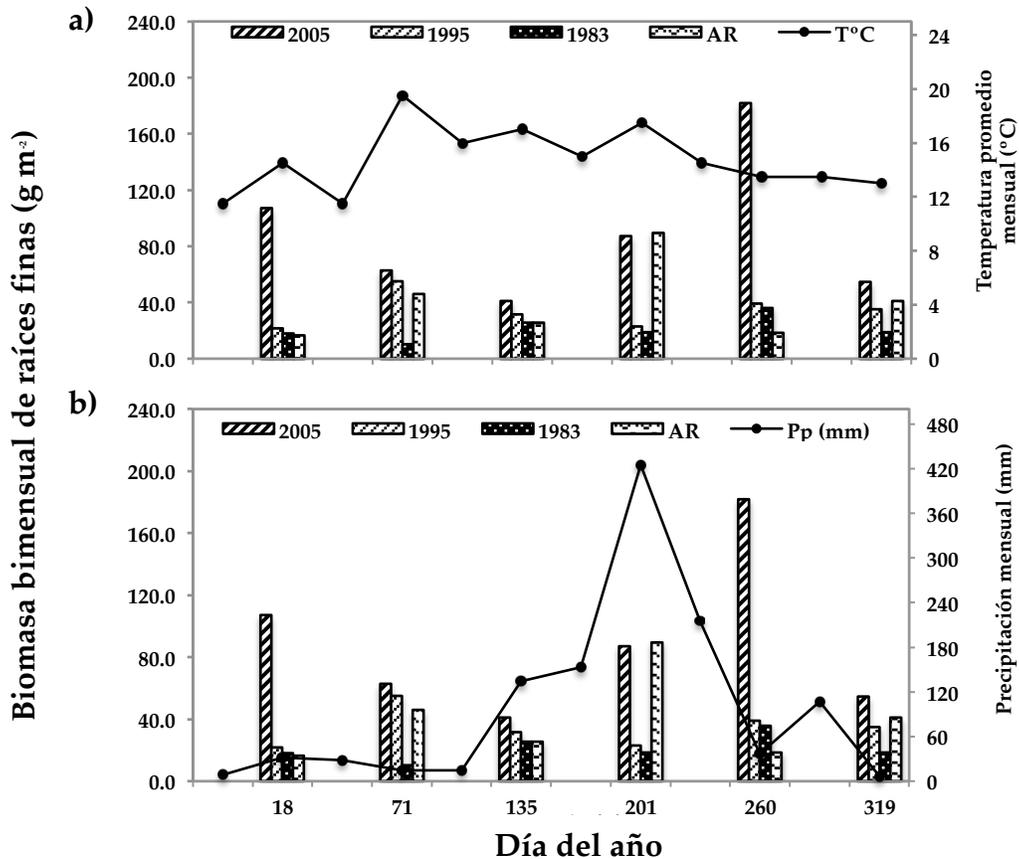
**Figura 4. 7.** Producción de raíces finas ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ) totales (vivas más muertas), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido de Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

La producción anual, tanto para RV como para RM, disminuyó con la edad del rodal (Figura 4.8). De tal forma que, el rodal de anualidad 2005, fue el único estadísticamente diferente ( $p \leq 0.05$ ) al resto de los rodales de la cronosecuencia, incluyendo al AR. La producción de RV del rodal de anualidad 1983 (29 años) fue muy aproximada al AR (40.4 y 42.1  $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ , respectivamente), con tan sólo 5% de diferencia. Lo anterior indicó, que la producción de RV, en el rodal de anualidad 2005 fue tres veces mayor, a la observada en el AR (141.2 y 42.1  $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ , respectivamente); mientras que la mortalidad en estos mismos rodales, fue sólo 2.3 veces mayor en el rodal de anualidad 2005 a diferencia del AR (460.1 y 195.1  $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ , respectivamente). Contrariamente en el rodal de anualidad 1983, la producción de raíces finas muertas fue aproximadamente 1.9 veces mayor a la encontrada en el AR (101.5 y 195.1  $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ , respectivamente).



**Figura 4. 8.** Producción anual de raíces finas vivas y muertas ( $\text{g m}^{-2} \text{año}^{-1}$ ), en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad). Dentro de cada tipo de raíces (vivas o muertas) los valores con la misma letra significan medias estadísticamente iguales ( $\alpha=0.05$ )

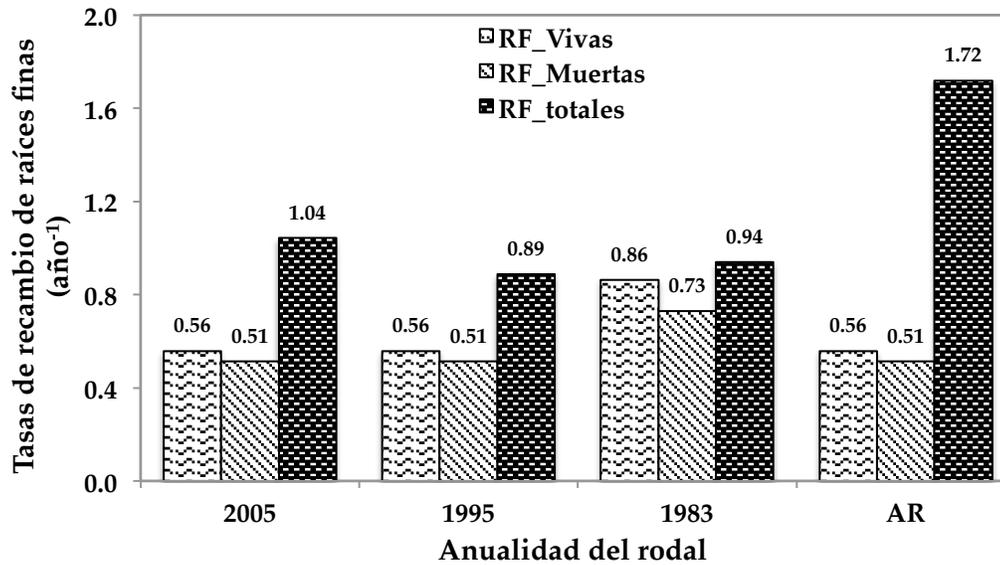
Los valores máximos de las variables climáticas (precipitación y temperatura), las cuales pudieran haber influido sobre la producción de raíces finas a lo largo del año de seguimiento, mostraron una coincidencia con la mayor producción (Figura 4.6). Es decir, en el día juliano 260 fue donde se encontró la mayor producción de biomasa de raíces finas para el rodal más joven (2005), la cual es producto del período de incubación que proviene del mes de mayo a julio (día del año 201) y que coincidió con el pico máximo de precipitación (pp) mensual, con 425 mm promedio mensual (Figura 4.6b). Así mismo, la temperatura ambiental en éste mismo período de crecimiento fue de 17.5°C promedio mensual (Figura 4.6a), que fue el segundo valor más alto de temperatura ambiental.



**Figura 4. 9.** Condiciones climáticas (precipitación y temperatura) y biomasa bimensual de raíces finas, a lo largo de un año de seguimiento, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido de Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

#### 4.5.4. Tasas de recambio de raíces finas

Las tasas de recambio de las raíces finas, fueron muy cercanas entre los rodales con aprovechamiento forestal, de 1.0 año<sup>-1</sup> para el rodal de anualidad 2005, de 0.89 año<sup>-1</sup> para el rodal de anualidad 1995 y de 0.94 año<sup>-1</sup> para el rodal de anualidad 1983. Sin embargo, éstas tasas fueron del 42 al 48% menores a la encontrada en el AR (Figura 4.10), la cual fue de 1.7 años<sup>-1</sup>, lo que indica que la biomasa de raíces finas en ésta área, es sustituida 1.7 veces cada año; es decir, todo el sistema radical muere y vuelve a crecer ese número de veces en un año. Por otra parte, las tasas de recambio para las raíces finas por caracterización: vivas y muertas (Figura 4.10), presentaron valores similares entre todos los rodales de diferente edad (0.5 año<sup>-1</sup>), excluyendo al rodal de anualidad 1983, que fue el único donde se presentaron tasas aproximadamente 60% mayores al resto de los rodales.



**Figura 4. 10.** Tasas de recambio de raíces finas, en una cronosecuencia de bosque de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

#### 4.5.5. Características de los suelos y producción de raíces finas

Tanto la producción de las raíces finas como las tasas de recambio pueden ser afectadas no sólo por las condiciones climáticas, sino también por las condiciones edáficas propias del sitio. En la caracterización de los suelos en las unidades de muestreo del presente estudio, se observó que algunas variables físicas y químicas como, el contenido de carbono (C) y nitrógeno (N) total en suelo, fueron mayores en los rodales con aprovechamiento forestal en comparación con lo encontrado en el AR (Cuadro 4.2). Por ejemplo, en el rodal de anualidad 1983 fue donde se presentaron los mayores contenidos de C y N (13.17 y 0.85%, respectivamente), en ambas profundidades (0-15 y 15-30 cm), mientras que el rodal 2005 ocupó el segundo lugar, con 9.06% de C y 0.40% de N, respectivamente. Lo anterior, coincidió con el orden donde de los rodales respecto a la producción de raíces finas (Figura 4.9). Por otra parte, aunque en el AR fue donde se presentó el mayor contenido de fósforo (P) en suelo (Cuadro 4.2), el rodal de anualidad 2005 volvió a ocupar el segundo lugar, con 6.37 mg P kg<sup>-1</sup> (Cuadro 4.2). es importante destacar, que a pesar que en el AR fue donde se presentó la mayor cantidad de arcilla y limo (39.12 y 43.66%, respectivamente) y condiciones más ácidas en los suelos (pH=4.30), fue el segundo donde se presentó la mayor producción de raíces finas

(Figura 4.7). En cuanto al contenido de materia orgánica (MO) y capacidad de intercambio catiónico (CIC), después del rodal 1983, el rodal 2005 fue el que presentó el segundo porcentaje más alto de MO, con 14.17% y de CIC con 27.53 meq (Cuadro 4.2).

**Cuadro 4. 2.** Características físicas y químicas del suelo en una cronosecuencia de *Pinus patula* en el ejido Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo. AR es un área de referencia (80 años de edad).

Anualidad	Profundidad (cm)	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	C:N	Fósforo (mg/Kg)	pH*	MO** (%)	CIC*** (meq)	Textura			Clase textural****
									Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	
2005	0-15	9.06	0.40	22.65	6.37	5.06	14.17	27.53	35.04	39.92	25.05	Franco, Arcilloso, Franco Arcilloso, Franco Arenoso, Franco Arcillo Limoso
	15-30	4.30	0.20	21.50	9.26	5.17	6.33	27.56	29.04	30.49	40.47	
1995	0-15	8.51	0.43	19.79	1.31	4.90	13.13	23.91	40.15	36.16	23.69	Franco, Arcilloso, Franco Arcilloso, Franco Arenoso, Franco Arcillo Arenoso
	15-30	2.78	0.18	15.44	1.16	5.06	4.12	20.76	26.59	33.72	39.69	
1983	0-15	13.17	0.85	15.49	1.92	4.73	20.90	32.01	32.58	40.41	27.00	Franco, Arcilloso, Franco Arcilloso, Franco Arenoso, Franco Arcillo Limoso, Franco Arcillo Arenoso
	15-30	6.94	0.41	16.92	1.03	4.90	10.54	25.90	28.92	39.07	32.01	
AR	0-15	6.78	0.20	33.9	9.42	4.30	9.85	15.58	17.22	43.66	39.12	Arcilloso, Arcillo Limoso, Franco Arcilloso, Franco Arcillo Limoso.
	15-30	1.94	0.06	32.33	9.42	4.47	3.75	14.51	12.59	37.92	49.49	

\* Unidades de pH en la solución del suelo.

\*\* Materia orgánica del suelo en porcentaje.

\*\*\* Capacidad de intercambio catiónico en miliequivalentes.

\*\*\*\*Tipo de suelos que prevalecen en cada unidad de muestreo (rodal).

#### 4.6. DISCUSIÓN

En el presente estudio se cuantificó la biomasa de raíces en el almacén del suelo, a una profundidad de 30 cm, en rodales de diferente edad con aprovechamiento forestal. Se encontró que la biomasa de raíces en un rodal de 17 años (anualidad 1995) con aprovechamiento forestal muy aproximada a la encontrada en un área creciendo en condiciones naturales (Figura 4.3). Éstos resultados en comparación con otros estudios realizados en bosques mexicanos, fueron más altos. Por ejemplo, Mendoza y Galicia (2010) al cuantificar la biomasa subterránea en bosques de coníferas (*Abies religiosa* Kunth Schltdl. et Cham., *P. montezumae* y *P. hartwegii* Lindl.), encontraron que en un bosque de 23 años de edad la biomasa de raíces fue de 4.53 Mg ha<sup>-1</sup>, mientras que en un bosque maduro (75 años) fue de 5.20 Mg ha<sup>-1</sup>. Por su parte, Pavón *et al.* (2012) compararon la biomasa subterránea a una profundidad de 30 cm, en un bosque templado (*P. teocote*, *P. montezumae*, *P. patula*, *Q. crassifolia*, *Q. laurina* y *Q. rugosa*) con aprovechamiento forestal con un área con repoblación natural y encontraron que los valores en ambas áreas fueron muy cercanos (3.05 y 3.39 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente). Un resultado más que difiere a los del presente estudio, es el referido por Vogt *et al.* (1986) quienes evaluaron la biomasa subterránea en bosques templados fríos de coníferas y latifoliadas y encontraron una biomasa de raíces finas de 7.31 Mg ha<sup>-1</sup>. Éstos valores fueron hasta cinco veces más bajos de los encontrados en el presente estudio; por lo que el desarrollo del sistema radical en bosques con aprovechamiento forestal con especies de rápido crecimiento como es *P. patula*, tienen alta capacidad para desarrollar estrategias y responder a cambios, positivamente, facilitando la recuperación de los procesos funcionales del ecosistema, después de la aplicación de una corta de repoblación.

Éstas funciones, pueden incluir características de arquitectura que determinen la configuración espacial del sistema radical como un todo; características morfológicas de las raíces individuales, como los diámetros y longitud de las raíces; características fisiológicas fundamentales, como los procesos de respiración, la absorción de agua y nutrimentos, liberación de exudados y; características de interacción con la biota del suelo (Bardgett *et al.*, 2014). Estas características en conjunto, permiten que las plantas pueda hacer frente a las condiciones ambientales cambiantes, especialmente el suministro de agua y nutrientes (Konôpka *et al.*, 2005).

Contrario a lo antes mencionado, existen investigaciones como la de Keyes y Grier (1981), quienes encontraron cantidades de biomasa subterránea, por arriba de las encontradas en el presente estudio. Estos autores, al cuantificar la biomasa subterránea en un bosque de *Pseudotsuga mensiezzi* (Mirb.) Franco, de 40 años de edad en condiciones de alta y baja fertilidad, encontraron una biomasa de raíces totales de 88.1 y 57.6 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estas cantidades fueron aproximadamente siete veces mayores a las del presente estudio.

De la biomasa de raíces cuantificadas en el almacén del suelo, la proporción de raíces finas, representó del 18 al 40% (Figura 4.4). Éstos valores, fueron menores en comparación con lo encontrado por Keyes y Grier (1981), quienes cuantificaron 2.7 y 8.3 Mg ha<sup>-1</sup> de biomasa en raíces finas, en rodales de alta y baja fertilidad respectivamente. Así mismo, Burke y Raynal (1994) al cuantificar la biomasa subterránea en un bosque templado de especies caducifolias, de aproximadamente 80 años de edad en Nueva York, USA., encontraron que a una profundidad de 28 cm, la biomasa de raíces finas ( $\leq 3\text{mm}$ ) fue de 5.4 Mg ha<sup>-1</sup>.

Del sistema radical, las raíces finas representan el componente más altamente dinámico, por lo que la variación del crecimiento temporal y espacial es necesaria para la evaluación de la productividad del ecosistema y para la evaluación del impacto de la aplicación de los tratamientos silvícolas sobre los procesos funcionales de éste mismo (Makkonen y Helmisaari, 1998). Los resultados en el seguimiento del crecimiento estacional de las raíces finas en el presente estudio, aunque no presentó un patrón definido respecto a los rodales de diferente edad en la cronosecuencia para el bosque de *P. patula* (Cuadro 4.1), el mayor crecimiento de raíces finas se presentó en el período de julio a septiembre (verano) en el rodal de anualidad 2005, el más joven dentro de la cronosecuencia. Por su parte, el menor crecimiento se presentó en el AR en el período de invierno. La variación estacional de las raíces podría estar influenciado por diversos factores, por ejemplo, con la profundidad a la que se encuentre, al respecto, Burke y Raynal (1994) encontraron que el máximo crecimiento de raíces se presentó a mediados de abril, a una profundidad de 10 cm; mientras que las raíces encontradas a una profundidad de 40 cm sufrieron un retraso hasta el período de julio-agosto (lo que coincidió con lo encontrado en este trabajo). El crecimiento declinó en septiembre y el crecimiento mínimo ocurrió en octubre. El crecimiento de las raíces cesa durante el

invierno e inicios de primavera; tal como ocurrió en el AR en el presente estudio. Por otra parte, el tipo de especie del que se trate, también podría influir sobre la variación estacional del crecimiento de las raíces finas. Se ha encontrado que la disponibilidad de fotosintatos durante todo el invierno, permite a las especies de pinos tener un mayor dinamismo por parte de las raíces finas, por lo que en primavera-verano es cuando se presentará mayor producción, aunque la mortalidad también podría ser alta. Contrariamente, en las especies de encinos, el mayor número de raíces se mantienen vivas durante el invierno, por lo que las tasas de recambio podrían ser menores (Konôpka *et al.*, 2005).

Por otra parte, se ha demostrado que las raíces finas pueden permanecer activas durante el invierno, tanto como la temperatura del suelo se mantengan por encima del punto de congelación (Idol *et al.*, 2000). Sin embargo, temperaturas más altas y una biomasa aérea más activa durante el período de primavera sugieren un mayor crecimiento de raíces finas durante la primavera que durante el invierno para bosques templados (Idol *et al.*, 2000). Al respecto, Børja *et al.* (2008) evaluaron la influencia de la morfología de las raíces en rodales de *Picea abies* (L.) Karst., y encontraron que la fracción de raíces finas (<1mm) pueden mostrar una amplia variación estacional con valores significativamente más altos en primavera que en otoño. Respecto al máximo crecimiento observado en el presente estudio, fue un valor que se ubicó dentro de lo mencionado por Finér *et al.* (2011a), quienes estimaron un intervalo de  $486 \pm 335 \text{ g m}^{-2}$ , para bosques templados. De la misma forma, la investigación de Konôpka *et al.* (2005) coincidió al encontrar que el máximo crecimiento de raíces finas, en un bosque de *Quercus robur* L. y *Pinus sylvestris* L., alcanzó su máximo en el período de junio- julio, que coincide con la primavera- verano y que la mayor mortalidad, a causa de eventos de sequía, se presentó a finales de julio y principios de agosto.

En términos generales, la producción anual de raíces finas disminuyó con la edad del rodal y fue en el rodal de menor edad (anualidad 2005) donde se presentó la máxima producción ( $601.3 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ) (Figura 4.7). Éstos valores, se encontraron por arriba de los observados por Persson (1980), con una producción de raíces finas en un intervalo de  $149 \pm 21 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$  a una profundidad de 30 cm en un bosque maduro (120 años) de *P. sylvestris*. Así mismo, Brunner *et al.* (2013), encontraron una producción anual de  $250 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$  para bosques de coníferas. Fahey y Hughes (1994), encontraron una producción

de raíces finas de  $264 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , en bosques templados maduros (cerca de 100 años). Dicho valor, fue muy cercano al encontrado en el AR del presente estudio ( $237.6 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ ). Lo anterior también, coincidió con lo encontrado por López *et al.* (2001), quienes registraron una producción anual de  $260 \pm 11 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ , en un bosque de *Quercus ilex* L.

Contrario a lo anterior, también existen informes sobre valores de producción de raíces finas que se encuentran muy por arriba de la encontrada en el presente estudio, como es el caso de Burke y Raynal (1994) quienes encontraron una producción de  $2.3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de raíces finas a una profundidad de 28 cm, en un bosque templado- caducifolio en Nueva York, USA. Pese a estas comparaciones el valor resultante en el presente estudio se ubica dentro del intervalo mencionado por Finér *et al.* (2011b) quienes encontraron una producción anual para bosques templados, en un intervalo de  $356 \pm 304 \text{ g m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ . Existe una gran variación entre los valores de producción de raíces finas, tanto para diferentes tipos de bosques e incluso dentro del mismo tipo, con valores que estarán en función de la metodología utilizada, el tiempo del seguimiento y la definición de raíz fina (Burke y Raynal, 1994; López *et al.*, 2001).

La mortalidad de las raíces finas es un proceso que constituye una fuente muy importante del aporte de materia orgánica al suelo (Persson, 1980). En el presente estudio, la mayor mortalidad de raíces finas se presentó en el rodal más joven (7 años), con la mayor proporción de raíces muertas en el período de noviembre a enero; pero también fue en éste rodal donde se presentó la mayor cantidad de raíces finas vivas, con la mayor proporción en el período de marzo a mayo (Figura 4.6). Lo anterior coincide, con las tasas de recambio calculadas en éste rodal ( $1.04 \text{ año}^{-1}$ ), lo cual indicó que las raíces finas se sustituyen sólo una vez por año; es decir la producción y la mortalidad de raíces finas estarían ocurriendo simultáneamente, como lo señala Osawa y Aizawa (2012) y Lukac (2012). Sin embargo, la mayor tasa de recambio se presentó en el AR ( $1.7 \text{ años}^{-1}$ ), lo cual podría explicarse por la presencia de una mayor composición y diversidad de especies en ésta área. La mayor mortalidad alcanzó valores considerablemente mayores a la producción de raíces finas vivas (Figura 4.10), con valores de  $460.1$  y  $141.1 \text{ g m}^{-2}$ , respectivamente en un rodal de 7 años. Este comportamiento difiere de lo mencionado en otros estudios en bosques templados y de coníferas, los cuales mencionan que la mortalidad domina sobre la presencia de raíces vivas (Børja *et al.*, 2008; Varik *et al.*, 2013). Sin embargo, los valores fueron

considerablemente mayores a lo referido en otros estudios, como el de Persson (1980) quien encontró una mortalidad de 68 y 26 g m<sup>2</sup> de raíces finas, para un rodal de *P. sylvestris* de 15 a 20 años de edad.

El mayor crecimiento de raíces finas vivas se presentó en el período de julio a septiembre (verano), pero la mayor proporción de raíces finas muertas fue durante el período de noviembre a enero (invierno). El resultado anterior coincidió con lo encontrado por Keyes y Grier (1981), quienes observaron que las raíces finas vivas alcanzan su máximo en el mes de junio (8.3 Mg ha<sup>-1</sup>) y declinan en el mes de diciembre (2.1 Mg ha<sup>-1</sup>), que coincide con el aumento de la mortalidad, presumiblemente debido a las condiciones ambientales del suelo, especialmente temperatura y humedad.

Son evidentes las grandes diferencias encontradas en la dinámica de las raíces finas observadas entre los resultados de otras investigaciones y los del presente. Estas diferencias pueden ser resultado de múltiples causas, derivadas principalmente de las condiciones particulares de cada sitio como condiciones climáticas (temperatura y precipitación), condiciones edáficas (compactación, aireación) y la composición y dominancia de las especies (Pritchett, 1986; Makkonen y Helmisaari, 1998). Además, en la mayoría de los casos, dichas diferencias también pueden ser ocasionadas por amplia diversidad de metodologías utilizadas en el seguimiento del crecimiento de las raíces y que no presentan una estandarización clara hasta la fecha (Vogt *et al.*, 1998; Steingrobe *et al.*, 2001; Pavón *et al.*, 2012). De esta forma, no existe una estandarización metodológica sobre la profundidad a la que debe realizarse la estimación de la biomasa subterránea, a pesar de que el volumen de suelo disponible para las raíces está determinado por la profundidad de éste. En tal sentido, la profundidad del suelo generalmente es determinada de forma arbitraria (Pavón *et al.*, 2012). Al respecto, Barreto y León (2005) cuantificaron la biomasa subterránea en parcelas de *P. patula* a diferentes profundidades (0-30, 30-50 y 50-80 cm) y encontraron que la biomasa de raíces finas disminuía muy rápidamente con la profundidad y observando que la biomasa de las raíces finas es casi ocho veces superior en los primeros 30 cm (6.07 Mg ha<sup>-1</sup>) que a una profundidad de 50-80 cm (0.70 Mg ha<sup>-1</sup>).

Paralelamente, las condiciones climáticas juegan un papel determinante en la productividad, mortalidad y por ende de las tasas de recambio. En el presente estudio, uno de los máximos valores de precipitación promedio mensual (425 mm) coincidió con

el período de máximo crecimiento de raíces finas, en el período de mayo a julio (Figura 4.9) y una temperatura media mensual de 17.5 °C, lo que generarían las condiciones favorables como un reflejo y estimulación de la proliferación y producción de biomasa de raíces finas. En cuanto a las condiciones edáficas algunos autores reportan que la mayor biomasa o producción de raíces debería coincidir con las mejores condiciones físicas y químicas del suelo. Por ejemplo, la presencia de una mayor cantidad de MO, que se relaciona con una mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC), es un indicador directo de una mayor disponibilidad de nutrimentos como calcio, potasio y magnesio (Brejda *et al.*, 2000). Estos elementos son requeridos para el metabolismo de las plantas, o bien, un suelo muy ácido inhibiría el crecimiento de las raíces, debido al incremento iones solubles ( $H^+$ ), desplazando los iones metálicos de la superficie del suelo hacia su solución (Makkonen y Helmisaari, 1998).

Por otra parte, se ha comprobado que el gasto o inversión energético requerido para la producción de materia seca subterránea en un sitio con deficiencia de agua o nutrimentos, es mayor, que en sitios con alta fertilidad, tal como lo corroboró Keyes y Grier (1981) en un bosque de *Pseudotsuga menziessi* (40 años), quienes encontraron una biomasa de raíces finas ( $\leq 2\text{mm}$ ) de 8.3 y 2.7  $\text{Mg ha}^{-1}$  en un sitio bajo y alto en fertilidad, respectivamente. Así mismo, éstos autores refirieron una Producción Primaria Neta de raíces finas de  $>5.6$  y de  $>1.4$   $\text{Mg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$  en un sitio con baja y alta fertilidad, respectivamente. Bajo esta premisa, se justifica que en el presente estudio la máxima producción y mortalidad de raíces finas se presentará en el rodal 2005 (Figura 4.6 y 4.8), con menor cantidad de nutrimentos (Cuadro 4.2) que al resto de los rodales de la cronosecuencia de *P. patula*. Se puede agregar, que cuando la planta asigna mayor biomasa hacia las raíces, consigue mayor captación de agua y de nutrimentos minerales del suelo, aun cuando podría presentar una disminución en crecimiento. De esta forma, una planta con mayor proporción de biomasa radical tendría un crecimiento más lento en la parte aérea, aunque con mayor superficie de absorción y mayor posibilidad de supervivencia en hábitats adversos; por ejemplo, en lugares donde los recursos del suelo (agua y nutrimentos), pueden estar limitados (Villar *et al.*, 2004).

La composición de especies es otro de los factores importante, por ejemplo, el rodal 2005 presentó la mayor producción de biomasa de raíces, debido posiblemente, a la presencia una mayor densidad de especies arbustivas, herbáceas y arbóreas, que

contribuyen, a la producción en biomasa de raíces finas, tanto vivas como muertas. Así mismo y pese a que el AR presentó la mayor cantidad de arcilla y limo (43.66 y 39.12%, respectivamente), con mayor acidez en la solución del suelo (pH=4.30), ocupó el segundo lugar en producción de raíces finas (Figura 4.7). Una posible explicación de éstos resultados podrían estar relacionados con la textura del suelo (Rodríguez *et al.*, 2003) o bien, la significativa contribución y presencia de una mayor composición y diversidad de especies. Por ejemplo Burke y Raynal (1994), encontraron valores de biomasa de raíces finas fueron 40% más bajos en un bosque con fragmentos de roca alrededor del 30% que las encontradas en bosques similares con 9% de fragmentos de roca.

#### 4.7. CONCLUSIONES

La dinámica de las raíces es un proceso fundamental dentro del establecimiento y desarrollo en los ecosistemas forestales. La biomasa de raíces en el almacén del suelo a una profundidad de 30 cm en el bosque de *P. patula*, no presentó un patrón definido respecto a la edad del rodal; con una biomasa similar en un rodal de 17 años (anualidad 1995) a la del AR; lo que muestra que un rodal con un aprovechamiento forestal adecuado puede desarrollar un sistema radical que permita el desarrollo, crecimiento y recuperación de las funciones del ecosistema después de la corta de repoblación. De la biomasa de las raíces cuantificada en el almacén, las finas representaron del 18 al 40%, y su variación de crecimiento estacional, sin un patrón definido respecto a las diferentes edades de la cronosecuencia en el bosque de *P. patula*. El mayor crecimiento se presentó en el período de julio a septiembre (verano) y el menor en el período de noviembre a enero (invierno). En cuanto a la producción anual de raíces finas, la cual disminuyó con la edad del rodal, sólo una pequeña proporción de la variación entre los resultados encontrados en el presente estudio con otras investigaciones puede ser explicada por las variables ambientales, condiciones edáficas y composición de especies propias de cada rodal. De igual forma, la máxima producción de raíces finas se observó en el rodal 2005 (7 años de edad), la cual presentó aproximadamente 20% más que la producción de raíces finas, en comparación con la encontrada en el AR (80 años de edad). Los resultados en el presente estudio, concluyen que la aplicación de tratamientos silvícolas específicos y de forma adecuada, propician condiciones ambientales y edáficas ideales

para el éxito en el establecimiento de la masa forestal después de la aplicación de la corta de repoblación

## CAPÍTULO V

### 5. CONCLUSIONES GENERALES

En el presente estudio, se cuantificó la biomasa y productividad primaria neta aérea, el reservorio de raíces y se dio seguimiento al crecimiento en biomasa de raíces finas en cuanto a su patrón estacional, producción y tasas de recambio, en una cronosecuencia de bosque de *P. patula*. Se concluyó que algunas de éstas variables están directamente relacionadas con la etapa y desarrollo del rodal y que se ven afectadas directamente por la aplicación de diversos tratamientos silvícolas. De esta forma, los rodales con aprovechamiento forestal presentaron un desarrollo y crecimiento muy cercano a lo esperado en el área de referencia (AR), que presenta crecimiento condiciones naturales. La producción de la biomasa aérea en el bosque de *P. patula* aumentó con la edad del rodal, presentando diferencias estadísticamente significativas entre las edades de la cronosecuencia. Los valores muy cercanos a los que se encontraron en el AR, como consecuencia de la aplicación de aclareos, favorecieron la asignación de biomasa aérea hacia el fuste con la obtención de productos con características morfológicas adecuadas para la industria maderable. Además, los resultados encontrados en biomasa aérea en un rodal de 30 años (rodal 1982) comparados con el AR permitió concluir que los tratamientos silvícolas también contribuyen, no sólo a que se logren altos rendimientos de producción por unidad de superficie en un menor tiempo, si no a la recuperación de las funciones del ecosistema. Por ejemplo un rodal de siete años de edad presentó una sexta parte de la biomasa aérea encontrada en el AR y, aunque éstos resultados no fueron suficientes para determinar la edad exacta en la que un bosque recién cosechado se convierte de fuente a sumidero de carbono, con estos resultados se puede proveer una premisa que un rodal de *P. patula* a partir de siete años, en las condiciones del área de estudio, puede actuar como sumidero de carbono.

Paralelamente, la biomasa de raíces a una profundidad de 30 cm, aunque no presentó un patrón definido respecto a la edad del rodal. Se observó que un rodal de 17 años (rodal 1995) fue semejante a la del AR; concluyendo con esto, que un rodal con aprovechamiento forestal adecuado puede desarrollar un sistema radical que permita el desarrollo, crecimiento y recuperación de las funciones del ecosistema después de la corta de repoblación.

Por otro lado, la variación en el crecimiento estacional de las raíces finas permitió conocer que el mayor crecimiento se presentó en el período de julio a septiembre (verano) y el menor en el período de noviembre a enero (invierno), lo que proporciona una herramienta importante a considerar para el éxito del establecimiento de las especies forestales dentro de la planeación de la gestión forestal. Los resultados de producción anual de raíces finas, sólo una pequeña proporción de las amplias diferencias entre el presente estudio con otras investigaciones, puede ser explicadas por las variables ambientales, condiciones edáficas y composición de especies propias de cada rodal. De tal forma, que un rodal de siete años de edad presentó las condiciones idóneas para producir aproximadamente el 20% más de la biomasa de raíces finas, en comparación a la encontrada en el AR; lo que lleva a concluir que este comportamiento es consecuencia de la aplicación de los tratamientos silvícolas al propiciar las condiciones ambientales y edáficas para el buen desarrollo del sistema radical para el éxito en el establecimiento de la masa forestal después de la corta de repoblación.

Los resultados llevan a concluir que una gestión forestal sostenible con la implementación de tratamientos intermedios adecuados y una redistribución de los residuos forestales; permiten la provisión no sólo de productos maderables, si no de otros servicios y bienes de regulación del ecosistema, tales como la reincorporación de nutrimentos al suelo, regulación del microclima, regulación del ciclo hidrológico y la captura de carbono. Además, que los bosques repoblados con especies de rápido crecimiento, como *P. patula*, pueden ser usados para llevar a cabo nuevos planes de aprovechamiento forestal sostenible, que ayuden al conocimiento, incremento y mejoría de los reservorios de biomasa aérea y subterránea.

## CAPÍTULO VI

### 6. LITERATURA GENERAL

- Acosta-Mireles, M., J. Vargas-Hernández, A. Velázquez-Martínez, y J. D. Etchevers-Barra. 2002. Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México. *Agrociencia* 36:725-736.
- Aerts, R. 1996. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology* 94:713–724.
- Allen, C. D., M. Savage, D. A. Falk, K. F. Suckling, T. W. Swetnam, T. Schulke, P. B. Stacey, P. Morgan, M. Hoffman, and J. T. Klingel. 2002. Ecological restoration of Southwestern ponderosa pine Ecosystems: a broad perspective. *Ecological Applications* 12(5):1418–1433.
- Ángeles, P. G. 1995. Efecto de la vegetación competidora en el desarrollo inicial de *Pinus patula*. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 114p.
- Ángeles, P. G. 2009. El bosque mesófilo de montaña en el Estado de Hidalgo. *En: El bosque mesófilo de montaña en el estado de Hidalgo: perspectiva ecológica ante el cambio climático*. Universidad Autónoma Chapingo. 146p.
- Arias, A. D. 2004. Validación del índice de densidad del rodal para el manejo de plantaciones forestales de *Tectona grandis* L. f. en el trópico. Kurú. *Revista Forestal (Costa Rica)* 1(1):1-7.
- Badano, E. I. 2011. Conservation and restoration of Mexican forests in the global change scenario: a shared responsibility with multiple benefits. *Madera y bosques* 17(2):7-18.
- Baker, T. T., W. H. Conner, B. G. Lockaby, J. A. Stanturf, and M. K. Burkner. 2001. Fine root productivity and dynamics on a forested floodplain in South Carolina. *Soil Science Society of American Journal* 65:545-556.
- Bardgett, D. R., L. Mommer, and F. T. De Vries. 2014. Going underground: root traits as drivers of ecosystem processes. *Trends in Ecology & Evolution* 29(12):292-699.

- Barrero, M. H., D. Álvarez L., G. Nepveu, I. García C., and M. Guera. 2011. Rotation cutting for *Pinus caribaea* Morelet var. *Caribaea* Barret and Golfari in the integral forest Enterprise "Macurije". CIGET Pinar del Río. ISSN 1562-3297. p: 1-9.
- Barreto, S. L. H., and J. D. León P. 2005. Masa total y contenido de nutrientes en raíces finas de ecosistemas forestales (*Pinus patula* Schltl y Cham, *Cupressus lusitanica* Mill y *Quercus humboldtii* Bonpl.) de Piedras blancas, Antioquia- Colombia. Rev. Fac. Nal. Agr. Medellín 58(2):2907-2929.
- Bazzaz, F. A. 1997. Allocation of Resources in Plants: State of the Science and Critical Questions. *En: Bazzaz, F. A., and J. Grace (eds.). Plant resource allocation.* Academic Press, New York, USA, p: 1-37.
- Bernier, P. P. J. H., and Curtis, P. S. 2008. Measuring litterfall and branchfall. 91-101. *En: (Ed.) Hoover, C. M. 2008. Field Measurements for forest carbon monitoring: A landscape-scale approach.* US Forest Service. Durham, NH United States.
- Børja I., H. A. De Wit, A. Steffenrem, and H. Majdi. 2008. Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway. *Tree Physiology* 28:773–784.
- Bowden, R. D., E. Davidson, K. Savage, C. Arabia, and P. Steudler. 2004. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management* 196:43–56.
- Brejda, J. J., D. L. Karlen, J. L. Smith, and D. I. Allan. 2000. Identification of regional soil quality factors and indicators: II. Northern Mississippi loess hills and prairie. *Soil Science Society of American Journal*, 64:2125–2135. *En: Pavón, N. P., C. E. Moreno, A. Ramírez B. 2012. Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente.* doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.07.052.
- Brunner I., M. R. Bakker, R. G. Björk, Y. Hirano, M. Lukac, X. Aranda, I. Børja, T. D. Eldhuset, H. S. Helmisaari, C. Jourdan, B. Konôpka, B. C. López, C. Miguel Pérez, H. Persson, and I. Ostonen. 2013. Fine-root turnover rates of European forests revisited: an analysis of data from sequential coring and ingrowth cores. *Plant Soil* 362:357–372.

- Burke, M. K., and D. J. Raynal. 1994. Fine root growth phenology, production, and turnover in a northern hardwood forest ecosystem. *Plant and Soil* 162:135-146.
- Calvillo, G. J. C., E. Heriberto C. O., S. Valencia M., C. Flores L. 2005. Estudio epidemológico para *Pinus herrerae* Martínez en la región de Cd. Hidalgo, Michoacán, México. *Foresta Veracruzana* 7:5-10.
- Campell, J. J., C. Messier, and J. Bauhus. 2002. Does soil heterogeneity and compaction ingrowth- cores affect growth and morphology of black spruce fine-roots?. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 33(7-8):1027–1037.
- Castelán- Lorenzo. M., y B. Arteaga- Martínez. 2009. Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham. en cortas bajo el método de árboles padres. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1):49-57.
- Castelán, L. M. 2003. Evaluación de la regeneración natural de *Pinus patula* Schiede. ex Schldl. et Cham. en el ejido La Monojera, municipio de Zacualtipán, estado de Hidalgo. Tesis profesional. Universidad Autónoma Chapingo, México. 95p.
- Castellanos, B. J. F., E. J. T. Garza, Ó. A. A. Calderón, J. J. Pérez, S. M. Musálem, y A. R. López. 2008. Estructura de bosques de pino patula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y bosques* 14(2):51-63.
- Castillo, F. J., Imbert, J. B., Blanco, J. A., Traver, C. y Puertas, F. 2003. Gestión forestal sostenible de masas de pino silvestre en el Pirineo Navarro. *Ecosistemas*, 3. Disponible en <http://www.aeet.org/ecosistemas/033/investigacion3.htm> (consultado Octubre 2014).
- Chávez, A. G., G. Ángeles P., M. Pérez S., E. García M., M. A. López L., y C. Wayson. 2014. Productividad primaria neta aérea en un bosque de *Pinus patula* con aprovechamiento forestal en el centro de México. (En preparación).
- Clark, D., S. Brown, D. W. Kicklighter, J. Q. Chambers, J. R. Thomlinson, and J. Ni. 2001. Measuring Net Primary Production in Forests: Concepts and Field Methods. *Ecological Applications* 2(11): 356-370.
- CONABIO (Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad). 2008. Informe final. Ordenamiento ecológico territorial regional en los municipios donde se ubica el Parque Nacional Los Mármoles. Disponible en

[http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ006\\_1a\\_parte.pdf](http://www.conabio.gob.mx/institucion/proyectos/resultados/InfDQ006_1a_parte.pdf) (consultado el 20 Enero 2014).

- Cruz, M. Z. 2007. Sistema de ecuaciones para estimación y partición de biomasa aérea en Atopixco, Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 39p.
- Da- Lun, T., P. Yuan-Ying, Y. Wen-De, F. Xi, K. Wen-Xing, W. Guang-Jun., and C. Xiao-Yong. 2010. Effects of Thinning and Litter Fall Removal on Fine Root Production and Soil Organic Carbon Content in Masson Pine Plantations. *Pedosphere* 20(4):486–493.
- Del Valle, A. J. I. 2003. Descomposición de la hojarasca fina en bosques pantanosos del Pacífico colombiano. *Interciencia* 28:148-153.
- Díaz-Franco, R., M. Acosta-Mireles, F. Carrillo-Anzures, E. Buendía-Rodríguez, E. Flores-Ayala, y J. D. Etchevers-Barra. 2007. Determinación de ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Pinus patula* Schl. et Cham. *Madera y bosques* 13(1):25-34.
- Durán, M. E., Mas, J. F., y Velázquez, A. 2007. Cambios en las coberturas de vegetación y usos del suelo en regiones con manejo forestal comunitario y áreas naturales protegidas de México. *En: D. Bray, L. Merino and D. Barry (Ed.) Los bosques comunitarios de México. Manejo sustentable de paisajes forestales.* México DF, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), 267-302 p.
- Dvorak, W. S., G. R. Hodge, J. E. Kietzka, F. Malan, L. F. Osorio, and T. K. Stanger. 2000. *Pinus patula.* *En: Conservation and testing of tropical and subtropical forest tree species by the CAMCORE Cooperative, Colleague Natural of Resources, NCSU.* Raleigh, NC. USA. 148 p.
- Eissenstat, D. M., and R. D. Yanai. 2002. Root Life Span, Efficiency, and Turnover. *En: Plant Roots: The Hidden Half.* Eds. Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi. Marcel Dekker, New York, NY, p: 187–204.
- Escobar, E., M. Maass, J. Alcocer D., E. Azpra R., L. I. Falcón A., A. Gallegos G., F. Javier G., F. García O. V. Jaramillo, R. Lecuanda C., V. Magaña, A. Martínez Y., A. Muhlia V., R. Rodríguez S., and J. Zavala H. 2008. Diversidad de procesos

- funcionales en los ecosistemas, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Conabio, México, p:161-189.
- Fahey, T. J., and J. W. Hughes. 1994. Fine root dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest. NH. *J. Ecol.* 82:533–548. *En:* Andersson, P., and H. Majdi. 2005. Estimating root longevity at sites with long periods of low root mortality. *Plant and Soil* 276:9–14.
- Figueroa, N. C. M., G. Ángeles P., A. Velázquez M., y H. de los Santos P. 2010. Estimación de la biomasa en un bosque bajo manejo de *Pinus patula* Schltdl. et Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. *Rev. Mex. Cien. For.* 1:147-157.
- Finér, L., M. Ohashi, K. Noguchi, Y. Hirano. 2011a. Factors causing variation in fine root biomass in forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 261:265–277.
- Finér, L., M. Ohashi, K. Noguchi, Y. Hirano. 2011b. Fine root production and turnover in forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. *Forest Ecology and Management* 262: 2008–2023.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática Köppen. IG, UNAM. Serie Libros, No. 6. 5a ed. México.
- Gerez-Fernández, P., y M. R. Pineda-López. 2011. Los bosques de Veracruz en el contexto de una estrategia estatal REDD+. *Madera y bosques* 17(3):7-27.
- Gómez-Díaz, J. D., J. D. Etchevers-Barra, A. I. Monterrosos-Rivas, J. Campo-Alvez, J. A. Tinoco-Rueda. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2):261-272.
- Gower, S. T., R. E. McMurtrie, and D. Murty. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Tree* 9(11):378-382.
- Goya, J., C. Pérez, J. L. Frangi, y R. Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13:139-150.
- Guariguata, M. R., and R. Ostertag. 2002. Sucesión secundaria. *En:* R. M. Guariguata, y G. H. Kattan. *Ecología y conservación de bosques neotropicales. Libro Universitario Regional*, San José, p: 591-624.

- Guillespie, A. J. R. 1992. *Pinus patula* Schiede and Deepe. SO- ITF- SM- 54. New Orleans, LA., USA. 5 p.
- Gutiérrez, G. B., Etchevers, B. J. D., Velázquez, M. A., Almaraz, S. J. 2005. Influencia del aile (*Alnus firmifolia*) en el crecimiento de plantas de *Pinus patula*. Terra Latinoamericana 23(1):89-96.
- Hertel, D. and C. Leuschner. 2002. A comparison of four different fine root production estimates with ecosystem carbon balance data in a *Fagus-Quercus* mixed forest. Plant and Soil 239:237-251.
- Hirano, Y., K. Noguchi, M. Ohashi, T. Hishi, N. Makita, S. Fujii, and L. Finér. 2009. A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine root production in forest ecosystems. Plant Root 3: 6-31. doi:10.3117/plantroot.3.26
- Idol, T. W., P. E. Pope, and F. Ponder Jr. 2000. Fine root dynamics across a chronosequence of upland temperate deciduous forests. Forest Ecology and Management 127:153-167.
- Imbert, J. B., J. A. Blanco, y F. J. Castillo. 2004. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. *En*: Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Páginas 479-506. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía), 2003. Estadísticas a propósito del día mundial forestal. Disponible en [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx) (consultado el 4 Febrero 2014).
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good Practice Guidance for Land-Use, Land-Use Change and Forestry. *En*: Penman, J., Gytarsky, M., Krug, T., Kruger, D., Pipatti, R., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K., Wagner F. (eds.) IPCC-IGES, Kanagawa. Japón.
- Jandl, R., M. Lindner, L. Vesterdal, B. Bauwens, R. Baritz, F. Hagedorn, D. W. Johnson, K. Minkinen, and K. A. Byrne. 2007. How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. Geoderma 137:253-268.
- Janssens, I. A., D. A. Sampson, J. Curiel-Yuste, A. Carrara, and R. Ceulemans. 2002. The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. For. Ecol. Manage. 168:231-240.

- Jarvis, P. G., B. Saugier, and E. D. Schulze. 2001. Productivity of boreal forests. *En*: J. Roy, A. Saugier, and H. A. Mooney (Eds.). Terrestrial global productivity. San Diego: Academic Press. p: 211–244.
- Keeling, H. C., and O. L. Phillips. 2007. The global relationship between forest productivity and biomass. *Global Ecology and Biogeography* 16:618-631.
- Keyes, M. R., and Grier, C. C. 1981. Above- and below- ground net production in 40-year-old- Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Can. J. For. Res.* 11:599-605.
- Kimmins, J. P. 1997. Forest ecology. A foundation for sustainable management. Prentice- Hall, Nueva Jersey. 596 p.
- Konôpka, B., J. Curiel Y., I. A. Janssens, and R. Ceulemans. 2005. Comparison of fine root dynamics in Scots pine and Pedunculate oak in sandy soil. *Plant and Soil* 276:33–45.
- Kowalski, A. S., D. Loustau, P. Berbigier, G. Manca, V. Tedeschi, M. Borghetti, R. Valentini, P. Kolari, F. Berninger, Ü. Rannik, P. Hari, M. Rayment, M. Mencuccini, J. Moncrieff, and J. Grace. 2004. Paired comparison of carbon exchange between undisturbed and regenerating stands in four managed forests in Europe. *Global Change Biology* 10:1707-1723.
- Lei, Y. C., and S. Y. Zhang. 2004. Features and Partial Derivatives of Bertalanffy-Richards Growth Model in Forestry. *Nonlinear Analysis: Modelling and Control* 9:65–73.
- León, J. D., M. I. González, and J. F. Gallardo. 2011. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Rev. Biol. Trop. (Int. J. Trop. Biol.)* 59(4):1883-1894.
- López, B., S. Sabaté, and C. A. Garcia. 2001. Annual and seasonal changes in fine root biomass of a *Quercus ilex* L. *For. Plant Soil* 230:125–134.
- Lukac, M. 2012. Fine root turnover. *En*: Measuring Roots: An Updated Approach. Mancuso, S. ed. Springer, 233 Spring Street, New York, NY 10013, USA, p:363–373.
- Lupi, A. M., M. E. Conti, y R. A. Fernández. 2012. Calidad del carbono orgánico del suelo en diferentes técnicas de manejo de residuos forestales. *Ciência Florestal Santa María* 22(2):295-303.

- Luysaert, S., J. Staelens, and A. De Schrijver. 2005. Does the commonly used estimator of nutrient resorption in tree foliage actually measure what it claims to?. *Oecologia* 144:177–186.
- Madji, H., K. Pregitzer, A. S. Morén, J. E. Nylund, and G. I. Ågren. 2005. Measuring fine root turnover in forest ecosystems. *Plant and Soil* 276:1-8.
- Maher, R. M., H. Asbjornsen, R. K. Kolka, C. A. Cambardella, and J. W. Raich. 2010. Changes in soil respiration across a chronosequence of tallgrass prairie reconstructions. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139:749–753.
- Makkonen, K., and H. S. Helmisaari. 1998. Seasonal and yearly variations of fine-root biomass and necromass in a Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) stand. *Forest Ecology and Management* 102:283-290.
- Martínez, C. B. E. 2014. Descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. y dinámica de la producción de hojarasca en un bosque manejado en el estado de Hidalgo. Tesis de Maestría. Postgrado Forestal. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 129 p.
- Matamala, R., and W. H. Schlesinger. 2000. Effects of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> on fine root production and activity in an intact temperate forest ecosystem. *Glob. Change Biol.* 6:967–979.
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment). 2005. *Ecosystems and Human Well-Being: Synthesis*. Island Press, Washington D. C. *En*: Dupuy, R. J. M., J. L. Hernández S., R. Hernández J., F. Tun D. y, F. May P. 2012. Efectos del cambio de uso del suelo en la biomasa y diversidad de plantas leñosas en un paisaje de bosque tropical seco en Yucatán. *Investigación ambiental* 4(1):130-140.
- Méndez, G. J., S. L. Luckie N., M. A. Capó A., 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.
- Mendham, D. S., A. M. O'Connell, T. S. Grove, and S. J. Rance. 2003. Residue management effects on soil carbon and nutrient contents and growth of second rotation eucalypts. *Forest Ecology and Management* 181:357–372.

- Mendoza, B. M. A. 1993. Conceptos Básicos de Manejo Forestal. Ed. Limusa, S. A. de C. V. Ed. Uteha. México, D. F. 161p.
- Mendoza, P. A., and L. Galicia. 2010. Aboveground and belowground biomass and carbon pools in highland temperate forest landscape in Central Mexico. *Forestry* 83(5):497-506. doi:10.1093/forestry/cpq032
- Metcalfe, D., P. Meir, L. E. O. C. Aragão, A. da Costa, S. Almeida, A. Braga, P. Golçalves, J. Athaydes, Y. Malhi, and M. Williams. 2008. Sample sizes for estimating key ecosystem characteristics in a tropical terra firme rainforest. *Forest Ecology and Management* 255:558-566.
- Miles, L., and B. Dickson. 2010. REED-plus y la biodiversidad: oportunidades y retos. *Unasylva* 233(61):53-63.
- Mollicone, D., A. Freibauer, E. D. Schulze, S. Braatz, G. Grassi, and S. Federici. 2007. Elements for the expected mechanisms on “reduced emissions from deforestation and degradation, REDD” under UNFCCC. *Environ. Res. Lett.* 2:1-7.
- Morales- González, E., J. López- Upton, J. J. Vargas- Hernández, C. Ramírez- Herrera, y A. G. Muñoz. 2013. Parámetros genéticos de *Pinus patula* en un ensayo de progenies establecido en dos altitudes. *Revista Fitotecnia Mexicana* 36(2):155–162.
- Osawa, A., and R. Aizawa. 2012. A new approach to estimate fine root production, mortality, and decomposition using litter bag experiments and soil core techniques. *Plant Soil* 355:167–181. doi: 10.1007/s11104-011-1090-6.
- Parker, C., A. Mitchell, M. Trivedi, and N. Mardas. 2009. *The Little REDD+ Book*. Ed. Global Canopy Programme. 132 p.
- Patiño, V. F., and P. Y. Kageyama. 1992. *Pinus patula* Schiede & Deppe. Seedleaflet, No. 8A. Danida Forest Seed Centre, Humlebaek, Denmark. 31 p.
- Pavón, N. P., C. E. Moreno, A. Ramírez B. 2012. Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.07.052.
- Peichl, M., and M. A. Arain. 2006. Above- and belowground ecosystem biomass and carbon pools in an age- sequence of temperate pine plantation forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 140:51-63.

- Peng, C., L. Zhang, and J. Liu. 2001. Developing and validating nonlinear height-diameter models for major tree species of Ontario's boreal forests. *Northern Journal of Applied Forestry* 18(3):87-94.
- Penman, J., M. Gytarsky, T. Hiraishi, T. Krug, D. Kruger, R. Pipatti, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe, and F. Wagner. 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. IPCC National Greenhouse Gas Inventories Programme. Institute for Global Environmental Strategies (IGES) for the IPCC.
- Pérez-Suárez, M., J. T. Arredondo M., E. Huber S., and J. J. Vargas H. 2009. Production and quality of senesced and green litterfall in a pine-oak forest in central-northwest Mexico. *Forest Ecology and Management* 258:1307-1315.
- Perry, J. P. 1991. *The pines of Mexico and Central America*. Timber Press, Inc., Portland Oregon, 231 p.
- Persson, H. 1980. Spatial distribution of fine-root growth, mortality and decomposition in a Young Scots pine stand in Central Sweden. *Oikos* 34:77-87.
- Persson, H. 2002. Root system in arboreal plants. *En: Plant Roots: The Hidden Half*. Eds. Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi. Marcel Dekker, New York, NY, p:187-204.
- Persson, H. Å., and I. Stadenberg. 2009. Spatial distribution of fine roots in boreal forests in eastern Sweden. *Plant Soil* 318:1-14.
- Ponce-Vargas, A., I. Luna-Vega, O. Alcántara-Ayala y, C. A. Ruiz-Jiménez. 2006. Florística del bosque mesófilo de montaña de Monte Grande, Lolotla, Hidalgo, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 77:177-190.
- Porter, B. L., E. A. Ellis, M. R. Guariguata, I. Ruiz, M., S. Negrete, Y., V. Reyes G. 2012. Community managed forests and forest protected areas: An assessment of their conservation effectiveness across the tropics. *Forest Ecology and Management* 268:6-17.
- Pregitzer, K. S. 2002. Fine Roots of Trees: A New Perspective. *New Phytologist* 54(2):267-270.
- Pregitzer, K., and E. Euskirche. 2004. Carbon cycling and storage in world forests: biome patterns related to forest age. *Global Change Biology* 10:2052-2077.

- Pretzsch, H. 2014. Canopy space filling and tree crown morphology in mixed-species stands compared with monocultures. *Forest Ecology and Management*, 327:251-264.
- Pritchett, W. 1986. Suelos forestales: Propiedades, conservación y mejoramiento. México D.F. Limusa.
- Pavón, N. P., C. E. Moreno, A. Ramírez B. 2012. Biomasa de raíces en un bosque templado con y sin manejo forestal en Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*. doi: 10.5154/r.rchscfa.2011.07.052.
- Restrepo, C., y M. Alviary. 2010. Tasa de descuento y rotación forestal: el caso del *Eucalyptus Saligna*. *Lecturas de Economía*, 73. Medellín. p: 146-144.
- Rocha, L. A. G., y M. N. Ramírez. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Bol. Soc. Bot. Méx.* 84:1-12.
- Rodríguez, O. G. 2010. Efectos de aclareos en el crecimiento de una plantación de *Pinus patula* Schl. et Cham. En Ixtlán, Oaxaca. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 134 p.
- Rodríguez, O. G., A. Aldrete, V. A. González H., H. M. de los Santos P., A. Gómez, A. M. Fierros G. 2011. ¿Afecta 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.
- Rodríguez, R., M. Hofmann, and D. Espino. 2003. Biomass partitioning and leaf area of *Pinus radiata* trees subjected to silvopastoral and conventional forestry in the VI region, Chile. *Revista de Historia Natural* 76:437-449.
- Rötzer, T., J. Dieler, T. Mente, R. Moshammer, and H. Pretzsch. 2010. Productivity and carbon dynamics in managed Central European forests depending on site conditions and thinning regimes. *Forestry* 83(5):483-496.
- Rush, V., y M. Sarasola. 2011. Manejo Forestal Sustentable: un ideal que puede ser realidad. Serie técnica: "Sistemas Forestales Integrados" Área Forestal - INTA EEA Bariloche. 11 p.

- Ryan, M. G., D. Binkley, J. H. Fownes, C. P. Giardina, and R. S. Senock. 2004. An experimental test of the causes of forest growth decline with stand age. *Ecological Monographs* 74(3):393–414.
- Ryan, M. G., D. Binkley, and J. H. Fownes 1997. Age- relate decline in Forest Productivity: Pattern and Process. *Advances in Ecological Research* 27:214-262.
- Rzedowski, J. 1996. Análisis preliminar de la Flora Vasculare de los Bosques Mesófilos de Montaña de México. *Acta Botánica Mexicana* 35:25-44.
- Rzedowski, R. J., y X. Madrigal S. 1972. Excursión del centro al noreste: Itinerario Tampico– Zacualtipán. Congreso Latinoamericano de Botánica. Guías botánicas de excursiones en México, p: 237-242.
- Santantonio, D. 1980. Seasonal dynamics of fine roots in mature stands of Douglas- fir of different water regimens A preliminary report. *En: Riedacker, A., and J. Gagnaire-Michard (Eds.). Symposium: Root physiology and symbiosis, Nancy (190–203p.). Seichamps, France: Centre Nationale de Recherches Forestières.*
- Santiago, G. W. 2009. Sistema de crecimiento y rendimiento para *Pinus patula* de Zacualtipán, Hidalgo, México. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. 78 p.
- Santiago, G. W., De los Santos, P. H. M., Ángeles, P. G. Valdez, L. J. R., y Ramírez, V. G. 2013. Sistema compatible de crecimiento y rendimiento para rodales coetáneos de *Pinus patula*. *Rev. Fitotec. Mex.* 36(2):163–172.
- SAS Institute Inc. 2009. SAS® Web Report Studio 4.2; User’s Guide, Cary, NC; SAS Institute Inc.
- Schöngart, J. 2008. Growth-Oriented Logging (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. *Forest Ecology and Management* 256(1-2):46-58.
- Schuur, E. A. G. 2003. Productivity and global climate revisited: the sensitivity of tropical forest growth to precipitation. *Ecology* 84(5):1165-1170.
- Servicio Meteorológico Nacional. 2014. Normas Climatológicas. Dirección General de Geografía y Meteorología. Secretaría de Agricultura y Ganadería. México. Consulta personal en Abril 2014.

- Smith, C. T., A. T. Lowe, M. F. Skinner, P. N. Beets, S. H. Schoenholtz, and S. Fang. 2000. Response of radiata pine forests to residue management and fertilization across a fertility gradient in New Zealand. *Forest Ecology and Management* 138:203-223.
- Soriano, L. M. A., G. Ángeles P., T. Martínez T., F.O. Plascencia E. y R. Razo Z. 2014. Estimación de biomasa arbórea por componente estructural en Zacualtipán, Hidalgo, México. *Agrociencia* (en revisión).
- Steingrobe, B., S. Harald, C. Norbert. 2001. The use of the ingrowth core method for measuring root production of arable crops—influence of soil and root disturbance during installation of the bags on root ingrowth into the cores. *European Journal of Agronomy* 2(15):143-151.
- Tateno, R., K. Fukushima, R. Fujimaki, T. Shimamura, M. Ohgi, H. Arai, N. Ohte, N. Tokuchi, T. Yoshioka. 2009. Biomass allocation and nitrogen limitation in a *Cryptomeria japonica* plantation chronosequence. *J For Res*, 14:276–285.
- Trumbore, S. E., and J. B. Gaudinski. 2003. The Secret Lives of Roots. *Science* 302:1344-1345.
- Van P. R., and J. F. Franklin. 2000. Influence of canopy structure on the understory environment in tall, old-growth, conifer forests. *Can. J. For. Res.* 30:1231–1245.
- Vanclay, J. K. 1994. Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical forest. CAB International, Wallingford, UK. 312 p.
- Vargas, B., J. Corral, F. Cruz, O. Aguirre, and J. Nagel. 2008. Uso y aplicación de los simuladores de crecimiento forestal en la toma de decisiones silviculturales. *Revista Forestal Latinoamericana* 23(2):33-52.
- Varik, M., J. Aosaar, I. Ostonen, K. Lõhmus, V. Uri. 2013. Carbon and nitrogen accumulation in belowground tree biomass in a chronosequence of silver birch stands. *Forest Ecology and Management* 302:62–70.
- Vela G. L. 1980. Contribución a la ecología de *Pinus patula*. Publicación especial No. 19. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. México, D.F. 109 p.
- Velázquez, M. A., G. Ángeles P., T. Llanderal O., A. R. Román J., y V. Reyes H. 2004. Monografía de *Pinus patula*. Comisión Nacional Forestal. México. 124 p.

- Velázquez, M. B. 2006. Situación de los sistemas de aprovechamiento de los residuos forestales para su utilización energética. *Ecosistemas* 15(1):77-86.
- Vignote, P. S., I. Martínez R., y A. Villasante P. 2011. La Silvicultura como primera operación de transformación de la madera. *Rev. Mex. Cien. For.* 2(4):5-12.
- Villar, R., J. Ruíz R., J. L. Quero, H. Poorter, F. Valladares, y T. Marañón. 2004. Tasas de crecimiento en especies leñosas: aspectos funcionales e implicaciones ecológicas. *En: Valladares, F. 2004. Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid, p: 191-227.*
- Vitousek, P. M., and W. A. Reiners. 1975. Ecosystem succession and nutrient retention: a hypothesis. *BioScience* 25(6):376-381.
- Vogt, K. A., C. G. Grier, and D. J. Vogt. 1986. Production, turnover and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances in Ecological Research.* 15:303-377.
- Vogt, K. A., D. J. Vogt, and J. Bloomfield. 1998. Analysis of some direct and indirect methods for estimating root biomass and production of forest at an ecosystem level. *Plant and Soil* 200:71-89.
- Vogt, K.A., D. J. Vogt, P. A. Palmiotto, B. Boon, J. O'Hara, H. Asbjornsen. 1996. Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. *Plant Soil* 187:159-219.
- von Gadow, J. M., S. Sánchez O., O. A. Aguirre C. 2004. Manejo forestal con bases científicas. *Madera y bosques* 10(2):3-16.
- Vose, J. M., and M. G. Ryan. 1994. Seasonal respiration of foliage, fine roots, and woody tissues in relation to growth, tissue N, and photosynthesis. *Global Change Biology* 8:182-193.
- Xiao, C. W., Y. J. Curiel, I. A. Janssens, P. Roskam, 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* 23:505-516.
- Xiao, C. W., E. G. Sang, and R. Z. Wang. 2008. Fine root dynamics and turnover rate in an Asia white birch forest of Donglingshan Mountain, China. *Forest Ecology and Management* 255:765-773.

Yu, S., J. L. Chambers, Z. Tang, and J. P. Barnett. 2003. Crown characteristics of juvenile loblolly pine 6 years after application of thinning and fertilization. *Forest Ecology and Management* 180:145-152.

Zhao-gang, L., and L. I. Feng-ri. 2003. The generalized Chapman- Richards function and applications to tree and stand growth. *Journal of Forestry Research* 14(1):19-26.