



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**Descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* Schltl. & Cham. y dinámica de la producción de hojarasca en un bosque manejado, en el estado de Hidalgo**

BLAS ESTEBAN MARTÍNEZ CASTILLO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2014

La presente tesis titulada: "**Descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* Schltl. & Cham. y dinámica de la producción de hojarasca en un bosque manejado, en el estado de Hidalgo**" realizada por el alumno: **Blas Esteban Martínez Castillo**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS  
EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA

  
\_\_\_\_\_  
DRA. FRANCISCA OFELIA PLASCENCIA ESCALANTE


ASESORA

  
\_\_\_\_\_  
DRA. MARÍA GUADALUPE BARAJAS GUZMÁN

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ

ASESOR

  
\_\_\_\_\_  
DR. RODRIGO RODRÍGUEZ LAGUNA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Junio de 2014

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

*Jehová es mi fortaleza y mi escudo;  
en él confié mi corazón, y fui ayudado,  
por lo que se gozó mi corazón,  
y con mi cántico le alabaré.*

*Salmos 28:7*

## DEDICATORIA

Al **Dios** que me enseñó mi madre, quien es el creador de todo lo que existe y quien conoce el inicio y el final de mis días.

A **Silvia** por compartirme parte de su vida desde mi gestación hasta el día de hoy.

A **Misael, Isabel y Adán** por permitirme su espacio en estos años y por todo lo que me han compartido, tienen mi gratitud infinita.

A mis tíos **Bertha, Santa y Diego** por no perder la confianza en mí, aún y cuando yo mismo la había perdido.

A **Esperanza** por coincidir de nuevo en mi vida y brindarme tu amor.

A mis hermanas **Melly, Kenia y Basti**, son una bendición en mi vida, vamos a levantarnos juntos.

A mis amados sobrinos **Shirley, Aldo, Fátima, Tonatiuh, Tatiana, Elena y Taíz** la luz de mi casa, por quienes entiendo que vale la pena pelear.

A la memoria de mi **Padre** y mis **Abuelos**, su recuerdo sigue vivo y fiel.

## AGRADECIMIENTOS

Antes de todo agradezco infinitamente a **Dios** el permitirme concluir con este trabajo y cerrar este ciclo profesional.

Al **Pueblo de México** que con sus contribuciones dan la oportunidad a cientos de profesionistas de continuar sus estudios de postgrado.

A los habitantes del **Ejido Atopixco**, por permitirme desarrollar este trabajo en los bosques que mantienen de manera sustentable.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por gestionar los recursos y proveerme de la beca que me permitió mantenerme durante este ciclo.

Al **Colegio de Postgraduados** por abrirme sus puertas, dotarme de herramientas y certificar el proceso que concluye con este documento.

A los integrantes de mi Consejo Particular: **Dra. F. Ofelia Plascencia Escalante** mi Consejera por su confianza y paciencia en la realización de este trabajo, así como a los demás miembros del Consejo **Dra. Guadalupe Barajas Guzmán, Dr. Rodrigo Rodríguez Laguna** y **Dr. Alejandro Velázquez Martínez** por sus atinadas sugerencias y comentarios durante la realización y la revisión final de todo este estudio, sin su guía este documento no hubiera visto la luz.

Al **Dr. Gregorio Ángeles Pérez** su instrucción, disponibilidad y confianza fortalecieron y dieron forma a este trabajo.

A todas las personas que participaron de una u otra forma en la realización de este trabajo, compañeros, amigos y familiares: **Isa, Misa, Lola, Perita, Diana, Griselda, Liz, Odettee, Ahmed, Benjamín, Francisco, Martín, Oscar y Wenceslao**, así como a quienes escapen de mi memoria ofrezco una sincera disculpa.

A los **Profesores** del **Colegio de Postgraduados** involucrados en mi formación, así como al **Personal** de los Laboratorios en los que desarrollé parte de este trabajo por la asesoría brindada y los espacios prestados.

A mis **Colegas** con quienes compartí buenos momentos durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados, y a los cuales ofrezco una disculpa por no mencionarlos personalmente, de hacerlo esta página no sería suficiente, ustedes saben quiénes son.

## CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS .....	III
LISTA DE CUADROS .....	VII
RESUMEN .....	IX
ABSTRACT .....	X
1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS.....	4
2. 1. Objetivo general .....	4
2. 2. Objetivos particulares .....	4
2. 3. Hipótesis.....	4
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
3. 1. Estructura y dinámica de los ecosistemas forestales .....	6
3. 2. Producción de hojarasca .....	10
3. 3. Descomposición de la materia orgánica.....	12
3. 4. Aprovechamiento y manejo de los bosques .....	16
3. 5. Importancia de los bosques de <i>Pinus patula</i> .....	18
4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	21
4. 1. Ubicación del sitio de estudio .....	21
4. 2. Establecimiento de los experimentos .....	24
4. 2. 1. Selección de rodales y establecimiento de sitios .....	24
4. 2. 2. Variables climatológicas.....	25
4. 2. 3. Producción de hojarasca.....	25
4. 2. 4. Descomposición de acículas.....	29
4. 2. 5. Contenido de nitrógeno y carbono .....	36
4. 2. 6. Estructura y diversidad de los rodales estudiados .....	39
5. RESULTADOS .....	43
5. 1. Producción de hojarasca fina en rodales sometidos a aprovechamiento forestal maderable y su contenido de carbono y nitrógeno.....	43
5. 1. 1. Producción mensual y anual de hojarasca fina.....	43
5. 1. 2. Contenido de carbono, nitrógeno y tasas de retorno en hojarasca fina producida en rodales manejados .....	58
5. 2. Descomposición de acículas y dinámica de carbono y nitrógeno en rodales de <i>Pinus patula</i> sometidos a aprovechamiento forestal maderable .....	61

5.	2. 1. Descomposición de acículas de <i>Pinus patula</i> .....	61
5.	2. 2. Dinámica de carbono y nitrógeno en la descomposición de acículas de <i>Pinus patula</i> . .....	71
5.	3. Caracterización estructural y diversidad arbórea de rodales de diferente edad .....	73
5.	3. 1. Análisis estructural de cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo .....	73
5.	3. 2. Diversidad de especies en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo .....	76
6.	DISCUSIÓN .....	85
6.	1. Producción de hojarasca fina en rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo .....	85
6.	2. Descomposición de acículas de <i>Pinus patula</i> en rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo .....	92
6.	3. Análisis estructural de rodales manejados en el ejido Atopixco .....	95
7.	CONCLUSIONES. ....	99
8.	BIBLIOGRAFÍA .....	102



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclos de carbono y nitrógeno en ecosistema terrestres (Tomado de Thornton <i>et al.</i> , 2009).....	9
Figura 2. Relación del proceso de descomposición con otros procesos de los ecosistemas (Tomado de Lavelle y Spain, 2001).....	13
Figura 3. Área de distribución natural de <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham. (Fuente: Comisión Nacional Forestal, 2010). ....	19
Figura 4. Ubicación del ejido Atopixco, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México, y conformación de los sitios de estudio.....	21
Figura 5. Climograma ombrotérmico de Gaussen obtenido a partir de las normales climatológicas de 1981-2010 registradas por el SMN, para el municipio de Zacualtipán de Ángeles.....	23
Figura 6. Conformación de los sitios dentro de las parcelas experimentales.....	25
Figura 7. Trampa colectora de hojarasca.....	26
Figura 8. Conformación de trampas colectoras para evaluar la producción de hojarasca.....	27
Figura 9. Separación de estructuras vegetales constituyentes de la hojarasca. ...	28
Figura 10. Recolección de acículas de <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham. para el experimento de descomposición.....	29
Figura 11. Pesaje de muestra para llenado de bolsa. ....	30
Figura 12. Aspecto de bolsa de malla, para evaluar descomposición de acículas.	31
Figura 13. Secado de muestras vegetales en estufa de circulación forzada.....	32
Figura 14. Conformación de los lotes de descomposición en los sitios de estudio. ....	33
Figura 15. Aspecto de un lote para evaluar la descomposición de acículas. ....	34
Figura 16. Molienda de material vegetal para análisis químicos. ....	38
Figura 17. Producción promedio de hojarasca durante un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los	

errores estándar. Las letras distintas indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis, $p < 0.001$ ). .....	43
Figura 18. Porcentaje de aporte por componente al total de la hojarasca recolectada en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	44
Figura 19. Producción de hojarasca a lo largo de un año en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	45
Figura 20. Producción media mensual de hojarasca en un bosque sin manejo respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	47
Figura 21. Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 24 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	48
Figura 22. Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 14 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	49
Figura 23. Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 4 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	50
Figura 24. Producción promedio de acículas de <i>Pinus patula</i> Schlt. & Cham. a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	52
Figura 25. Producción promedio de hojas de <i>Quercus</i> spp., a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	53
Figura 26. Producción promedio de hojas de otras latifoliadas a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	54
Figura 27. Producción promedio de fragmentos leñosos (ramillas y corteza) a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	55

Figura 28. Producción promedio de misceláneos (estructuras reproductivas, epífitas y fragmentos sin identificar) a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	56
Figura 29. Tasas de retorno de carbono en componentes de la hojarasca depositada en cuatro rodales manejados en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	60
Figura 30. Tasas de retorno de nitrógeno en componentes de la hojarasca depositada en cuatro rodales manejados en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. ....	61
Figura 31. Porcentajes de masa remanente después de 365 días en rodales manejados. Las barras verticales indican los errores estándar. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con el análisis de varianza (95%).....	62
Figura 32. Porcentajes promedio de masa remanente en función del tiempo de incubación en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Letras diferentes indican diferencias en el tiempo de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (95%). Las barras verticales indican los errores estándar. ....	63
Figura 33. Relación entre la masa remanente y el tiempo de incubación durante un año en cuatro rodales de diferentes edades en Zacualtipán, Hidalgo.....	66
Figura 34. Porcentajes de masa pérdida en función del tiempo de incubación en cuatro rodales de diferentes edades en Zacualtipán, Hidalgo. Letras distintas indican diferencias significativas en el tiempo de acuerdo con el análisis de varianza ( $p < 0.05$ ). Las barras verticales indican los errores estándar. ....	67
Figura 35. Porcentajes de carbono y nitrógeno y relación C:N, obtenidos en las muestras incubadas en campo durante un año en un experimento de descomposición de acículas de <i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham. en Zacualtipán, Hidalgo. ....	72
Figura 36. Distribuciones diamétricas de los árboles medidos en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	75
Figura 37. Distribuciones de alturas de árboles medidos en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	76
Figura 38. Índices de valor de importancia calculados para las especies arbóreas existentes en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	77

Figura 39. Índices de valor forestal calculados para las especies arbóreas existentes en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. .... 81

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Fechas de recuperación y tiempo de incubación de las bolsas de malla en cuatro rodales con diferentes edades en el ejido Atopixco, Zacualtipán. Hidalgo. ....	34
Cuadro 2. Análisis de correlación entre producción de hojarasca, precipitación mensual, velocidad promedio mensual del viento y temperatura media mensual. 51	
Cuadro 3. Análisis de correlación entre producción de hojarasca por componentes, precipitación media mensual, velocidad promedio mensual del viento y temperatura media mensual.....	57
Cuadro 4. Cantidades promedio de carbono y nitrógeno ( $\pm$ desviación estándar), y relación C:N en la hojarasca fina producida durante un año en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	58
Cuadro 5. Concentraciones promedio de carbono y nitrógeno ( $\pm$ la desviación estándar) de los componentes de la hojarasca obtenidos en un experimento de producción en cuatro rodales de diferente edad, Zacualtipán, Hidalgo.....	59
Cuadro 6. Tasas de flujo de carbono y nitrógeno en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	59
Cuadro 7. Temperatura media del suelo de noviembre de 2012 a junio de 2013 (desviación estándar) y análisis de correlación de Pearson entre la temperatura media del suelo y la masa remanente final. ....	64
Cuadro 8. Tasas de descomposición ( $k$ ) y tiempo necesario para que desaparezca el 50 y el 99% de la masa de las acículas de <i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham. en rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	68
Cuadro 9. Análisis de regresión entre la tasa de descomposición ( $k$ ) y las variables climáticas temperatura media ambiental (TM), radiación global (RG), humedad relativa (HR) y evapotranspiración potencial (EP) después de un año de incubación en campo. ....	69
Cuadro 10. Porcentajes promedio de carbono y nitrógeno, y la relación C:N en acículas de <i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham. en un experimento de descomposición en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	71
Cuadro 11. Contenidos promedio iniciales y finales de carbono y nitrógeno ( $\pm$ desviación estándar) y la relación C:N en un experimento de descomposición de	

acículas de <i>Pinus patula</i> Schltl. & Cham. en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	73
Cuadro 12. Características dasométricas de cuatro rodales con diferente periodo de aprovechamiento en Zacualtipán, Hidalgo. ....	74
Cuadro 13. Índices promedio (desviación estándar) de diversidad y riqueza de cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	77
Cuadro 14. Índices de valor de importancia para las especies de cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. ....	79
Cuadro 15. Índices de valor forestal para las especies de cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	82
Cuadro 16. Análisis de correlación entre la producción de hojarasca, la descomposición de acículas y variables dasométricas en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.....	84

**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**

Blas Esteban Martínez Castillo, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2014

**RESUMEN**

El flujo de nutrimentos en un bosque está determinado por los procesos de producción de hojarasca y su subsecuente descomposición. Por lo tanto el estudio de estos procesos es de suma importancia en la determinación de la sustentabilidad de los bosques. En este trabajo se evaluó la producción de hojarasca fina y la descomposición de acículas de *P. patula* durante un año (Julio 2012-Junio 2013) en rodales manejados de diferente edad (4, 14 y 24 años) y un rodal no intervenido, en el Estado de Hidalgo. En dicho periodo se recolectó hojarasca mensualmente en trampas de tela para estimar su producción. Al mismo tiempo se desarrolló un experimento con bolsas de malla para evaluar la pérdida de masa en acículas de *P. patula*. En el experimento de producción de hojarasca se encontró una variación en las cantidades recolectadas en los cuatro rodales, siendo el rodal sin intervenciones el que registró la producción mayor (6570.33 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) mientras que la menor ocurrió en el rodal más joven (175.09 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Los porcentajes de masa remanente al final del experimento de descomposición variaron entre 59.1 y 70.3%, las tasas obtenidas estuvieron entre un intervalo de  $k= 0.37$  a  $k= 0.56$ . Los procesos de producción y descomposición están influidos mayormente por las características dasométricas de los rodales que por factores ambientales a esta escala de estudio.

**Palabras clave:** Caída de hojarasca, tasas de descomposición, diversidad estructural, manejo forestal.

# DECOMPOSITION OF *Pinus patula* Schltdl. & Cham. NEEDLES AND DYNAMICS OF LITTER FALL IN A MANAGED FOREST IN THE STATE OF HIDALGO

Blas Martínez Esteban Castillo, M. en C.

Colegio de Postgraduados, 2014

## ABSTRACT

The flow of nutrients in a forest is determined by the processes of litter fall and its subsequent decay. Therefore the study of these processes is of paramount importance in determining the forest sustainability. In this work fine litter fall and decomposition of needles of *P. patula* were measured for one year (July 2012-June 2013) in managed stands of different ages (4, 14 and 24 years) and a unmanaged stand in the State of Hidalgo. In this period, litter was collected monthly in traps to estimate its production. At the same time an experiment was carried out with mesh bags to evaluate the mass loss in needles of *P. patula*. In the experiment of litter fall a variation was found in the amounts collected in the four stands, being the unmanaged stand that recorded the highest production ( $6570.33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) while the lowest occurred in the youngest stand ( $175.09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ). Percentages of remaining mass at the end of the experiment varied between 59.1 and 70.3%, the rates obtained were within a range of  $k = 0.37$  to  $k = 0.56$ . The production and decay processes are influenced mostly by dasometric features than by environmental factors on this scale of study.

**Keywords:** Litter fall, decay rates, structural diversity, forest management.



## 1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas forestales cubren alrededor del 30% de la superficie terrestre y proveen a la sociedad productos tales como madera, fibras vegetales, plantas comestibles y medicinales, además de servicios ambientales como son: la protección de cuencas hidrológicas, la recreación, el embellecimiento del paisaje, la conservación de la biodiversidad y la captura de carbono, entre otros, por lo que es de suma importancia estudiarlos y comprender su funcionamiento para realizar un aprovechamiento correcto y sustentable (Young y Giese, 1990; Bärlocher, 2005; Bishop y Landell-Mills, 2006; FAO, 2012). Dentro de los usos que se hacen de estos ecosistemas destaca la producción de madera, que por sus características, es el más sobresaliente y estudiado históricamente, debido a lo que representa en términos económicos y de desarrollo para las localidades, regiones y países que se benefician (Perlin, 1989; Pérez-Olvera *et al.*, 2000).

Particularmente en México la producción maderable se ha obtenido históricamente a partir de bosques naturales, y recientemente en plantaciones forestales comerciales. De acuerdo con cifras oficiales el Producto Interno Bruto Forestal ha tenido altibajos desde 2003 (25,603.1 millones de pesos) hasta el 2011 (27,564.2 millones de pesos), en si la situación de la industria no ha sido nada alentadora en términos de rendimiento y esto se puede apreciar en la relación de producción y consumo per cápita de la madera ya que, mientras la producción se ha mantenido a la baja desde 1990 hasta 2011, con cantidades de 97.2 hasta 55.4 m<sup>3</sup> rollo (por cada 1000 habitantes), el consumo ha aumentado en los mismos años de 135.3 a 190.3 m<sup>3</sup> rollo (por cada 1000 habitantes), además en la balanza comercial, las importaciones superan por amplio rango a las exportaciones a lo largo de los años antes mencionados (Elizondo, 2005; Presidencia de la República, 2012).

Las causas principales de que el sector forestal se encuentre en esta situación son: inseguridad en la tenencia de la tierra, organización deficiente de los poseedores como unidades de producción forestal, sobreexplotación del recurso, un sector privado con una crisis de competitividad internacional y un marco legal e institucional inadecuado para promover la sustentabilidad en la producción. Al final todo lo antes mencionado se traduce en una disminución de la superficie con vocación forestal y el deterioro de los bosques debido a la fragmentación (Palacios-Bianchi, 2002; Torres-Rojo, 2004).

Al igual que en todos los ecosistemas, en un bosque ocurren interrelaciones, procesos y ciclos que mantienen en buen estado la dinámica de los mismos a través de las transformaciones de la materia y la energía que circula entre sus componentes; de acuerdo con Coleman *et al.* (2004) los ecosistemas deben entenderse a partir de cuatro subsistemas o procesos elementales: la productividad, el consumo, la descomposición y los componentes abióticos.

En la superficie del suelo, es donde se depositan y se acumulan continuamente los tejidos muertos resultantes de la producción primaria, además de raíces y otros organismos que contribuyen en el subsuelo, estos residuos conforman a la hojarasca. De acuerdo con Spurr y Barnes (1982) esta se encuentra contenida en el horizonte superficial en un perfil teórico del suelo forestal, y está constituida por estructuras aún reconocibles como pueden ser hojas, ramas, frutos y animales muertos, y su disponibilidad esta mediada por el tipo y la abundancia de la vegetación. La transformación de estos residuos se realiza mediante interacciones tróficas dentro del proceso de descomposición, que es el proceso encargado de transformar los nutrimentos dispuestos en formas no asimilables a otras disponibles para las plantas y demás organismos que habitan en el suelo forestal (Armson, 1977; Waring y Schlesinger, 1985; Adl, 2003).

En la actualidad existen en el mundo diversos estudios sobre los procesos antes mencionados a escala local, como parte de los esfuerzos de la comunidad científica

para dilucidar los efectos del cambio climático global y el efecto de las malas prácticas de manejo sobre la vegetación y los ciclos biogeoquímicos. En nuestro país existen pocas experiencias con este tipo de estudios por lo que es importante generar mayor evidencia de cómo estos procesos son afectados por los tipos y las intensidades del manejo silvícola y de esta manera generar recomendaciones para un aprovechamiento sustentable de los recursos forestales.

En el presente trabajo se analizó la variación en el peso remanente y los contenidos de carbono y nitrógeno durante el proceso de la descomposición de la fracción foliar de una especie de importancia económica (*Pinus patula* Schltdl. & Cham.), así como en la dinámica de la producción de hojarasca fina. Dichos procesos no han sido estudiados en este bosque por lo que nuestro estudio parte de los siguientes objetivos.

## **2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS**

### **2. 1. Objetivo general**

Comparar los contenidos de nitrógeno y carbono en la hojarasca fina y acículas de *Pinus patula* durante los procesos de producción y descomposición en un bosque sometido a manejo silvícola en Zacualtipán, Hidalgo.

### **2. 2. Objetivos particulares**

- Estimar la producción anual de hojarasca fina en rodales de *Pinus patula* con diferentes edades.
- Determinar la tasa de descomposición anual ( $k$ ) de acículas de *Pinus patula* en rodales manejados.
- Analizar el contenido de carbono y nitrógeno en acículas *Pinus patula* durante los procesos de producción y descomposición.
- Evaluar mediante un inventario en los rodales la variación de las características dasométricas para estimar sus influencias en los procesos de producción de hojarasca fina y descomposición de acículas.

### **2. 3. Hipótesis**

- La producción de hojarasca fina aumenta con la edad del rodal.
- La tasa de descomposición es mayor en rodales jóvenes.

- La relación C:N presenta valores menores en los primeros días de la descomposición de acículas los cuales disminuyen a través del tiempo.
- Los procesos de producción de hojarasca fina y descomposición de acículas están influenciados por las características dasométricas de los rodales.

### **3. REVISIÓN DE LITERATURA**

#### **3. 1. Estructura y dinámica de los ecosistemas forestales**

Los ecosistemas forestales están representados en aproximadamente un tercio de la superficie terrestre y de acuerdo con sus características funcionan como hábitat para diversas especies de plantas, animales, hongos y microbios. Están catalogados como uno de los ecosistemas terrestres más importantes, debido principalmente a que participan como reguladores de los ciclos biogeoquímicos, ayudan a la conservación del suelo y son fuente de materias primas para diversas industrias. A través de las relaciones que se forman entre todos sus componentes se constituye un complejo dinámico que cambia constantemente a través del tiempo e intercambia materia y energía con otros ecosistemas adyacentes y con la atmósfera (Spurr y Barnes, 1982; Waring y Schlesinger, 1985).

Estos ecosistemas se caracterizan principalmente por la presencia de especies arbóreas, y su estructura está definida por la diversidad de dichas especies, su grado de conservación, la influencia de los factores climáticos y su ubicación geográfica. De esta manera dicha estructura se puede interpretar de manera horizontal, es decir, analizando la participación de cada especie arbórea con relación a las demás y su distribución, o de forma vertical agrupando a dichas especies de acuerdo a su estado sucesional (Acosta *et al.*, 2006). La estructura de los bosques y los procesos que ocurren al interior de los mismos están ligados intrínsecamente, debido a esto la alteración en su composición se refleja en la funcionalidad de los ciclos (Spies, 1998; Araujo *et al.*, 2008).

Tal y como se mencionó anteriormente los bosques participan de manera importante en la regulación de los ciclos biogeoquímicos, que son aquellos relacionados con el reciclaje de elementos y sustancias tales como carbono, nitrógeno, oxígeno, agua,

hidrógeno, calcio, sodio, azufre, fósforo y potasio. Dichos ciclos ocurren entre los organismos vivos y la atmósfera, de tal manera que la biosfera está condicionada a que suceda dicha circulación de elementos, ya que sin ella las reservas de nutrimentos se agotarían (Waring y Schlesinger, 1985).

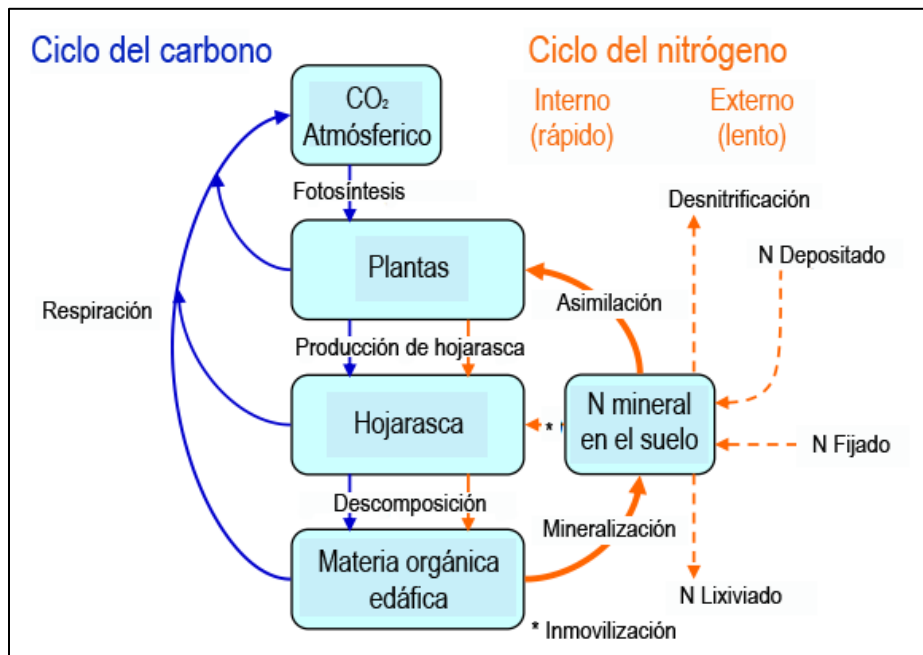
Partiendo de lo anterior, son dos procesos en particular los que mantienen el reciclaje de nutrimentos: la biosíntesis de la biomasa (producción) y la biodegradación de la materia orgánica muerta (descomposición). De manera general, la producción es el proceso mediante el cual se sintetiza la materia orgánica a partir de elementos inorgánicos como resultado de reacciones químicas llevadas a cabo por los organismos autótrofos. La biomasa producida se convierte en los distintos órganos de las plantas y como parte de su ciclo de vida es liberada una vez que estos dejan de ser funcionales, además de las pérdidas que se dan dentro de las cadenas tróficas y otras alteraciones ajenas a los organismos vegetales. Así esta materia orgánica se deposita en el suelo para que dé inicio el proceso de su descomposición que básicamente involucra al igual que en su síntesis una serie de reacciones químicas y procesos que conllevan a la mineralización o regeneración de nutrimentos, por acción de un complejo formado por factores ambientales y la labor de los organismos descomponedores (Benckiser, 1997; Adl, 2003; Plante y Parton, 2007).

Dentro de los ciclos biogeoquímicos, es el del carbono uno de los más importantes para los seres vivos, debido a que este elemento es el principal componente de sus tejidos. Este ciclo consiste en la fijación del carbono contenido en la atmósfera en forma de  $\text{CO}_2$  por medio del proceso de la fotosíntesis realizado en las plantas, esto ocurre con la absorción de dicho gas por el tejido ubicado principalmente en las hojas y su subsecuente transformación a partir de la energía luminosa, liberando como resultado final oxígeno ( $\text{O}_2$ ) a la atmósfera e hidratos de carbono a los demás órganos de la planta. En contraste, el  $\text{CO}_2$  es liberado por la vía de la respiración celular de las plantas y la respiración microbiana en el suelo durante la descomposición de materia orgánica, por lo que la alteración de la cubierta vegetal incide directamente en la

cantidad de CO<sub>2</sub> que se capta y se libera a la atmósfera, además de las variaciones estacionales que ocurren de forma natural y la quema de combustibles fósiles (Schlesinger, 1997; Thornton *et al.*, 2009) (Figura 1).

El nitrógeno es otro elemento de importancia esencial para la vida en el planeta ya que al igual que el carbono, es un componente estructural de los tejidos, además de los aminoácidos y las enzimas. La mayor concentración de este elemento se encuentra en la atmósfera y en menor medida en la biomasa de la superficie y la materia orgánica muerta contenida en el suelo, la forma química más abundante en la atmósfera es N<sub>2</sub> la cual es a su vez la menos reactiva dada la fuerza de su triple enlace. De este modo la disponibilidad del nitrógeno atmosférico para las plantas está mediada por los procesos de fijación, nitrificación, asimilación y amonificación, que en su conjunto componen el ciclo del nitrógeno complementados con la desnitrificación que lo reintegra a la atmósfera (Schlesinger, 1997). La fijación consiste en la transformación del N<sub>2</sub> a amoníaco (NH<sub>3</sub>) por la acción de hongos y bacterias de vida simbiote, posteriormente la nitrificación se da cuando el amoniaco se oxida formando así los nitratos (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) compuestos que son absorbidos por las plantas e integrados a su estructura mediante el proceso de asimilación, cuando estas estructuras son consumidas por organismos heterótrofos el nitrógeno contenido en ellas es desechado por excreción en forma de compuestos nitrogenados orgánicos tales como la urea y el ácido úrico, los cuales después serán degradados a amoníaco y iones amonio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) en la etapa de amonificación. La desnitrificación que cierra el ciclo ocurre cuando microorganismos del suelo en ausencia de oxígeno emplean el que está contenido en los nitratos, liberando así el nitrógeno en su forma primaria a la atmósfera (Schlesinger, 1997; Thornton *et al.*, 2009) (Figura 1).





**Figura 1.** Ciclos de carbono y nitrógeno en ecosistema terrestres (Tomado de Thornton *et al.*, 2009).

Los compuestos orgánicos nitrogenados tienen un tiempo medio de residencia relativamente corto, además de ser compuestos extremadamente solubles, lo que los hace vulnerables al acarreo por escorrentías, además de su pérdida durante los incendios forestales, lo cual disminuye la cantidad de nitrógeno disponible en el ecosistema (Schlesinger, 1997). Es por ello que se debe poner especial atención en los patrones que siguen a la alteración de la cubierta vegetal dentro de los planes de manejo para desarrollar estrategias que disminuyan el riesgo de efectos negativos por la remoción de biomasa sobre la composición, estructura y desarrollo del bosque. Con esta finalidad los manejadores deben adecuar la intensidad y la duración de los tratamientos a emprender, buscando con esto un aprovechamiento sustentable. El estudio de los ciclos biogeoquímicos se puede realizar de manera integral, lo cual requiere el uso de muchos recursos y tiempo, como alternativa se ha optado por realizar experimentos a escalas locales y regionales que coadyuven al armado del rompecabezas a escala global (De Las Salas, 1987; Bishop y Landell-Mills, 2006).

### **3. 2. Producción de hojarasca**

Los restos vegetales depositados en el suelo forestal debido a los ciclos fenológicos, cadenas tróficas, fenómenos meteorológicos y por la influencia humana, se denominan en su conjunto hojarasca o mantillo, y se componen principalmente por hojas, fragmentos de troncos, corteza, ramillas, flores y frutos, que han caído recientemente y son fácilmente reconocibles. Una vez confinados en el piso forestal estos residuos conforman la capa más superficial del suelo dentro del horizonte O, conocida como la capa L o Aoo dependiendo de la clasificación utilizada. Se estima que esta capa constituye aproximadamente del 10 al 30% de la productividad primaria neta anual y que la cantidad promedio que se acumula en un bosque templado al año es de aproximadamente 8 toneladas por hectárea (Lavelle y Spain, 2001; Hättenschwiler, 2005).

De todas las estructuras que conforman la hojarasca, la fracción foliar constituye alrededor del 70% y representa una fuente importante de nutrimentos. Su disponibilidad en el mantillo depende principalmente de los procesos de senescencia y abscisión, como parte de la estrategia de reciclaje interno de nutrimentos durante el desarrollo de las plantas (Waring y Running, 1998). Dicho proceso también involucra a otros órganos tales como las flores y los frutos cuando estos ya no son funcionales o cuando la planta está sometida a estrés por agentes patógenos o variaciones ambientales (Waring y Schlesinger, 1985). La senescencia como tal es un proceso de envejecimiento asociado con la formación de semillas y frutos, que se diferencia de acuerdo al tejido en el que ocurre, en el caso de las hojas se denomina senescencia foliar y se lleva a cabo cuando una hoja deja de ser fotosintéticamente rentable. Todo el proceso está mediado por señales hormonales que obedecen a estímulos recibidos por las condiciones ambientales y ocasionan una cascada de reacciones que concluye con la pérdida de la integridad celular de forma irreversible (Lambers *et al.*, 1998; Taiz y Zeiger, 2006). La abscisión es el proceso que sigue a la senescencia y consiste en la pérdida programada de un órgano vegetal debida a la disolución de las paredes de

células especialmente localizadas en la planta. En el caso de las hojas ocurre en el peciolo, dichas células se distinguen por ser pequeñas, con el protoplasma más denso y paredes no lignificadas, la disolución de estas últimas esta mediada por enzimas ocasionando que las hojas caigan por su propio peso o factores ambientales tales como el viento (Adl, 2003).

Antes de que estos procesos ocurran, la planta reabsorbe y asigna parte de los nutrimentos a las hojas jóvenes y funcionales, para después dar paso a la caída de las hojas senescentes y su subsecuente integración a la fracción foliar (Taiz y Zeiger, 2006). Cabe señalar que buena parte de las hojas que componen esta fracción de la hojarasca ocurre debido a eventos meteorológicos como lluvias y ráfagas de viento, integrando así hojas con un contenido nutrimental mayor al de las hojas senescentes, enriqueciendo más a este componente del mantillo (Waring y Schlesinger, 1985).

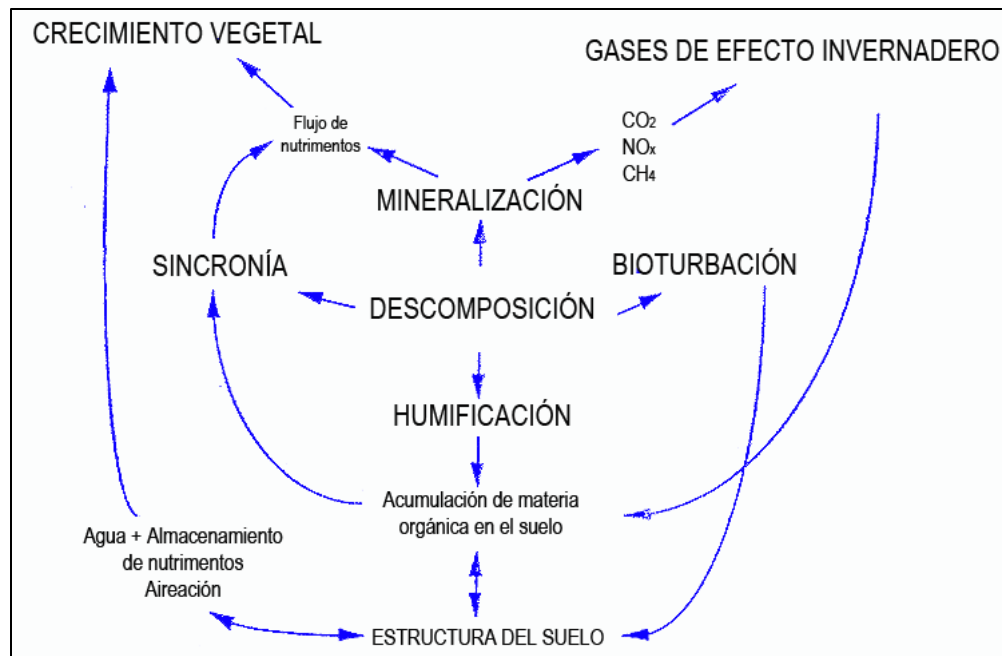
La composición química de la fracción foliar esta originalmente constituida por grasas y ceras, carbohidratos solubles en agua, hemicelulosa, celulosa, lignina, proteínas, fenoles y algunos otros compuestos vegetales secundarios (Lambers *et al.*, 1998). Esta composición determina la calidad del material como fuente de nutrimentos y sustrato para los organismos descomponedores. La mayoría de la materia orgánica contenida en la fracción foliar tiene concentraciones más bajas de nitrógeno, fosforo y carbohidratos solubles en comparación de lo encontrado en las hojas vivas, de manera contraria las concentraciones de calcio, taninos y materiales estructurales tales como celulosa y lignina pueden ser más altas en las hojas muertas (Adl, 2003). De esta manera la calidad de la hojarasca o dicho de otra manera su composición química está dada por su diversidad y su grado de descomposición, se ha observado que la hojarasca en un bosque mixto tiene mejor calidad que la recolectada en un bosque monoespecífico, esto debido a la gran variabilidad que existe entre los compuestos estructurales de una especie con respecto a otra (De Las Salas, 1987; Adl, 2003; Hättenschwiler, 2005).

En términos generales, la caída de hojarasca da inicio al reciclaje de nutrientes y elementos esenciales en el suelo del bosque, por lo que su cuantificación permite estimar de manera indirecta el flujo de los mismos, en conjunto con la medición del incremento en biomasa se puede calcular la producción primaria neta aérea, parámetro que da una idea del flujo del carbono y sus compartimentos (Schlesinger, 1997).

Con la finalidad de determinar la caída de hojarasca durante un periodo de tiempo, se ha utilizado ampliamente el método de la trampas para captar hojarasca, el cual consiste en la ubicación al azar o sistemática de colectores, los cuales varían en tamaño, material y forma de acuerdo con el tipo de vegetación y las características del terreno. El periodo de tiempo en el que se recolecta el material de las trampas depende principalmente de las condiciones climatológicas del sitio de estudio, ya que en bosques tropicales la descomposición es muy rápida y pierde calidad con el paso de los días (Bernier *et al.*, 2008; Muller-Landou y Wright, 2010; Pitman *et al.*, 2010).

### **3. 3. Descomposición de la materia orgánica**

La descomposición se ha definido por distintos autores como el proceso mediante el cual la materia orgánica se reduce progresivamente a partículas de menor tamaño hasta que las estructuras originales ya no pueden reconocerse a simple vista. Las moléculas orgánicas se mineralizan hasta los compuestos primarios, resultando H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> y otros compuestos minerales, colaborando con esto a la absorción de nutrientes por los productores primarios. Otros autores la definen como la pérdida de masa contenida en la hojarasca y en las raíces muertas, debida a la acción microbiana o al lixiviado de sustancias solubles en agua, o simplemente como la cantidad de CO<sub>2</sub> liberado por estos reservorios, todas estas definiciones hacen visible la complementariedad de la descomposición con otros procesos que ocurren en el ecosistema (Figura 2) (Waring y Schlesinger, 1985; Lavelle y Spain, 2001; Adl, 2003; Berg y Laskowsky, 2005; Berg y McClaugherty, 2008; Cotrufo *et al.*, 2009).



**Figura 2.** Relación del proceso de descomposición con otros procesos de los ecosistemas (Tomado de Lavelle y Spain, 2001).

El proceso de descomposición ocurre a través de tres etapas complementarias: lixiviado de compuestos solubles, fragmentación de tejidos muertos y el catabolismo de compuestos orgánicos o la mineralización de compuestos inorgánicos por causa de los descomponedores (Cotrufo *et al.*, 2009). Este proceso comienza con la autólisis y la desecación de los tejidos, una vez que estos han sido depositados en la superficie del piso forestal mediante el proceso de producción de hojarasca. Posteriormente entran en acción los organismos saprófitos que se alimentan de estos residuos y ocasionan la primera fragmentación de los tejidos muertos así como su reubicación al secretar y excretar los productos de su metabolismo en lugares diferentes al sitio en donde se alimentaron. Entre los consumidores más importantes se encuentran los macroartrópodos, las lombrices de tierra, los onicóforos y algunos gasterópodos (Adl, 2003). Después de la reducción del tamaño de los residuos a partir de la acción de la macro y la mesofauna, estos son colonizados por hongos y bacterias los cuales ocasionan las transformaciones químicas más importantes de la hojarasca, causando

la inmovilización o la mineralización de los compuestos, además de la síntesis de otros menos susceptibles a descomponerse los cuales conforman el humus en el proceso de humificación (Waring y Schlesinger, 1985; White, 2006).

Numerosos estudios sobre descomposición han evidenciado que, aunados al efecto de la biota sobre la degradación de los residuos vegetales, factores tales como: el clima (temperatura, precipitación y evapotranspiración), la calidad del recurso (contenido de nitrógeno, relación C:N, contenido de lignina y la relación lignina:N), los tipos de vegetación y los factores geográficos (latitud y altitud) están intrínsecamente ligados influyendo todo el proceso. Muchos de estos trabajos han postulado índices para predecir con mayor exactitud las tasas de descomposición a partir de todas las combinaciones posibles de los factores antes mencionados (Waring y Schlesinger, 1985; Heal *et al.*, 1997; Lavelle y Spain, 2001; Coleman *et al.*, 2004).

La mayoría de las tasas de descomposición son resultado de la facilidad de degradación y transformación de algunos compuestos químicos por parte de los microorganismos en interacción con las magnitudes óptimas de las variables antes mencionadas. Por ejemplo se sabe que la pérdida de masa tiene una relación directamente proporcional con el contenido de nitrógeno e inversamente proporcional con las relaciones carbono/nitrógeno y lignina/nitrógeno, o que los descomponedores actúan de manera óptima bajo condiciones de temperatura en el suelo de entre los 20 y los 35 °C y niveles de humedad cercanos a capacidad de campo. Por ello la combinación de los factores ambientales, la calidad de la hojarasca y la acción de los descomponedores regula la descomposición a través del tiempo, dando como resultado diferentes tasas de descomposición entre los distintos biomas y regiones geográficas (Waring y Running, 1998; White, 2006; Cotrufo *et al.*, 2009).

Existe hoy en día una extensa base de datos sobre descomposición para ecosistemas con distintos regímenes de humedad, temperatura, elevaciones y latitudes, realizados a varias escalas. En la gran mayoría de ellos se ha utilizado el método para evaluar la

pérdida de masa, y que básicamente consiste en el confinamiento en campo de bolsas de malla (“litter bags”) con una cantidad conocida de hojarasca y su evolución a distintos intervalos de tiempo. Dicho método busca evitar la pérdida de material durante la evaluación y la retención de humedad que pueda aumentar la descomposición. Sin embargo este método ha sido objeto de debate debido a que se reducen o se excluyen los efectos causados por la acción de la macrofauna y se pueden alterar las características físicas del material que se evalúa. Por esta razón se han probado diferentes métodos entre ellos la simulación del proceso bajo condiciones de laboratorio y la medición de la respiración microbiana a partir de la liberación de CO<sub>2</sub>. Con estos métodos se han obtenido buenos resultados aunque siguen sin abarcarse todas las variables del proceso debido a la complejidad de las interacciones entre ellas (Zhang *et al.*, 2008; Cotrufo *et al.*, 2009).

Como resultado de estos experimentos se han obtenido curvas de descomposición en donde se aprecia un comportamiento asintótico. Esto ha permitido la observación de dos fases en la pérdida de masa, la primera fase está relacionada con la degradación de los compuestos químicos del sustrato, en donde los carbohidratos, principales constituyentes de las células vegetales representados por las azúcares y los almidones, son los primeros en degradarse (Adl, 2003). Mientras que los componentes estructurales como la celulosa y la hemicelulosa presentan mayor resistencia a la degradación siendo reducidos en una segunda fase. Los factores ambientales también se ven representados en estas curvas al observarse un mayor decaimiento en estaciones calurosas y húmedas en contraste con lo obtenido en invierno. A pesar del efecto de la variación estacional en general se utiliza el modelo simple exponencial para representar el comportamiento de las tasas de descomposición (Coleman *et al.*, 2004).

A partir de este enfoque diversos autores sugieren que la descomposición anual podría ser igual a la entrada anual de materia orgánica (MO) muerta en un bosque que teóricamente permanece en estado estacionario. Bajo estas condiciones asumiendo el

modelo simple exponencial, la constante de descomposición ( $k$ ) se puede calcular a partir de la siguiente ecuación (Lavelle y Spain, 2001):

$$k = \frac{\text{Entrada anual de MO}}{\text{Promedio anual de MO acumulada}}$$

Donde  $k$  es el porcentaje de hojarasca descompuesta anualmente. De esta manera, el tiempo para que una proporción dada de los residuos se descomponga se calcula a partir de:

$$X/X_0 = e^{-kt}$$

Donde  $X/X_0$  es la proporción del recurso que se descompone en un periodo de tiempo ( $t$ ) con una tasa de descomposición  $k$ .

### **3. 4. Aprovechamiento y manejo de los bosques**

El bosque ha sido aprovechado por el hombre como fuente de productos y servicios, dentro de los primeros se pueden mencionar a aquellos bienes tangibles, como son madera, exudados, extractos, fibras, frutos y plantas medicinales. De todos ellos el más destacado es la madera ya que ha acompañado al hombre a lo largo de su historia tanto como herramienta, insumo para la construcción o combustible. Siendo la extracción de madera uno de los factores más influyentes en la alteración de la estructura y los procesos de los bosques. Dichos cambios se ven reflejados también en los beneficios indirectos o intangibles del bosque que son denominados servicios ambientales, dentro de los cuales se encuentran la protección de cuencas hidrológicas, la conservación de la biodiversidad, la belleza escénica, la recreación y la captura de carbono (FAO, 2012).



Con el crecimiento de la demanda por recursos forestales se han diseñado planes de manejo adecuados, con distintas modalidades que dependen principalmente del tipo de bosque y los productos que se quieren aprovechar, pero de manera general se buscan buenos rendimientos y la sustentabilidad del sitio. Nyland (2002) menciona cuatro etapas básicas dentro del manejo de un bosque, estas son: la regeneración, el manejo de la competencia inter e intraespecífica, el control del crecimiento y la calidad, y por último la cosecha o corta de regeneración. El mismo autor menciona que en aras de un manejo sustentable se hace uso de las estrategias de las especies competidoras utilizadas en la regeneración posterior a un disturbio para adecuar los planes a las adaptaciones mostradas por las comunidades y obtener ventajas a partir de ellas (Nyland, 2002).

El impacto causado por las prácticas de manejo, tal y como ocurre con eventos de disturbio, se transmite a todos los componentes del ecosistema y es asimilado de diferentes formas, al mismo tiempo se ven afectados los procesos y ciclos que regulan y mantienen a dicho ecosistema. Es por esto que durante el diseño del plan de manejo se deben tomar en cuenta: el mantenimiento de la salud y productividad de las especies, la estabilidad y nutrición del suelo, los efectos de la alteración del paisaje sobre el ciclo hidrológico y la disponibilidad de nichos para las especies endémicas, además de tratar de cumplir con las metas deseadas por los dueños. Esperando obtener al final la conformación de un plan de manejo que resulte económicamente viable, ecológicamente apropiado, financieramente razonable, además de política, legal y socialmente aceptable (Nyland, 2002).

En México existen ciertas problemáticas a considerar durante la planeación forestal como son: la tenencia de la tierra, la organización comunitaria y la falta de información en las comunidades que habitan y se benefician directamente de los bosques. Todo esto en conjunto hace necesario un enfoque multidisciplinario para desarrollar planes de manejo que cubran también estas necesidades, de lo contrario el deterioro a los recursos seguirá creciendo (Merino y Segura, 2002).

De acuerdo con cifras de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) (2012), la producción maderable en nuestro país ha tenido altibajos desde el año 2002 al 2011 con una tendencia a la baja (de 6.7 a 5.5 millones m<sup>3</sup>rollo), lo que se refleja en una escasa participación en el mercado internacional. Los principales problemas que enfrenta la industria forestal en México tienen que ver con el elevado nivel de protección arancelaria que se tuvo hasta la apertura comercial en 1986, además de la inseguridad y el alto costo de las materias primas forestales. Así mismo la desvinculación entre la producción y la transformación industrial, no ha permitido un desarrollo balanceado entre los dos subsectores, sumándose a todo esto que es inadecuada la localización de las industrias y obsoleto su equipamiento.

Según lo reportado por la misma CONAFOR para el 2011 los bosques de pino (76.3 %) y encino (9.5 %) participaban en conjunto con un 85.8 % de la producción maderable nacional equivalente a 4, 718, 838 metros<sup>3</sup> rollo, por lo que resulta muy importante el estudio de este tipo de bosques.

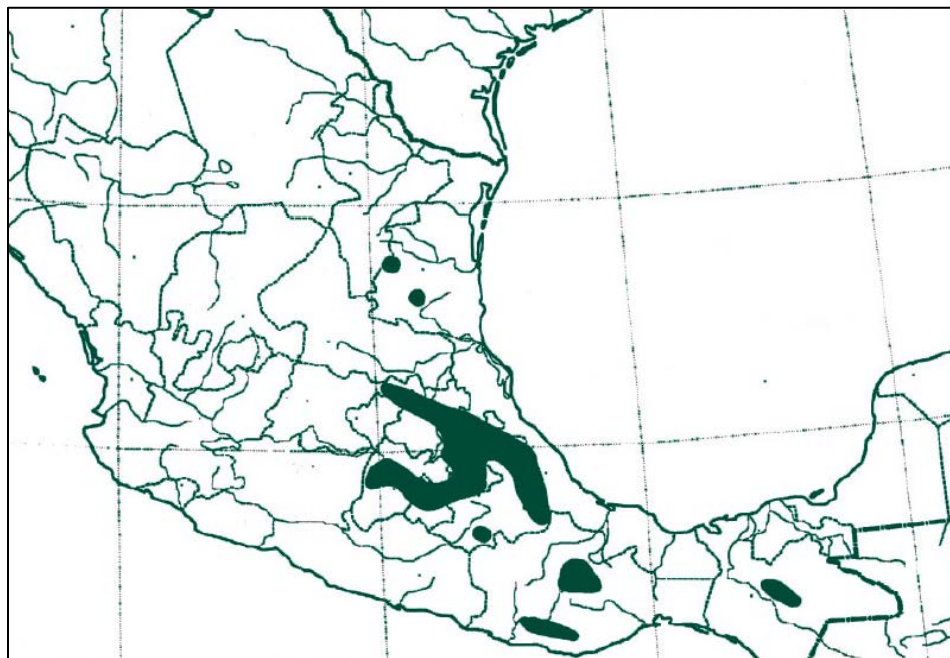
### **3. 5. Importancia de los bosques de *Pinus patula***

México es centro de diversidad del género *Pinus* al contar con 46 especies, 6 subespecies y 22 variedades, de estos taxa el 55 % son endémicos (Sánchez-González, 2008). Las especies de este género tienen gran importancia económica, cultural y ecológica; a pesar de ello su cobertura en el país ha disminuido de manera alarmante por la influencia de la actividad humana, las malas prácticas de manejo y una alta incidencia de incendios forestales (Sáenz-Romero *et al.*, 2003).

*Pinus patula* es una de las especies con mayor potencial económico para las zonas donde se establece debido a su velocidad de crecimiento lo que la convierte en una especie muy apreciada en plantaciones forestales. De acuerdo con las características

de su madera, esta se utiliza principalmente para fabricar cajas, postes, pilotes y puntales y para obtener su pulpa (Vela-Gálvez, 1980).

La distribución natural de esta especie está restringida a una franja ubicada principalmente sobre la Sierra Madre Oriental y que se orienta de noroeste a sureste, atravesando las porciones orientales de los estados de Hidalgo y Puebla, al oeste de Veracruz, al noreste de Oaxaca y una pequeña porción del estado de Tlaxcala, además de manchones aislados ubicados en los estados de Querétaro, México, Chiapas y Tamaulipas (Figura 3).



**Figura 3.** Área de distribución natural de *Pinus patula* Schlttdl. & Cham. (Fuente: Comisión Nacional Forestal, 2010).

Debido a la rapidez con la que esta especie crece y además de ser una especie pionera en sitios impactados por incendios, se ha propiciado su plantación extensiva tanto con fines de producción maderable como de uso ornamental y en proyectos de agroforestería fuera de su área de distribución natural a través de los trópicos y zonas templadas desde la década de 1940. Los países donde ha sido plantada incluyen el sur

de África, la India, América del Sur y Australia (Vela-Gálvez, 1980; Gillespie, 2000; Kanzler, 2002).

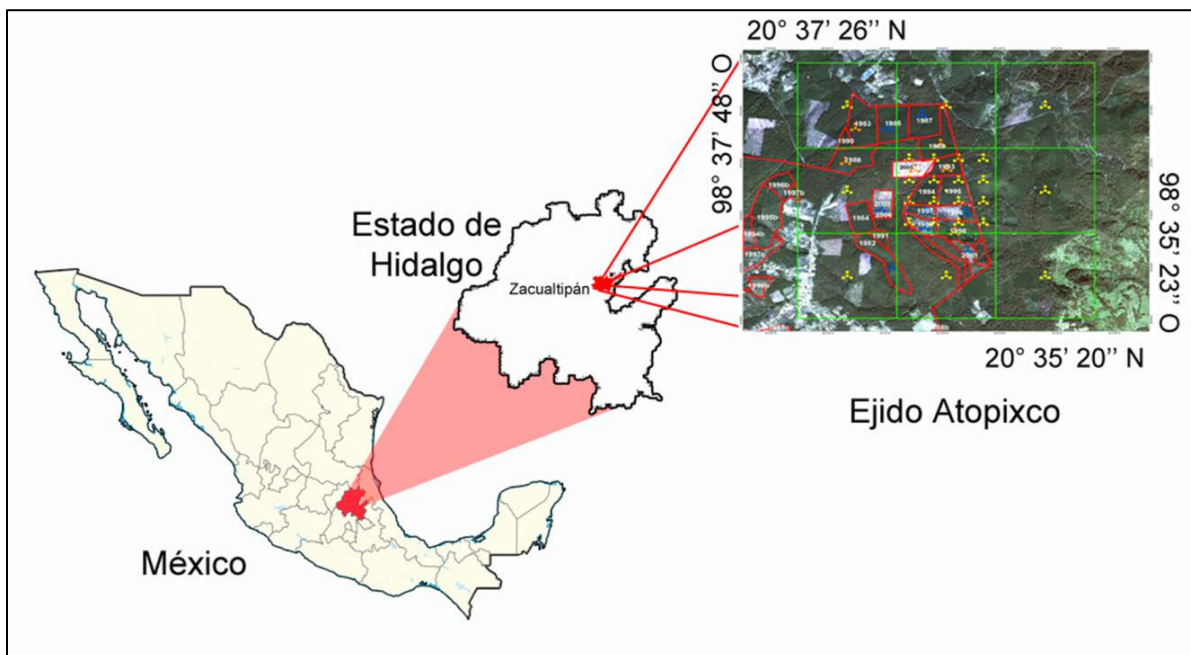
Esta especie crece en sitios con altitudes que van desde los 1400 hasta los 3300 msnm, y que cuentan con climas templados húmedos donde la precipitación se encuentra entre el rango de los 1000 a los 2200 mm. En el área de su distribución natural los requerimientos de humedad se ven aumentados por la acción de los bancos de niebla. Esta especie suele estar asociada en la ladera interior de la Sierra Madre Oriental con bosques de *Quercus* spp. mientras que en la ladera barlovento se asocia con *Liquidambar styraciflua* (Farjon y Styles, 1997). De acuerdo con la bibliografía entre las especies con las que se asocia en el estrato arbóreo se encuentran: *Pinus teocote*, *P. greggii*, *P. pseudostrobus*, *Quercus crassifolia*, *Q. eduardi*, *Q. furfurácea*, *Q. polymorpha*, *Q. crassipes*, *Q. microphylla*, *Q. rugulosa*, *Q. rugosa*, *Arbutus glandulosa* y *Alnus arguta* (Puig, 1991).

En relación a aspectos estrictamente comerciales y con base en lo reportado por la CONAFOR (2011) en el Estado de Hidalgo se produjeron 80,944 m<sup>3</sup> r de madera de diferentes especies de pino (*P. patula*, *P. teocote*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. rudis*, *P. pseudostrobus* y *P. ayacahuite*), esta cifra sitúa a la entidad por debajo de los principales estados productores. En cuanto a la producción en el Municipio de Zacualtipán CONAFOR reportó 10,8 m<sup>3</sup> r de madera de pino, 2985.7 m<sup>3</sup> r de encino y 237.3 m<sup>3</sup> r de otras especies. La mayoría de los sitios donde se aprovecha esta especie en este estado son de posesiones ejidales.

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4. 1. Ubicación del sitio de estudio

El presente trabajo se desarrolló en un bosque localizado en el municipio de Zacualtipán de Ángeles, en la Sierra Alta de Hidalgo dentro del Ejido Atopixco ubicado al Este del municipio, y cuyas coordenadas geográficas extremas son  $20^{\circ} 37' 26''$  N y  $98^{\circ} 37' 48''$  W, y  $20^{\circ} 35' 20''$  N y  $98^{\circ} 35' 23''$  W. La altitud media del ejido se ubica en los 2040 m y su superficie total está estimada en las 1191.8 hectáreas (Cruz-Leyva *et al.*, 2010; Servicio Geológico Mexicano, 2011) (Figura 4).

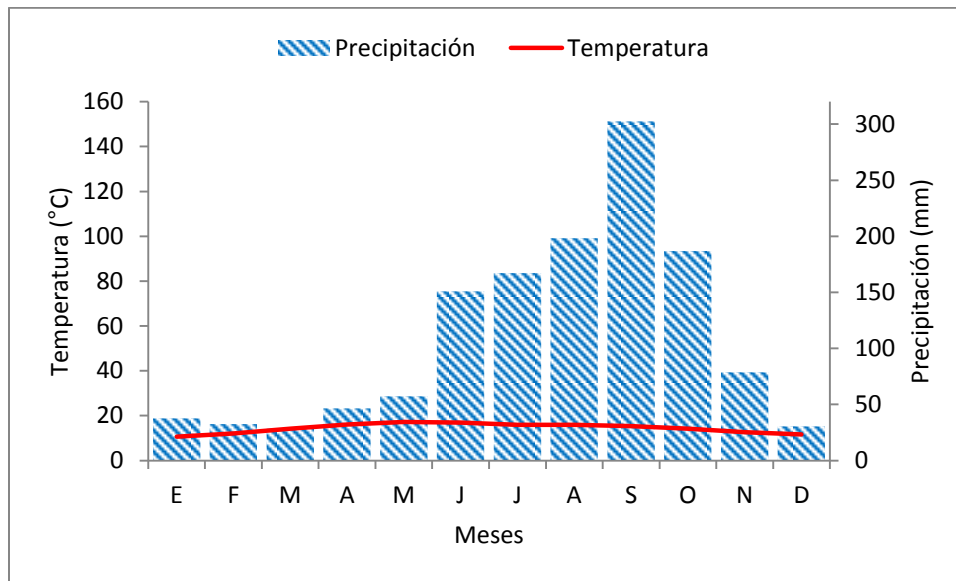


**Figura 4.** Ubicación del ejido Atopixco, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México, y conformación de los sitios de estudio.

La región donde se realizó el estudio se ubica en la provincia fisiográfica Sierra Madre Oriental y Subprovincia Sierra de Zacualtipán en la vertiente del Golfo caracterizada por un conjunto de sierras menores de estratos plegados, originados por antiguas rocas

sedimentarias entre las que predominan las calizas. Una parte del municipio de Zacualtipán está ubicada, dadas sus características geomorfológicas, dentro de la provincia Eje Neovolcánico Transversal, la cual presenta rocas volcánicas, derrames de lava y otras manifestaciones ígneas de la era Cenozoica. Los tipos de roca predominantes son: arenisca-conglomerado, basalto, caliza, caliza-lutita, lutita-arenisca y toba ácida. Los tipos de suelos reportados para el ejido de acuerdo a la clasificación FAO-UNESCO son: acrisol órtico (Ao), luvisol crómico (Lc) y feozem háplico (Hh) (Asociación de Productores Forestales de la Región de Zacualtipán Molango, 2011; Vázquez-Ibáñez, 2011).

De acuerdo a la clasificación climática de Köpen modificada por García (1990), los climas de la zona se clasifican dentro de los tipos C(w2), C(m) y C(f) que son templados lluviosos con lluvias en verano y otoño con un invierno seco, los registros del Servicio Meteorológico Nacional indican que la temperatura media se ubica en el orden de los 13.7 °C, con una máxima de 25.9 °C y una mínima de 2.9 °C, mientras que la precipitación media anual es de 1256.3 mm presentándose los meses más lluviosos de junio a octubre (Figura 5) (González-Medrano, 2003).



**Figura 5.** Climograma ombrotérmico de Gausсен obtenido a partir de las normales climatológicas de 1981-2010 registradas por el SMN, para el municipio de Zacualtipán de Ángeles.

La vegetación en esta zona de acuerdo con Puig (1991) es la que caracteriza a los bosques de pino encino, asociación vegetal que cubre una franja discontinua que va del sureste al noreste de la Sierra Madre Oriental y atraviesa el municipio de Zacualtipán, el estrato arbóreo es el dominante con una altura de 15 a 30 m sin grandes aperturas en el dosel, mientras que el estrato arbustivo es denso y el estrato herbáceo muestra una notable diversidad de especies.

Este estudio se desarrolló en un área perteneciente a la “Unidad de Manejo Forestal 1302 Zacualtipán-Molango”, y en lo particular en el ejido Atopixco donde el aprovechamiento forestal comercial es la actividad principal. La asociación ejidal está conformada por 89 miembros quienes administran la producción maderable en este bosque, la cual se ha realizado sobre 820.5 hectáreas por más de 29 años, el sistema de planeación forestal aplicado es el Método de Desarrollo Silvícola y debido a las buenas prácticas en su aplicación el ejido Atopixco ha recibido dos distinciones a lo largo de su historia, el Premio al Mérito Nacional Forestal en 1990 y en 2012 recibió el Certificado de Manejo Sustentable de los Bosques por parte de la Asociación de

Normalización y Certificación, debido al cumplimiento de los principios y los criterios establecidos en la norma NMX-AA-143-SCFI-2008. El ejido cuenta con un programa de manejo forestal maderable donde la especie principal es *Pinus patula* con un ciclo de corta de 10 y un turno de 40 años mediante el método de regeneración con árboles padre (Asociación de Productores Forestales de la Región de Zacualtipán Molango, 2011).

De acuerdo con el Plan de Manejo y demás trabajos revisados las especies que conforman el estrato arbóreo en el bosque del Ejido Atopixco son: *Pinus patula*, *P. teocote*, *Quercus lancifolia*, *Q. laurina*, *Q. castanea*, *Q. obtusata*, *Q. crassipes*, *Q. rugosa*, *Alnus* spp., *Cornus disciflora*, *Clethra alcoceri*, *Crataegus pubescens*, *Viburnum* sp., *Prunus serotina* y *Arbutus xalapensis*. Mientras que el estrato arbustivo está caracterizado por la presencia de las siguientes especies: *Vaccinium leucanthum*, *Buddleia cordata*, *Befaria glauca* y *Litsea glaucescens* (Ángeles-Pérez, 1995; Cruz-Ruíz, 2004; Cruz-Leyva, 2008).

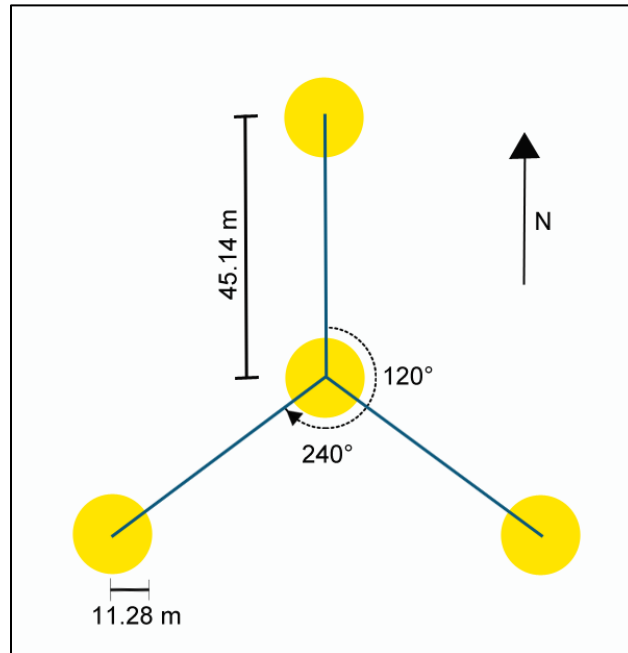
#### **4. 2. Establecimiento de los experimentos**

##### **4. 2. 1. Selección de rodales y establecimiento de sitios**

Se seleccionaron 3 rodales con diferente edad de aprovechamiento 24 (1988), 14 (1998) y 4 (2008) años, además de un fragmento de bosque sin manejo (BSM). En cada rodal se estableció una parcela experimental para evaluar la descomposición de acículas de *Pinus patula* y estimar la producción de hojarasca fina. En cada una de las parcelas se delimitaron 4 sitios de 400 m<sup>2</sup> colocados en un arreglo de “Y” invertida similar a la de los conglomerados utilizados por el Inventario Nacional Forestal y de Suelos de la Comisión Nacional Forestal. Dicha conformación se adoptó asumiendo la homogeneidad de los rodales. Los sitios se enumeraron a partir del sitio central en la “Y”, ubicando el segundo 45.14 m al norte, el tercero a la misma distancia del centro



pero en un azimut de  $120^\circ$  y por último el cuarto a la misma distancia pero con un azimut de  $240^\circ$  (Comisión Nacional Forestal, 2011) (Figura 6).



**Figura 6.** Conformación de los sitios dentro de las parcelas experimentales.

#### **4. 2. 2. Variables climatológicas**

Para obtener las variables climatológicas durante el transcurso de los experimentos se recurrió a los registros de la Estación Agroclimatológica del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias ubicada en Zacualtipán de Ángeles. Así mismo se colocaron registradores de temperatura en el suelo marca HOBO U10 Temp Onset© de noviembre de 2012 a junio de 2013.

#### **4. 2. 3. Producción de hojarasca**

Para estimar la cantidad de hojarasca fina que ingresó a los sitios de estudio se colocaron trampas colectoras circulares en forma de embudo, construidas de malla fina

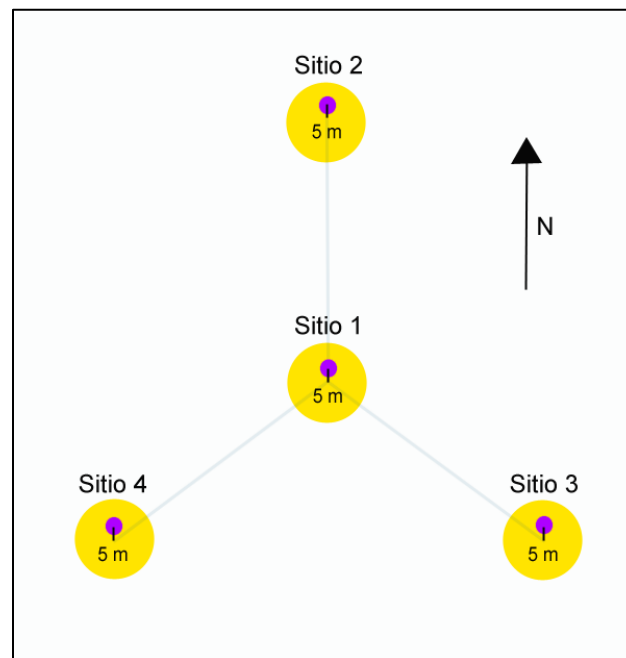
con un diámetro de 80 cm (0.5 m<sup>2</sup> de superficie de colecta), fabricadas con poliducto flexible de media pulgada y tubos de PVC en la base. Las trampas tenían una altura aproximada de 75 cm para evitar la acumulación de agua, la pérdida de material por influencia del viento y así mismo evitar la entrada de hojarasca proveniente de herbáceas (Figura 7) (Robertson *et al.*, 1999; Berg y Laskowski, 2005; Ramírez-Correa *et al.*, 2007; Zapata-Duque *et al.*, 2007).



**Figura 7.** Trampa colectora de hojarasca.

Las trampas se ubicaron aproximadamente 5 metros al norte del centro de cada uno de los cuatro sitios en cada una de las parcelas por edad (Figura 8). El material capturado se recogió cada mes a partir de julio de 2012 y durante el año que duró el experimento (junio de 2013). El material colectado se colocó en bolsas de papel para evitar su descomposición durante el traslado, solo se recolectaron ramillas con un diámetro menor a 2 cm y con una extensión que les permitiera entrar completamente en las trampas ya que el trabajo solo consideró la hojarasca fina. La hojarasca colectada se llevó al laboratorio del Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados para su posterior secado en una estufa de circulación forzada a 70 °C (marca Shel Lab

FX14™). Una vez que la hojarasca alcanzó el peso constante (aproximadamente 72 horas), se procedió a separar sus componentes en acículas de *Pinus patula* y hojas de *Quercus* spp., debido a que estas fueron las especies dominantes en el bosque sin manejo. Por otro lado, se separaron las hojas de otras especies de latifoliadas, fragmentos leñosos (ramillas y trozos de corteza) y misceláneos (estructuras reproductivas, epífitas, restos de animales y fragmentos sin identificar). Posteriormente se determinó el peso seco de todos los componentes por separado en una balanza analítica marca AND GR-120 con una precisión de 0.0001 gramos (Figura 9) (Gutiérrez-Vázquez *et al.*, 2012).



**Figura 8.** Conformación de trampas colectoras para evaluar la producción de hojarasca.



**Figura 9.** Separación de estructuras vegetales constituyentes de la hojarasca.

A partir de los pesos obtenidos en el laboratorio se cuantificó la caída de hojarasca mensual y anual en cada uno de los sitios, con estos datos se determinó el aporte total y por componente.

#### **4. 2. 3. 1. Análisis de datos**

Para determinar diferencias en la producción de hojarasca total y sus componentes entre los rodales se efectuaron análisis de varianza mediante pruebas paramétricas y no paramétricas dependiendo de la distribución de los datos. Además se realizaron análisis de correlación para comprobar las posibles relaciones entre la caída de hojarasca y variables climatológicas registradas durante los 365 días del experimento en campo (precipitación total, velocidad del viento y temperatura media). Todos los tratamientos estadísticos se realizaron con el software SigmaPlot 12™.

#### 4. 2. 4. Descomposición de acículas

Con la finalidad de cuantificar el proceso de descomposición de acículas de *Pinus patula*, se utilizó el método indirecto de las bolsas de malla para evaluar la pérdida de masa durante los 365 días del experimento. Las acículas de pino utilizadas para el llenado de las bolsas se obtuvieron en el mes de abril del 2012 en los cuatro rodales seleccionados. Dichas acículas se tomaron cuidadosamente de la capa más superficial de la hojarasca depositada en el piso forestal de acuerdo a lo recomendado por Hirobe *et al.* (2004) y Sánchez-Solís (2010) (Figura 10).



**Figura 10.** Recolección de acículas de *Pinus patula* Schltl. & Cham. para el experimento de descomposición.

Las acículas recolectadas se trasladaron al laboratorio del Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados en donde se secaron a temperatura ambiente en un cuarto cerrado durante 6 semanas para homogenizar su contenido de humedad antes de la evaluación en campo. Una vez transcurrido este tiempo se tomaron muestras con un peso de 10 gramos determinados con una balanza Ohaus Adventurer

Pro AV3102™ con precisión de 0.01 g. Estas muestras se introdujeron en bolsas cuadradas fabricadas con malla de polietileno tipo mosquitero color negro, con una medida aproximada de 30 x 30 cm y una luz de 1 x 1.5 mm, los bordes fueron cocidos con bies de poliéster color negro de 3 cm para evitar la apertura y deformación de la malla. Una vez llenadas las bolsas se sellaron con grapas de acero inoxidable (Figuras 11 y 12).



**Figura 11.** Pesaje de muestra para llenado de bolsa.



**Figura 12.** Aspecto de bolsa de malla, para evaluar descomposición de acículas.

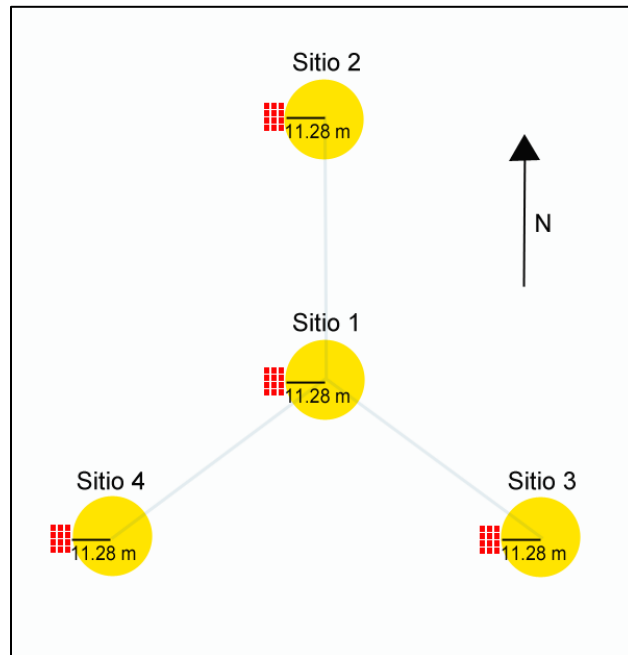
Al inicio del experimento se determinó el peso seco de las acículas de cada anualidad para registrar el peso inicial. Con este fin se tomaron 4 muestras de acículas de cada rodal con un peso fresco de 10 gramos y se colocaron en bolsas de papel para posteriormente introducirse en una estufa de circulación forzada marca Shel Lab FX14™, donde se mantuvieron a 70 °C hasta obtener su peso seco. El registro del peso inicial fue de suma importancia debido a que sería el referente para la evaluación de la masa remanente después de la recuperación de las bolsas incubadas en el campo (Bocock y Gilbert, 1957) (Figura 13).



**Figura 13.** Secado de muestras vegetales en estufa de circulación forzada.

El establecimiento de los lotes de descomposición consistió en la colocación de seis bolsas llenas con 10 g de acículas y seis bolsas vacías para evaluar el error por acarreo mecánico de material al interior de las mismas durante la fase de incubación en campo. Estos lotes conformados por 12 bolsas en total, se colocaron en un arreglo rectangular de 3 x 4 y se ubicaron en cada uno de los 4 sitios por anualidad, situados aproximadamente a 11.28 metros preferentemente al oeste del centro de cada sitio (Figura 14).





**Figura 14.** Conformación de los lotes de descomposición en los sitios de estudio.

La disposición de las bolsas en los lotes se realizó de manera aleatoria. Con la finalidad de que las acículas tuvieran una distribución adecuada además de mantenerse en contacto con la capa más superficial de la hojarasca, las bolsas se fijaron al suelo con clavos de acero en cada esquina para evitar su movimiento debido al viento o al crecimiento de hongos y hierbas (Figura 15).



**Figura 15.** Aspecto de un lote para evaluar la descomposición de acículas.

Las bolsas que contenían las acículas se recuperaron del campo después de transcurridos 1, 2, 4, 6, 9 y 12 meses a partir de junio del 2012 (Cuadro 1). Las recolecciones se efectuaron los días 22 de cada mes establecido y dichas muestras se trasladaron al laboratorio en bolsas de papel previamente etiquetadas para evitar su confusión y así mismo impedir la descomposición durante el transporte. En el laboratorio se procedió a la determinación del peso seco de las muestras con el mismo procedimiento utilizado en la evaluación del peso inicial (Robertson *et al.*, 1999).

**Cuadro 1.** Fechas de recuperación y tiempo de incubación de las bolsas de malla en cuatro rodales con diferentes edades en el ejido Atopixco, Zacualtipán. Hidalgo.

<b>Año</b>	<b>Día</b>	<b>Mes</b>	<b>Días acumulados</b>
2012	22	Junio	0
	22	Julio	30
	21	Agosto	63
	22	Octubre	122
	22	Diciembre	183
2013	22	Marzo	273
	22	Junio	365

Con los pesos computados en el laboratorio se evaluó la pérdida de masa a partir del peso inicial y se estimaron de manera indirecta las tasas anuales de descomposición ( $k$ ) mediante el modelo propuesto por Jenny *et al.* (1949) y retomado por Olson (1963), un modelo de decaimiento exponencial simple negativo cuya fórmula es:

$$K = -[\ln\left(\frac{X_t}{X_0}\right)]/t$$

Dónde:

$X_t$  = peso seco de las acículas en un tiempo dado.

$X_0$  = peso seco de las acículas al inicio del experimento.

$t$  = tiempo transcurrido (días)

Así mismo se proyectaron los tiempos necesarios para la descomposición del 50 y el 99 % de las acículas en cada rodal, a partir de las formulas propuestas por el mismo autor, mediante el uso de constantes obtenidas en un bosque en estado estacionario teórico y las tasas de descomposición anuales ( $k$ ). Dichas ecuaciones se muestran a continuación:

$$t_{50\%} = 0.6931/k$$

$$t_{99\%} = 5/k$$

#### **4. 2. 4. 1. Análisis de datos**

Para detectar las posibles diferencias entre el porcentaje de masa remanente, con respecto a los cuatro rodales y al tiempo de incubación se efectuaron ANOVAS de un factor o la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis dependiendo de la distribución de los datos analizados a los cuales se le aplicó previamente el test de normalidad de Shapiro-Wilk (López-López *et al.*, 2013).

También se realizaron análisis de correlación para cuantificar las posibles relaciones entre el peso restante y el tiempo de incubación en los cuatro sitios, así como entre las tasas de descomposición y algunas variables climatológicas registradas en el sitio durante el año de incubación (temperatura media, radiación global, humedad relativa y evapotranspiración potencial). Dichas variables se eligieron al ser las más referidas en diversos trabajos sobre este tema. Todos los análisis estadísticos se realizaron con el software SigmaPlot 12™. (García-Plé *et al.*, 1990; Álvarez-Sánchez y Becerra-Enríquez, 1996; Berg y Laskowsky, 2005; Zhang *et al.*, 2008).

#### **4. 2. 5. Contenido de nitrógeno y carbono**

Para estimar la dinámica del carbono y el nitrógeno en los experimentos de producción y descomposición de hojarasca fina, se realizaron análisis químicos a las muestras recolectadas en campo antes y después de los experimentos. Una vez terminada la fase de estimación de pesos en el experimento de producción de hojarasca se pulverizó todo el material en un molino de aspas marca Pulvex Mini 100™ en el Laboratorio del Postgrado en Ciencias Forestales. En el Laboratorio de Fertilidad de Suelos del Programa de Edafología del Colegio de Postgraduados se llevaron a cabo todos los análisis químicos.

Para la determinación de carbono en todo el material vegetal ingresado al laboratorio se tomaron muestras de 0.05 g las cuales se depositaron en un crisol de porcelana diseñado especialmente para el análisis del contenido de carbono en muestras vegetales y suelos por medio del principio de combustión seca. En este método se somete la muestra a temperaturas extremas (900 °C) para lograr la reacción de todo el carbono con oxígeno y obtener dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el cual es enfriado posteriormente y trasladado a un compartimento detector dotado por un espectrofotómetro infrarrojo no dispersivo para su medición. Todo el procedimiento se llevó a cabo en un analizador de carbono orgánico total (TOC) marca Shimadzu 5050 A™ (Shimadzu Co., 1997).

En cuanto a la determinación del contenido de nitrógeno se utilizó el método semi micro Kjeldahl modificado para incluir nitratos. Este procedimiento consiste en la medición de nitrógeno total contenida en una muestra vegetal de 0.1 g mediante la digestión acida, la cual transforma el nitrógeno orgánico en nitrógeno mineral por la acción del ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado. La digestión consiste en el calentamiento de la mezcla de la muestra vegetal más el  $H_2SO_4$  y otros compuestos catalizadores a una temperatura de 360-380 °C en una plancha de digestión. La mezcla resultante pasa por un tren de destilación durante el cual se logra su alcalinización mediante la adición de ácido bórico ( $H_3BO_3$ ), indicadores e hidróxido de sodio (NaOH), después se cuantifica el contenido de nitrógeno amoniacal por medio de una titulación con  $H_2SO_4$  0.01 N (Bremmer, 1975).

A partir de los resultados de laboratorio se compararon las proporciones de C y N, así como el cociente de ambas mediante un análisis de varianza para detectar posibles diferencias entre los sitios y a través del tiempo. Cabe señalar que en algunos casos no se obtuvo suficiente material para las pruebas de laboratorio, por lo que se tomó la decisión de analizar algunas muestras compuestas respetando siempre el tipo de estructuras y las fechas de colecta. La mezcla de las muestras insuficientes se organizó en tres grupos de acuerdo con las intensidades de precipitación fluvial observados durante los 365 días del experimento en campo. Los grupos resultantes fueron: meses con menor precipitación (enero a abril), meses con mayor precipitación (mayo a agosto) y meses con precipitación moderada (septiembre a diciembre). En algunos casos, sobre todo en las muestras recolectadas en el rodal cosechado en 2008 se mezcló todo el material capturado a lo largo del año, manteniendo la identidad de las estructuras, esto debido a que hubo meses en que no se registró ingreso de material en las trampas (Figura 16).



**Figura 16.** Molienda de material vegetal para análisis químicos.

Por otra parte las muestras obtenidas durante el experimento de descomposición de acículas siguieron el mismo proceso de molienda después de que se determinó el peso seco del material remanente en las bolsas recuperadas de los 4 rodales.

A partir de los resultados del análisis en laboratorio se calcularon las tasas de flujo o retorno de C y N ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) mediante la multiplicación de sus contenidos expresados en porcentajes por la cantidad total de material colectado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

$$\text{Tasa de retorno} = (\% \text{ del elemento en la muestra})(\text{Cantidad total de hojarasca})$$

#### **4. 2. 5. 1. Análisis de datos**

En cuanto al análisis estadístico los porcentajes de C y N, así como los cocientes C:N fueron agrupados nuevamente en función de su disponibilidad en las tres categorías antes mencionadas para realizar un contraste correcto mediante ANOVAS de un factor.

Previamente los porcentajes se transformaron a arco seno para normalizarlos. Todos los análisis se realizaron con el software SigmaPlot 12™.

#### **4. 2. 6. Estructura y diversidad de los rodales estudiados**

De forma complementaria a los experimentos de producción y descomposición se realizó un inventario forestal en todos los rodales estudiados. Dicho inventario se llevó a cabo durante el mes de agosto del 2013, una vez concluida la fase de campo de los dos experimentos. Se obtuvieron variables tales como el número de especies, la altura total, el diámetro normal y el diámetro de copa. Con la obtención de las variables dasométricas se caracterizaron los sitios mediante la utilización de algunos índices estructurales y de diversidad de especies.

Los índices estructurales determinados fueron el índice de valor de importancia (IVI) y el índice de valor forestal (IVF) para cada especie, mientras que los índices de diversidad de especies (diversidad Alfa) que se determinaron para cada sitio fueron el índice de riqueza de Margalef, el de diversidad de Shannon-Wiener, el de dominancia de Simpson y el de equidad de Pielou. Se eligieron estos índices debido a que a partir de ellos se puede obtener una mejor caracterización de los rodales estudiados con base en la revisión de diversos trabajos (Congdon y Herbhon, 1993; Aguirre-Calderón, 2002; Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008; Del Río *et al.*, 2003; Salas *et al.*, 2009; Lozada-Dávila, 2010; Zarco-Espinosa *et al.*, 2010).

Se utilizaron dos índices de valoración estructural cuyas fórmulas se describen a continuación:

$$\acute{I}VI = DoR + DeR + FR$$

Dónde:

$\acute{I}VI$ = Índice de valor de importancia de Curtis & McIntosh.

*DoR*= Dominancia absoluta de la especie entre la dominancia absoluta de todas las especies por 100.

*DeR*= Densidad absoluta de cada especie entre la densidad absoluta de todas las especies por 100.

*FR*= Frecuencia absoluta por cada especie entre la frecuencia absoluta de todas las especies por 100.

$$\acute{I}VF = DiR + AR + CR$$

Dónde:

*ÍVF*= Índice de valor forestal.

*DiR*= Diámetro absoluto de cada especie entre diámetro absoluto de todas las especies por 100.

*AR*= Altura relativa de cada especie entre altura relativa de todas las especies por 100.

*CR*= Cobertura absoluta de cada especie entre cobertura absoluta de todas la es especies por 100.

Por otra parte las fórmulas de los índices utilizados para conocer la diversidad ( $\alpha$ ) se muestran a continuación:

$$D_{Mg} = \frac{S - 1}{\ln N}$$

Dónde:

$D_{Mg}$ = Índice de diversidad de Margalef.

$S$ = Número de especies.

$N$ = Número total de individuos.

$$H' = \sum_{i=1}^S Pi \ln(Pi)$$



Dónde:

H' = Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

S = Número de especies.

Pi = Proporción de individuos de la especie i.

$$D_{Sp} = \frac{1}{\sum \frac{ni (ni - 1)}{N (N - 1)}}$$

Dónde:

D<sub>Sp</sub> = Índice de dominancia de Simpson.

ni = Número de individuos en la iésima especie.

N = Número total de individuos.

$$J' = \frac{H'}{\ln (S)}$$

Dónde:

J' = Índice de equidad de Pielou.

H' = Índice de diversidad de Shannon-Wiener.

S = Número total de especies.

#### **4. 2. 6. 1. Análisis de datos**

Con los datos del inventario se llevaron a cabo análisis de varianza de un factor entre las principales variables dasométricas de los cuatro rodales evaluados. A partir de los índices estructurales obtenidos se construyeron tablas correspondientes para verificar la participación de cada especie dentro de la conformación de los cuatro rodales.

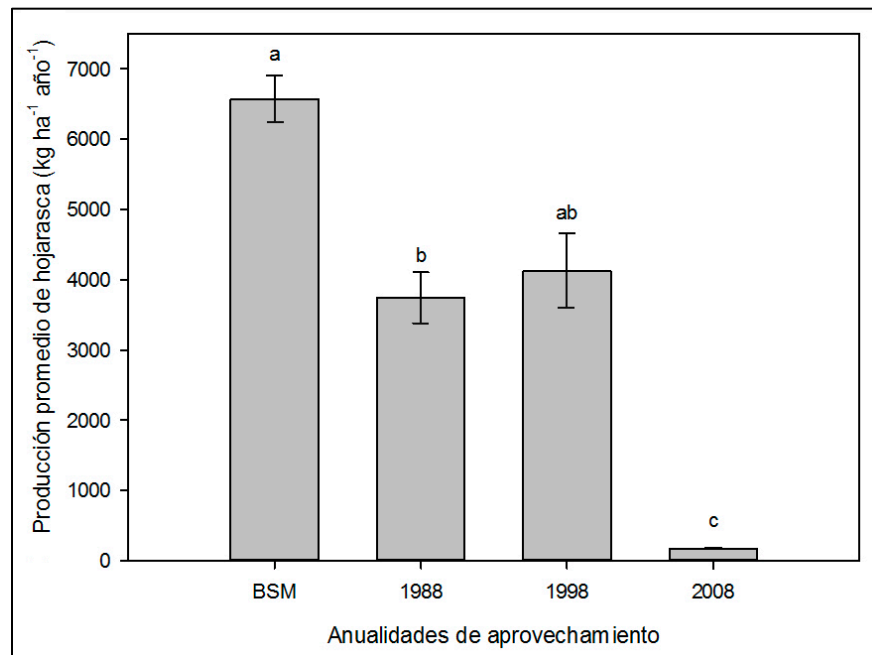
Así mismo se realizó un análisis de correlación de Spearman para detectar relaciones entre las variables dasométricas y los procesos de producción y descomposición. Dichos análisis se llevaron a cabo con el paquete estadístico SigmaPlot 12™.

## 5. RESULTADOS

### 5. 1. Producción de hojarasca fina en rodales sometidos a aprovechamiento forestal maderable y su contenido de carbono y nitrógeno.

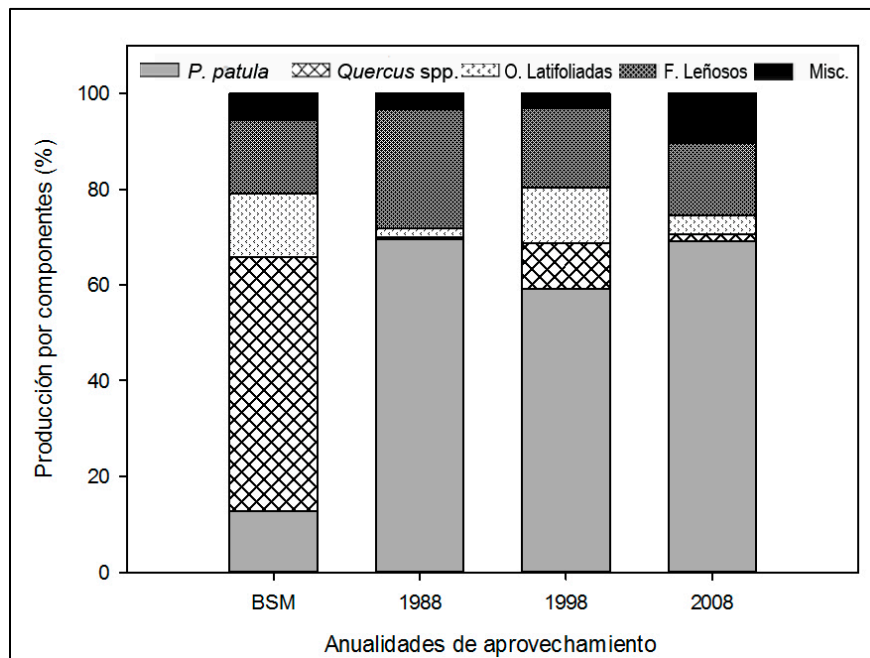
#### 5. 1. 1. Producción mensual y anual de hojarasca fina.

Al término del experimento se estimó una mayor producción de hojarasca en el bosque sin manejo ( $6570.33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ), seguido del rodal cosechado en 1998 donde se calculó una producción de  $4121.67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , el de 1988 con  $3741.51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y por último el rodal de 2008 donde apenas se acumularon  $175.09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ . A partir de la prueba de Kruskal-Wallis se determinó que la producción de hojarasca fue significativamente diferente en todos los rodales ( $p < 0.001$ ) (Figura 17).



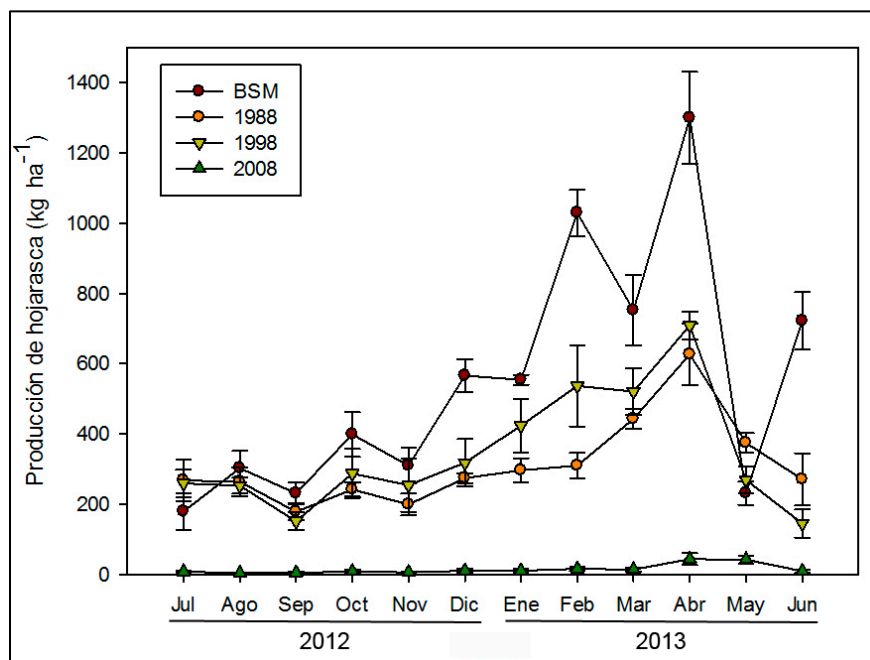
**Figura 17.** Producción promedio de hojarasca durante un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar. Las letras distintas indican diferencias significativas (Kruskal-Wallis,  $p < 0.001$ ).

La fracción foliar es el componente que más aporta a la hojarasca total en los cuatro rodales estudiados seguida de los fragmentos leñosos y por último los misceláneos. En el bosque sin manejo (BSM) se registró un aporte del 12.9% perteneciente a acículas de *Pinus patula*, el 52.9% a hojas de *Quercus* spp. y el 13.2% correspondiente a hojas de otras latifoliadas. Los fragmentos leñosos aportan el 15.3% y los misceláneos solo el 5.6% a la cantidad total de la hojarasca. En el rodal cosechado en 1988 la acumulación de acículas fue del 69.5%, las hojas de encino sumaron un 0.5% y las de otras latifoliadas un 1.8%, por su parte los fragmentos leñosos aportaron el 24.7% y los misceláneos 3.4%. Para el rodal intervenido en 1998 se calcularon los siguientes aportes por componente: 59.2% de acículas, 9.4% de hojas de *Quercus* spp., 11.5% de otras latifoliadas, 16.6% de fragmentos leñosos y un 3.2% de misceláneos. Por último, en el rodal más joven (2008), las acículas de *Pinus patula* aportaron el 69.1%, las hojas de encino el 1.4%, las hojas de otras latifoliadas el 4%, los fragmentos leñosos el 15% y los misceláneos contribuyeron con el 10.4% (Figura 18).



**Figura 18.** Porcentaje de aporte por componente al total de la hojarasca recolectada en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

La dinámica de la caída de hojarasca observada en los cuatro rodales en general muestra una acumulación con oscilaciones en los primeros 6 meses del experimento (de julio a diciembre), los cuales coinciden con la temporada de lluvias de la zona, para posteriormente dar paso a un aumento gradual que se mantiene hasta el mes de mayo en donde una vez más las cantidades vuelven a disminuir la mayoría de los rodales. En el BSM la cantidad de hojarasca aumentó de nuevo en el mes de junio (Figura 19).



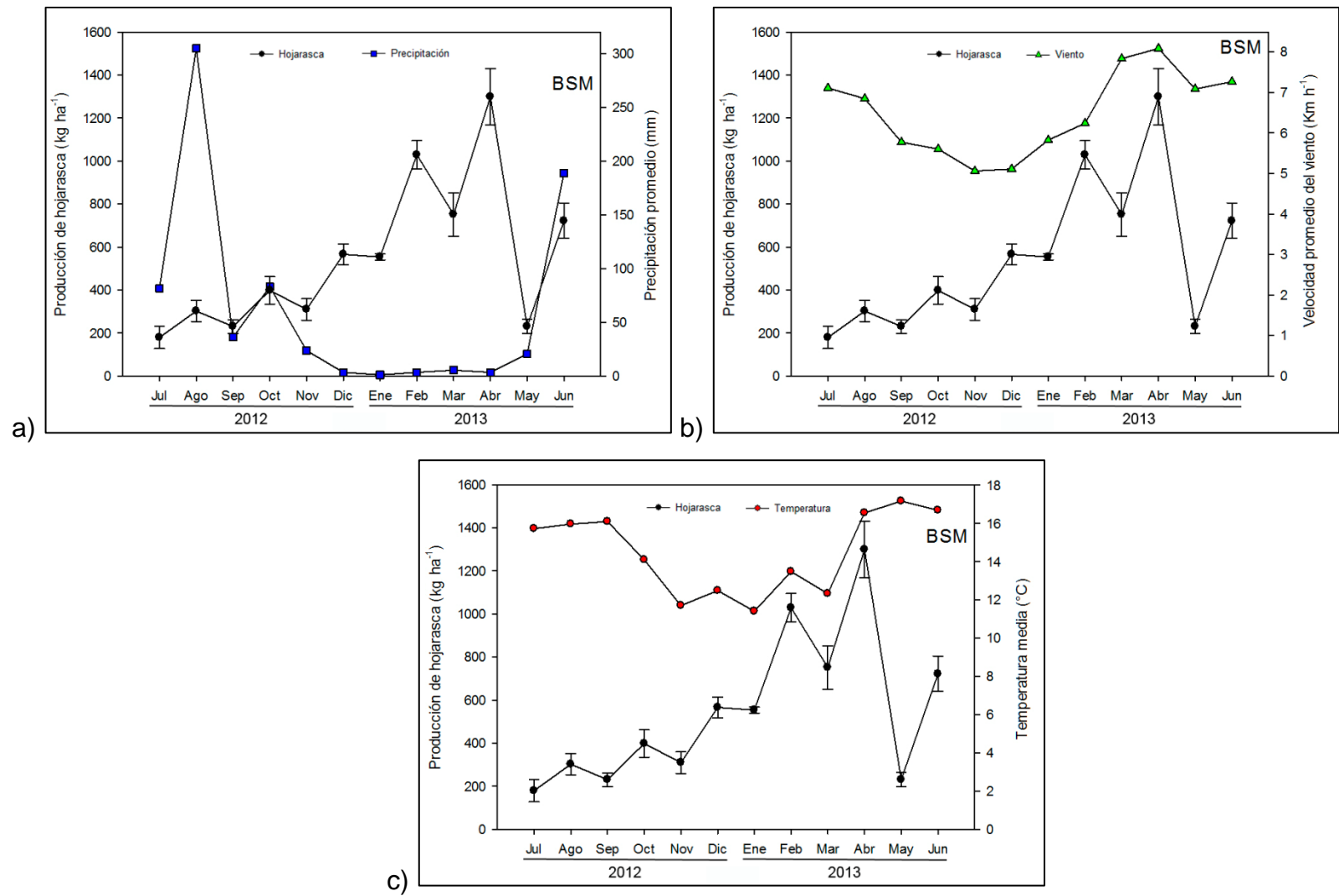
**Figura 19.** Producción de hojarasca a lo largo de un año en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

En el bosque sin manejo se observó un comportamiento oscilante tendiente a la alza durante los primeros meses de la evaluación, alcanzando su máximo en el mes de abril ( $1298.9 \pm 227.2 \text{ kg ha}^{-1}$ ), posteriormente hay una disminución súbita en la producción del mes de mayo y se observa un aumento en el mes final de la evaluación. Los resultados del análisis de varianza mostraron diferencias significativas en la producción a través de los meses ( $p < 0.05$ ). La producción promedio mínima se presentó en el mes de julio ( $179.1 \pm 89.8 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 20 a, b y c).

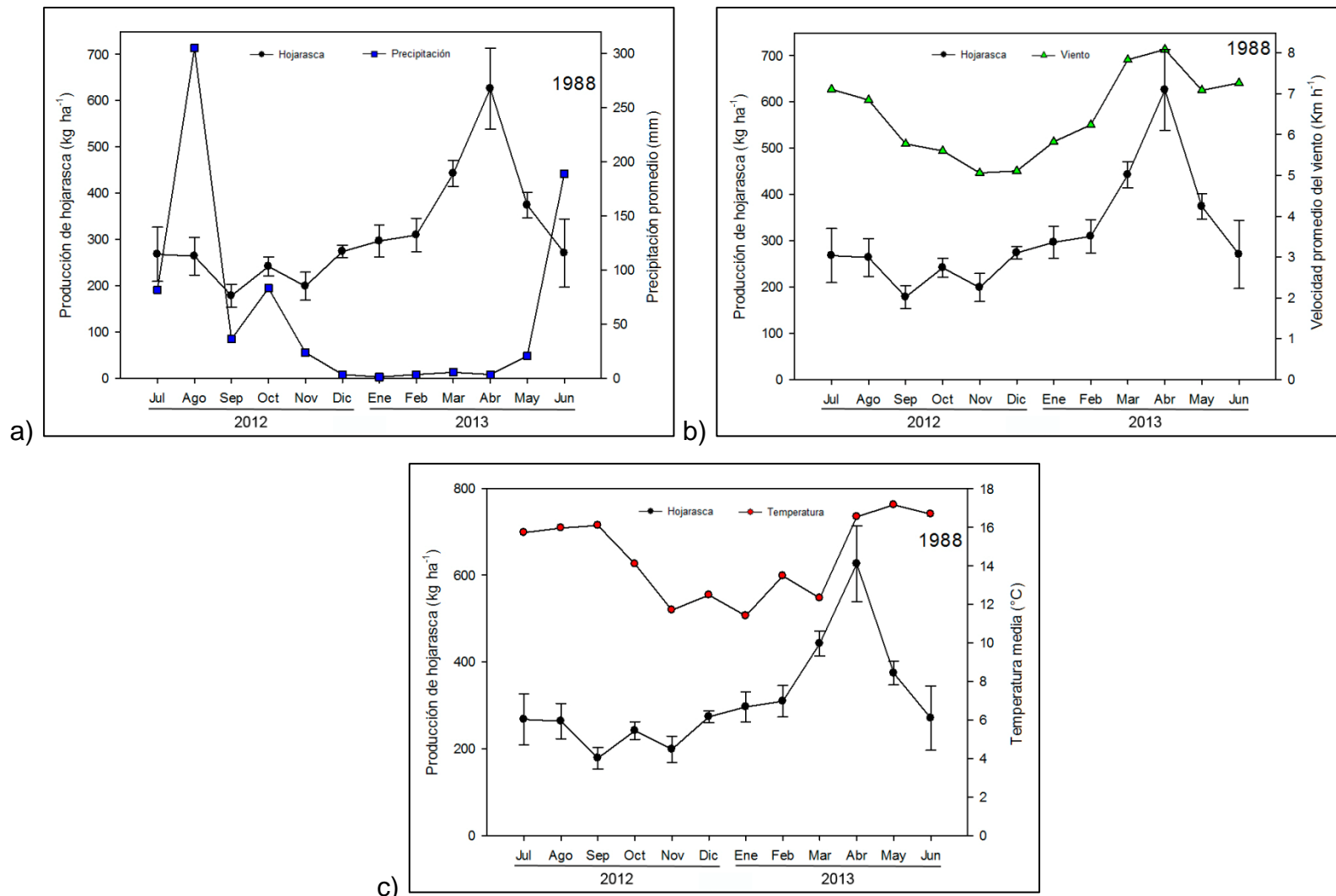
En el rodal aprovechado en 1988 la caída de hojarasca presentó diferencias significativas ( $p < 0.05$ ) a través del tiempo caracterizadas por fluctuaciones de baja producción hasta el mes de diciembre, a partir del cual comenzó a subir gradualmente para alcanzar el pico de producción en el mes de abril ( $625.9 \pm 151.4 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Posteriormente la caída de hojarasca fue hasta el final del experimento. El promedio mínimo observado sucedió en el mes de septiembre ( $178.2 \pm 43.2 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 21 a, b y c).

La producción de hojarasca en el rodal cosechado en 1998 comenzó con fluctuaciones de producción baja hasta el mes de noviembre y un incremento constante a partir del mes de diciembre hasta el mes de abril, posteriormente se observó una disminución en la caída de hojarasca en los meses de mayo y junio del 2013, encontrándose diferencias significativas entre los meses ( $p < 0.05$ ). El pico máximo se registró en el mes de abril ( $708.3 \pm 67.7 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mientras que el mínimo ocurrió en el último mes de la evaluación ( $144.6 \pm 68.7 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 22 a, b y c).

Con respecto a la caída de hojarasca ocurrida en el rodal de 4 años se observó una tendencia con fluctuaciones a la alza desde el primer mes culminando en un máximo en el mes de abril ( $43.2 \pm 29.5 \text{ kg ha}^{-1}$ ), y un decremento subsecuente al final del experimento. Se presentaron diferencias significativas entre la producción en los distintos meses ( $p < 0.05$ ). La producción mínima se registró en el mes de agosto ( $3.6 \pm 1.0 \text{ kg ha}^{-1}$ ) (Figura 23 a, b y c).

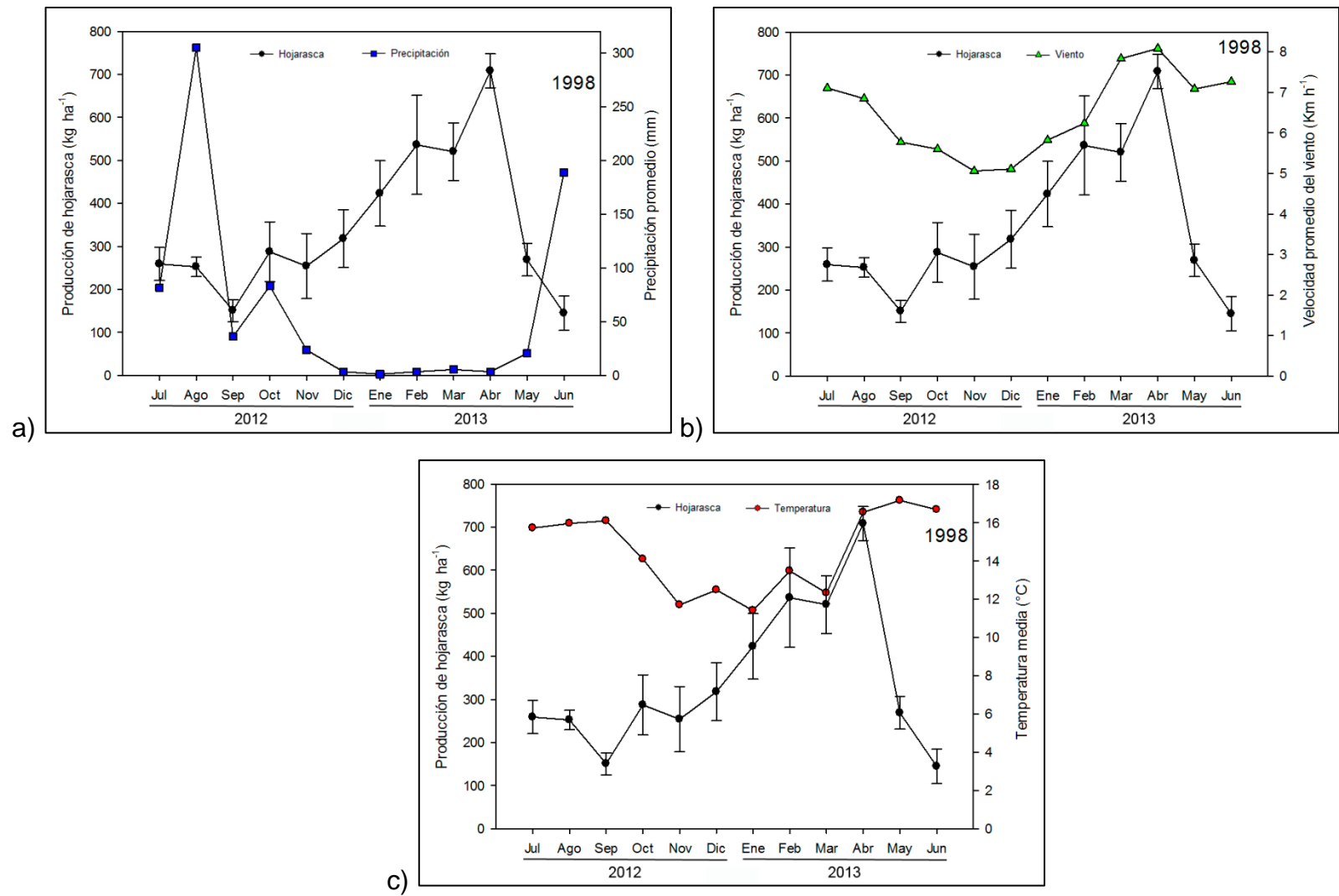


**Figura 20.** Producción media mensual de hojarasca en un bosque sin manejo respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

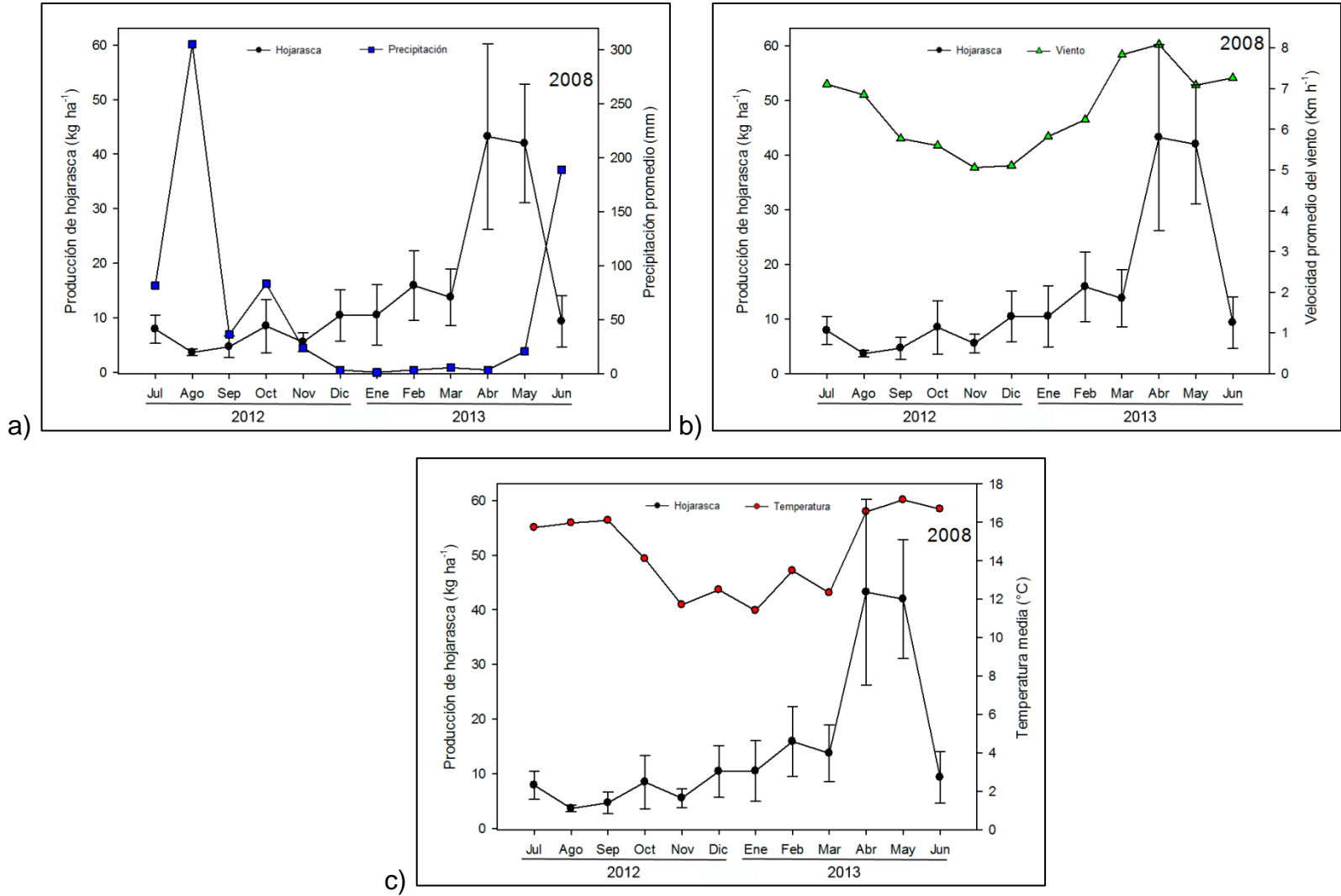


**Figura 21.** Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 24 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.





**Figura 22.** Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 14 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.



**Figura 23.** Producción media mensual de hojarasca en un rodal manejado de 4 años respecto a la a) precipitación mensual, b) velocidad promedio del viento y c) temperatura media a lo largo de un año en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

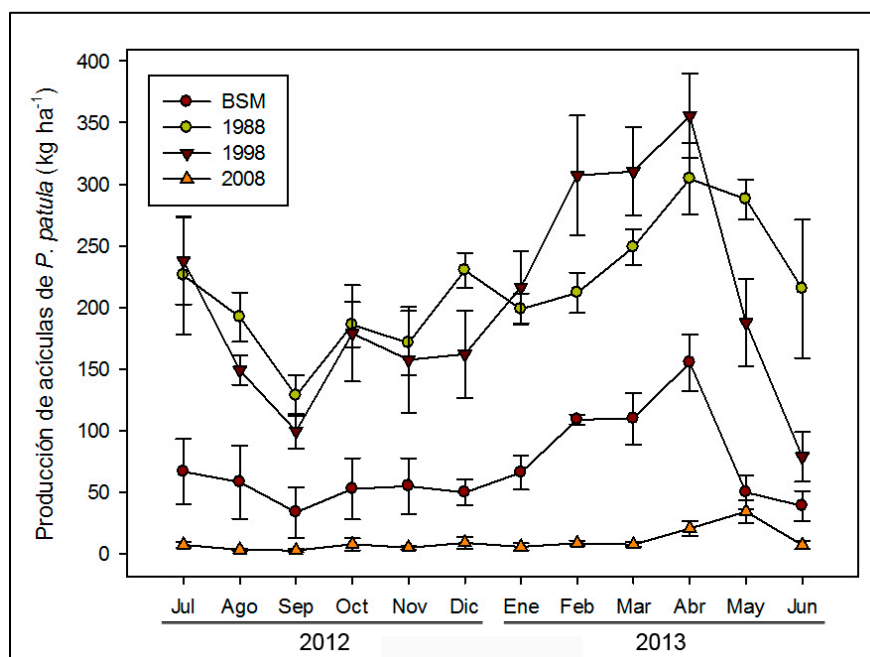
De acuerdo con el análisis de correlación de Pearson solo se encontró una correlación significativa en sentido positivo entre la velocidad del viento y la producción de hojarasca fina en el rodal cosechado en 1988 ( $r=0.743$ ,  $p<0.05$ ). La precipitación y la temperatura no exhibieron correlaciones significativas en ningún sentido con la producción de hojarasca en los cuatro rodales evaluados (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Análisis de correlación entre producción de hojarasca, precipitación mensual, velocidad promedio mensual del viento y temperatura media mensual.

Rodal	Precipitación mensual (mm)		Velocidad promedio del viento ( $\text{km h}^{-1}$ )		Temperatura Media ( $^{\circ}\text{C}$ )	
	r	p	r	p	r	p
BSM	-0.284	0.371	0.419	0.175	-0.062	0.849
1988	-0.291	0.359	0.743	0.006*	0.200	0.533
1998	-0.483	0.112	0.411	0.185	-0.235	0.462
2008	-0.381	0.222	0.539	0.070	0.409	0.187

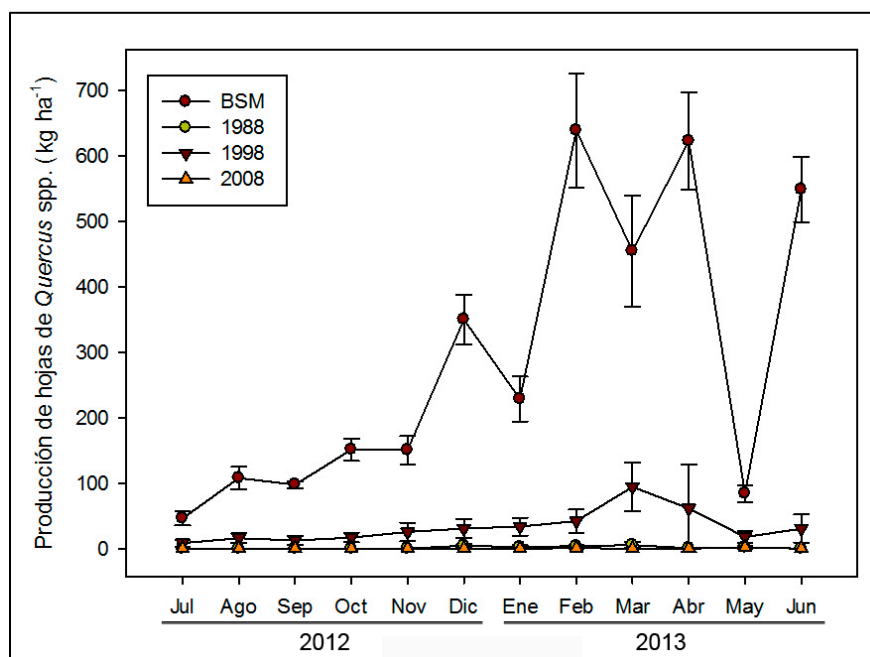
r= coeficiente de correlación de Pearson, p= probabilidad ( $\alpha=0.05$ ). El asterisco (\*) indica correlación significativa.

La producción de acículas de *Pinus patula* fue significativamente diferente entre los rodales ( $p<0.05$ ). La más abundante a lo largo de los meses se registró en los rodales de 14 y 24 años alcanzando sus máximos en el mes de abril ( $355.6\pm 59.6$  y  $304.4\pm 50.4$   $\text{kg ha}^{-1}$  respectivamente). En todos los rodales se observaron fluctuaciones durante los primeros 6 meses y un aumento constante en la acumulación de acículas partir del mes de diciembre, excepto en el rodal cosechado en 1988 donde el incremento se empezó a dar en el mes de enero. Posteriormente las cantidades fueron a la baja a partir del mes de abril en los rodales más viejos y en mayo en el rodal de 4 años manteniéndose de forma sostenida hasta el final del experimento. Este rodal mostró la menor acumulación de acículas durante todo el año (Figura 24).



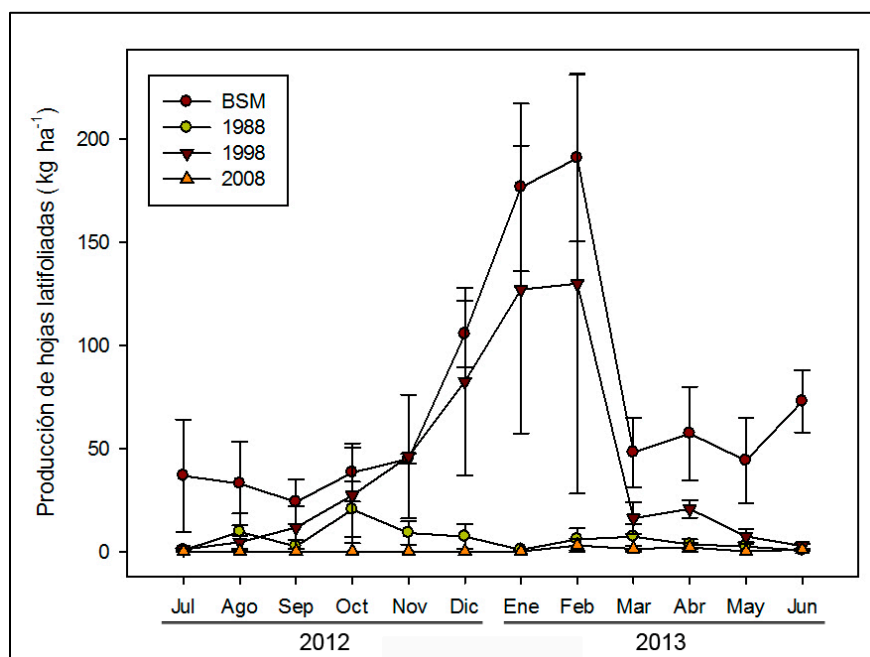
**Figura 24.** Producción promedio de acículas de *Pinus patula* Schltl. & Cham. a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

En cuanto a la caída de hojas de diferentes especies de encinos las mayores cantidades se registraron en el BSM, donde se pudo observar una cantidad promedio máxima en el mes de febrero ( $638.4 \pm 150.9 \text{ kg ha}^{-1}$ ), los otros rodales registraron cantidades promedio por debajo de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  durante todo el año, siendo los rodales de 4 y 14 años los que presentaron la menor acumulación. De acuerdo con el análisis de varianza se encontraron diferencias significativas entre los rodales con diferente anualidad de aprovechamiento ( $p < 0.05$ ). En general se observa una tendencia similar a la observada en la caída de acículas y de la hojarasca, con altibajos en los primeros meses y una proyección a la alza a partir del mes de diciembre manteniéndose así hasta el mes marzo en los tres rodales manejados. Mientras que en el bosque sin manejo el decremento ocurrió hasta el mes de abril aunque se observó un aumento importante en la cantidad colectada en el mes de junio (Figura 25).



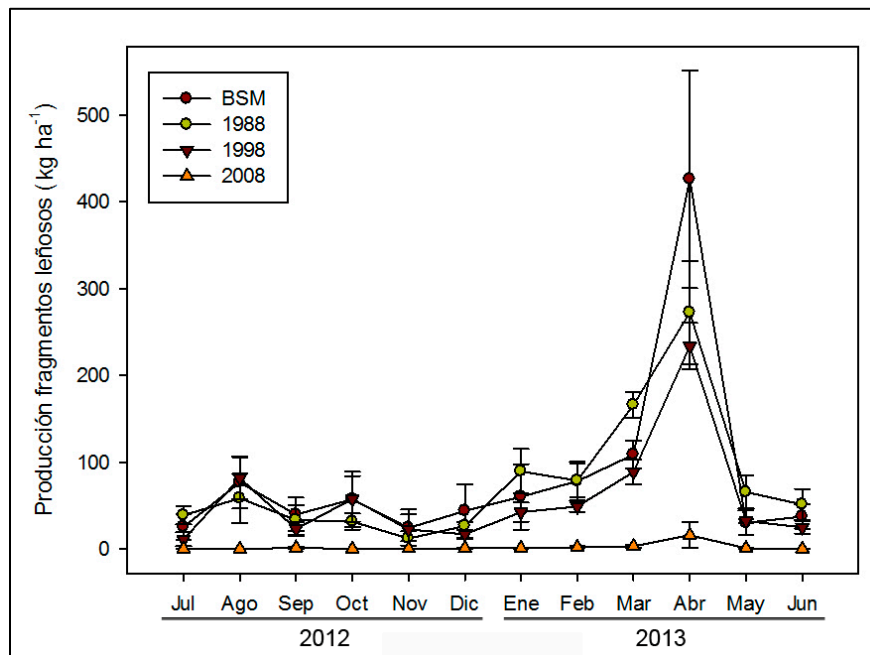
**Figura 25.** Producción promedio de hojas de *Quercus* spp., a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

La producción de hojas de otras especies de latifoliadas fue significativamente diferente entre los cuatro rodales ( $p < 0.05$ ). La mayor producción se observó en los rodales del BSM y el cosechado en 1998 donde se registraron picos de producción máximos en el mes de febrero ( $190.7 \pm 69.9$  y  $129.9 \pm 176.6$  kg ha<sup>-1</sup> respectivamente). En el BSM se presentó la misma fluctuación de baja producción observada en los componentes anteriores durante los primeros meses y una subida gradual a partir del mes de octubre, mientras que en el rodal cosechado en 1998 el incremento se observa a partir del primer mes. Dicho aumento se mantuvo hasta el mes de febrero en ambos rodales, para después dar paso a fluctuaciones similares a las de los primeros meses. Por otra parte en los rodales cosechados en los años de 1988 y 2008 se observaron cantidades menores a 25 kg ha<sup>-1</sup> durante todo el experimento y un comportamiento menos oscilante que en los otros dos rodales (Figura 26).



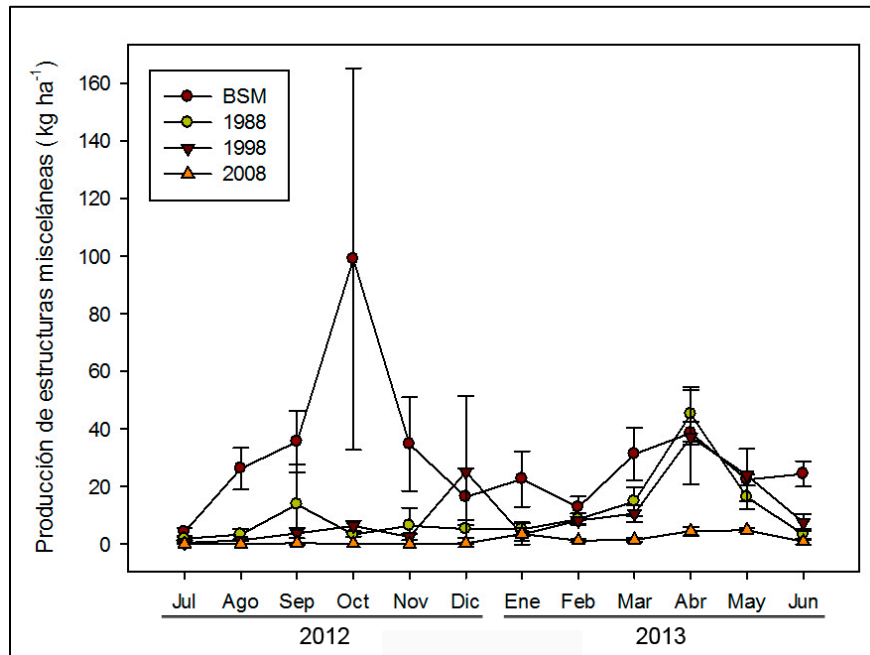
**Figura 26.** Producción promedio de hojas de otras latifoliadas a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

La producción de fragmentos leñosos en los cuatro rodales también mostró diferencias significativas entre las edades de los rodales evaluados ( $p < 0.05$ ), presentando una tendencia similar a la de la acumulación de la hojarasca total. En particular este componente fue más abundante en los tres rodales más viejos. La cantidad máxima se reportó en el mes de abril en el BSM ( $425.7 \pm 217.1 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Una vez más las menores cantidades promedio se encontraron en el rodal cosechado en 2008 durante todo el año del experimento. La dinámica temporal de este componente estuvo representada por fluctuaciones en los primeros 6 meses y un aumento gradual y constante en el mes de diciembre, alcanzando su máximo en el mes de abril a partir del cual empezó a disminuir nuevamente, comportamiento parecido al observado en la producción de acículas (Figura 27).



**Figura 27.** Producción promedio de fragmentos leñosos (ramillas y corteza) a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

Por último la acumulación de misceláneos fue muy similar en los cuatro rodales y se adecua en general a la tendencia exhibida en la caída de los otros componentes. Se observa una acumulación máxima en el mes de octubre en el BSM ( $99.0 \pm 114.7 \text{ kg ha}^{-1}$ ), debido a que en este mes se colectó una cantidad atípica de estructuras reproductivas en una de las trampas. Las cantidades máximas para los otros rodales se alcanzaron en los meses de abril y mayo, dichos picos no fueron mayores a  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  (Figura 28). A partir del análisis de varianza de un factor se detectaron diferencias significativas entre rodales ( $p < 0.05$ ).



**Figura 28.** Producción promedio de misceláneos (estructuras reproductivas, epífitas y fragmentos sin identificar) a lo largo de un año en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

En el Cuadro 3 se resumen los resultados del análisis de correlación de Pearson, entre la cantidad de hojarasca separada por componentes y las variables climatológicas. Solo se observaron correlaciones significativas en sentido positivo entre la caída de acículas de *P. patula* y la velocidad del viento en el rodal cosechado en 1988, además de la caída de fragmentos leñosos y la misma variable climatológica en los rodales cosechados en 1988 y 1998. La precipitación y la temperatura no se relacionaron significativamente con la deposición de algún componente en ningún rodal.



**Cuadro 3.** Análisis de correlación entre producción de hojarasca por componentes, precipitación media mensual, velocidad promedio mensual del viento y temperatura media mensual.

Componente	Precipitación mensual (mm)		Velocidad promedio del viento (km h <sup>-1</sup> )		Temperatura media (°C)	
	r	p	r	p	r	p
<b>BSM</b>						
APp	-0.351	0.264	0.570	0.053	-0.060	0.854
HQ	-0.214	0.503	0.376	0.228	-0.072	0.825
HOL	-0.352	0.262	-0.238	0.457	-0.496	0.101
FL	-0.184	0.567	0.549	0.064	0.227	0.478
M	-0.040	0.901	-0.205	0.523	-0.034	0.918
<b>1988</b>						
APp	-0.237	0.458	0.680	0.015*	0.268	0.399
HQ	-0.516	0.087	0.046	0.888	-0.518	0.084
HOL	0.139	0.666	-0.371	0.235	-0.280	0.378
FL	-0.261	0.413	0.722	0.008*	0.138	0.668
M	-0.378	0.226	0.537	0.072	0.320	0.311
<b>1998</b>						
APp	-0.489	0.107	0.483	0.112	-0.181	0.572
HQ	-0.372	0.234	0.494	0.103	-0.330	0.295
HOL	-0.473	0.121	-0.495	0.102	-0.687	0.014
FL	-0.067	0.837	0.590	0.043*	0.219	0.494
M	-0.402	0.195	0.337	0.285	0.244	0.444
<b>2008</b>						
APp	-0.302	0.339	0.404	0.193	0.445	0.147
HQ	-0.217	0.499	0.144	0.656	0.318	0.313
HOL	-0.250	0.433	0.432	0.161	0.019	0.955
FL	-0.310	0.327	0.535	0.073	0.226	0.480
M	-0.404	0.193	0.462	0.130	0.213	0.505

APp= Acículas de *Pinus patula*; HQ= Hojas de *Quercus* spp.; HOL= Hojas de otras latifoliadas; FL= Fragmentos leñosos; M= Estructuras misceláneas; r= coeficiente de correlación de Pearson; p= probabilidad ( $\alpha=0.05$ ). El asterisco (\*) indica correlación significativa.

## 5. 1. 2. Contenido de carbono, nitrógeno y tasas de retorno en hojarasca fina producida en rodales manejados

Como resultado de los análisis químicos se observaron mayores contenidos de carbono y nitrógeno en la hojarasca producida en un año en el BSM, mientras que los menores se obtuvieron en el rodal cosechado en el 2008. De acuerdo al análisis de varianza se encontraron diferencias significativas entre los rodales ( $p < 0.05$ ). En cuanto a los valores calculados para la relación C:N, esta fue mayor en el rodal cosechado en 1988 (Cuadro 4).

**Cuadro 4.** Cantidades promedio de carbono y nitrógeno ( $\pm$  desviación estándar), y relación C:N en la hojarasca fina producida durante un año en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodales	Contenido de C (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Contenido de N (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Relación C:N
BSM	3115.8 $\pm$ 278.6a	54.6 $\pm$ 4.9a	57.0
1988	1871.1 $\pm$ 315.3b	29.3 $\pm$ 4.9b	63.9
1998	1956.1 $\pm$ 449.8b	34.5 $\pm$ 7.9b	56.7
2008	85.2 $\pm$ 14.5c	1.6 $\pm$ 0.3c	52.8

En lo correspondiente al análisis de las proporciones de C por componentes solo se encontraron diferencias significativas entre las estructuras misceláneas del BSM y los rodales de 14 y 24 años ( $p < 0.05$ ). Las proporciones de nitrógeno fueron estadísticamente diferentes en las hojas de otras latifoliadas ( $p < 0.05$ ) entre el rodal sin manejo y el aprovechado en 1998. También se detectaron diferencias significativas para este elemento en los fragmentos leñosos recolectados en los tres rodales más viejos ( $p < 0.05$ ) (Cuadro 5).

En cuanto a los contenidos de C y N y su cociente a través del tiempo no se encontraron diferencias significativas para ningún componente de la hojarasca.

**Cuadro 5.** Concentraciones promedio de carbono y nitrógeno ( $\pm$  la desviación estándar) de los componentes de la hojarasca obtenidos en un experimento de producción en cuatro rodales de diferente edad, Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal	Acículas de <i>Pinus patula</i>		Hojas de <i>Quercus</i> spp.		Hojas de otras latifoliadas		Fragmentos leñosos		Misceláneos	
	C	N	C	N	C	N	C	N	C	N
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
<b>BSM</b>	48.7 $\pm$ 0.4a	0.7 $\pm$ 0.1a	47.9 $\pm$ 0.4a	0.8 $\pm$ 0.2a	45.3 $\pm$ 0.9a	0.9 $\pm$ 0.1a	47.5 $\pm$ 2.6a	0.8 $\pm$ 0.1a	48.6 $\pm$ 0.4a	1.0 $\pm$ 0.0a
<b>1988</b>	49.2 $\pm$ 0.7a	0.9 $\pm$ 0.1a	--	--	--	--	50.9 $\pm$ 0.5a	0.6 $\pm$ 0.1b	50.7 $\pm$ 0.4a	0.9 $\pm$ 0.2a
<b>1998</b>	48.9 $\pm$ 1.4a	0.8 $\pm$ 0.1a	47.6 $\pm$ 0.5a	0.8 $\pm$ 0.1a	45.8 $\pm$ 0.3a	1.2 $\pm$ 0.0b	40.2 $\pm$ 16.7a	0.5 $\pm$ 0.0b	50.6 $\pm$ 0.9b	1.0 $\pm$ 0.1a
<b>2008</b>	48.6 $\pm$ 0.3a	0.8 $\pm$ 0.1a	--	--	--	--	--	--	--	--

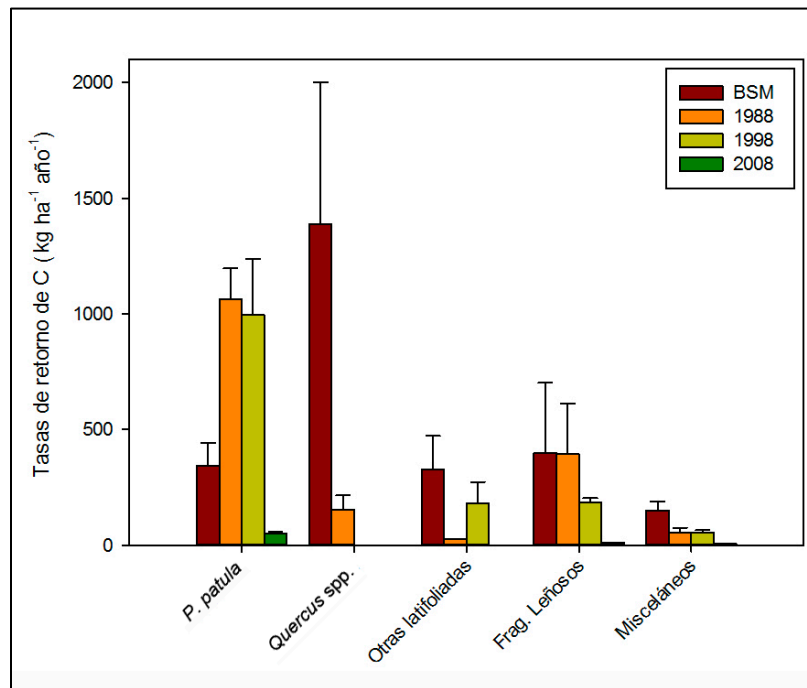
Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas entre los sitios ( $p < 0.05$ ).

De acuerdo con los resultados de los análisis químicos y las estimaciones de caída de hojarasca se pudieron obtener las tasas anuales de flujo o retorno de C y N para cada rodal. Las mayores tasas para ambos elementos se obtuvieron en el BSM mientras que las menores se registraron en el rodal aprovechado en 2008 (Cuadro 6).

**Cuadro 6.** Tasas de flujo de carbono y nitrógeno en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

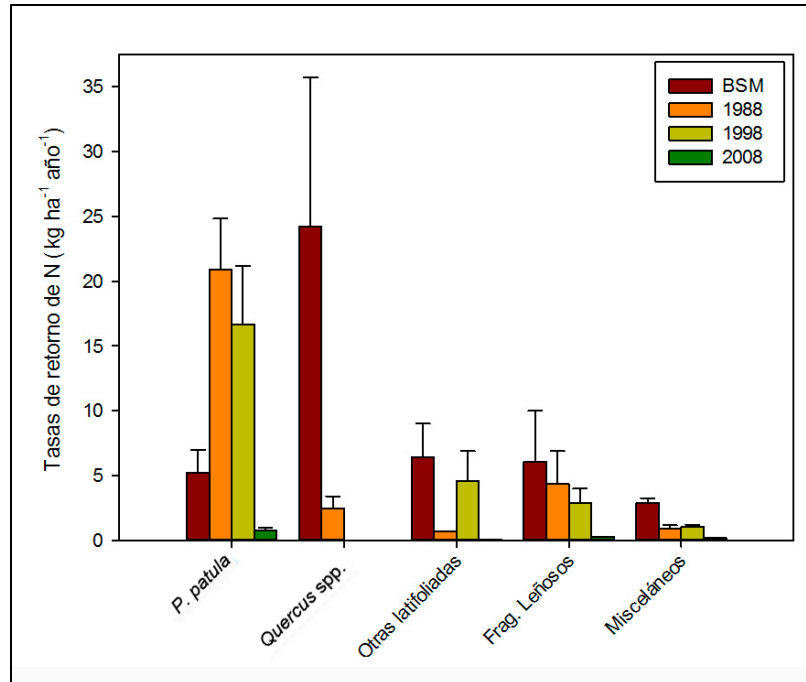
Rodal	Tasas de flujo de C (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )	Tasas de flujo de N (kg ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup> )
BSM	2604.66	44.73
1988	1694.32	29.27
1998	1415.07	25.18
2008	70.22	1.28

Al analizarse las tasas de retorno de elementos para los componentes de la hojarasca por separado, se encontró que las tasas más altas de retorno de carbono se presentaron en la fracción foliar de *Pinus patula* con cifras de 1065.09, 994.81, 48.99 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en los rodales cosechados en 1988, 1998 y 2008 respectivamente. Mientras que en el bosque sin manejo el mayor aporte de carbono está dado por las hojas de distintas especies de encino con una tasa de 1387.43 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Figura 29).



**Figura 29.** Tasas de retorno de carbono en componentes de la hojarasca depositada en cuatro rodales manejados en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

Por otra parte las mayores tasas de retorno anual de nitrógeno por componentes se observaron también en las acículas de *Pinus patula* para los rodales de 1988 (20.88 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), 1998 (16.67 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y 2008 (0.79 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). En el bosque sin manejo la mayor tasa de retorno de N está dada por la producción de hojas de *Quercus spp.* (24.20 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) (Figura 30).

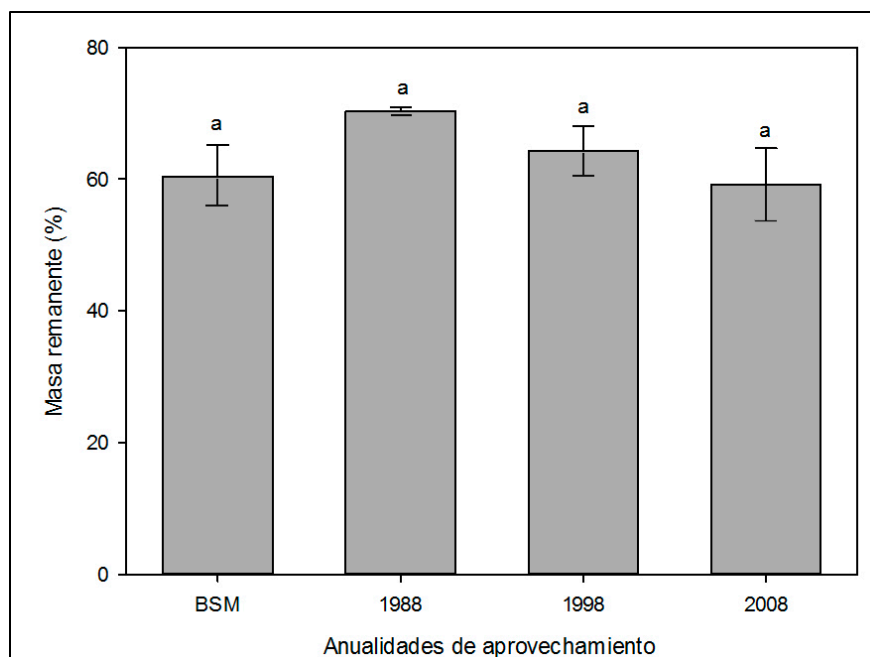


**Figura 30.** Tasas de retorno de nitrógeno en componentes de la hojarasca depositada en cuatro rodales manejados en Zacualtipán, Hidalgo. Las barras verticales indican los errores estándar.

## 5. 2. Descomposición de acículas y dinámica de carbono y nitrógeno en rodales de *Pinus patula* sometidos a aprovechamiento forestal maderable

### 5. 2. 1. Descomposición de acículas de *Pinus patula*

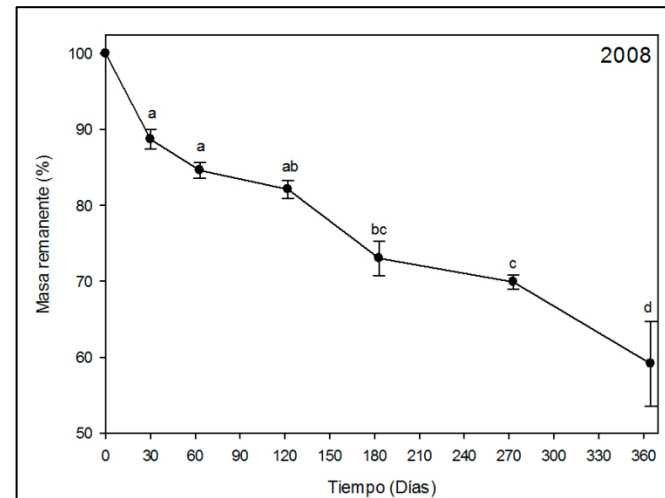
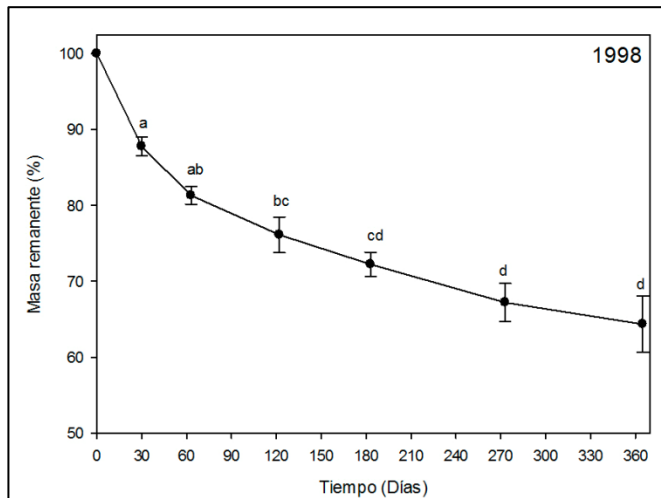
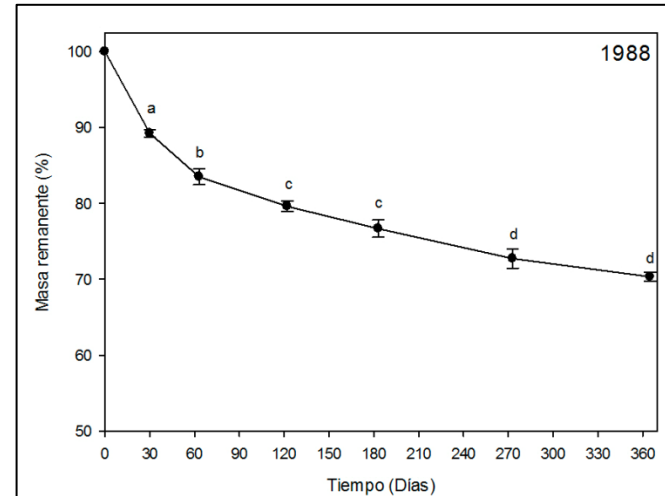
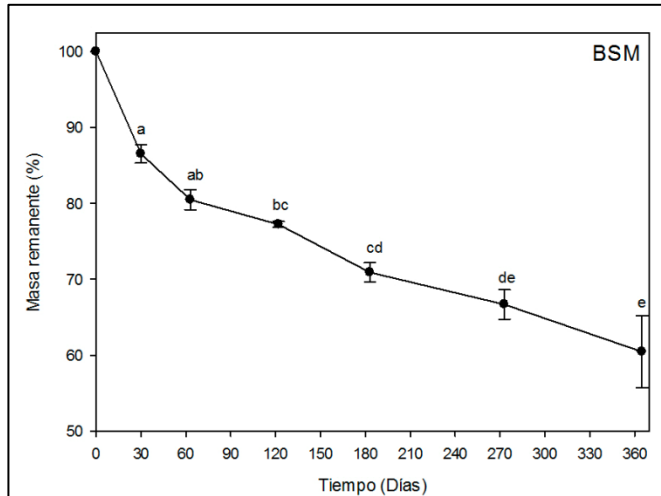
Al concluir los 365 días de incubación de acículas de pino en campo el porcentaje remanente más bajo se registró en el rodal que fue cosechado en 2008 (59.1%), mientras que el más alto ocurrió en el de 1988 (70.3%). Sin embargo, de acuerdo al análisis de varianza de una vía no se encontraron diferencias significativas entre los porcentajes de masa remanente de los cuatro rodales ( $p > 0.05$ ) (Figura 31).



**Figura 31.** Porcentajes de masa remanente después de 365 días en rodales manejados. Las barras verticales indican los errores estándar. Las letras iguales indican que no hay diferencias significativas de acuerdo con el análisis de varianza (95%).

De manera general y de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis, la pérdida de masa fue más notoria en los primeros 180 días para todos los rodales ( $p < 0.001$ ), observándose una estabilización en los meses posteriores.

En el BSM se pudo apreciar que la masa remanente fue diferente en todos los meses evaluados ( $p < 0.001$ ), no así en el rodal cosechado en 1988 en donde se aprecia una diferencia más marcada en los primeros dos meses para después mantenerse constante del cuarto al sexto mes y del noveno al décimo segundo ( $p < 0.001$ ). Por otra parte en el rodal aprovechado en 1998 se encontraron diferencias significativas en la masa remanente hasta los 273 días, posteriormente dicha variable se mantuvo estable hasta el fin del experimento ( $p < 0.001$ ). Mientras que en rodal más joven no se apreciaron diferencias sino hasta después de 60 días del inicio de la evaluación en campo ( $p < 0.001$ ) (Figura 32).



**Figura 32.** Porcentajes promedio de masa remanente en función del tiempo de incubación en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo. Letras diferentes indican diferencias en el tiempo de acuerdo con la prueba de Kruskal-Wallis (95%). Las barras verticales indican los errores estándar.

La masa remanente final no se correlacionó de manera significativa con la temperatura del suelo promediada a partir del mes de noviembre del 2012 en ninguno de los sitios. Dicha temperatura no mostró diferencias significativas entre los sitios ( $p>0.05$ ) (Cuadro 7).

**Cuadro 7.** Temperatura media del suelo de noviembre de 2012 a junio de 2013 (desviación estándar) y análisis de correlación de Pearson entre la temperatura media del suelo y la masa remanente final.

Rodal	Temperatura media (°C)	r	p
BSM	15.1±2.5a	-0.698	0.302
1988	15.9±2.7a	0.868	0.132
1998	14.5±2.4a	-0.030	0.970
2008	17.3±2.2a	0.111	0.889

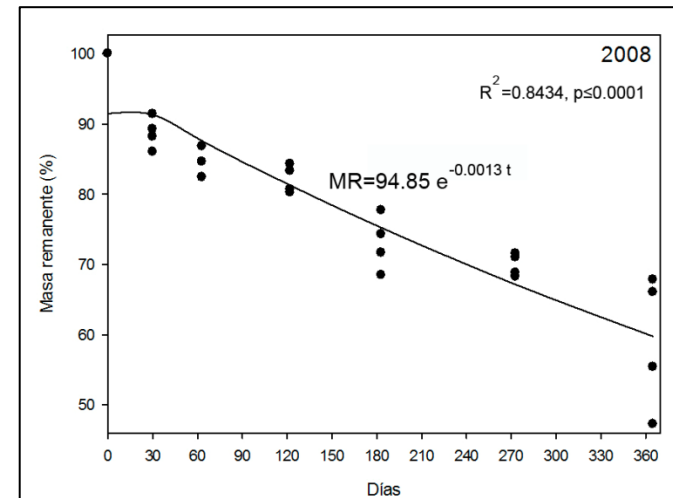
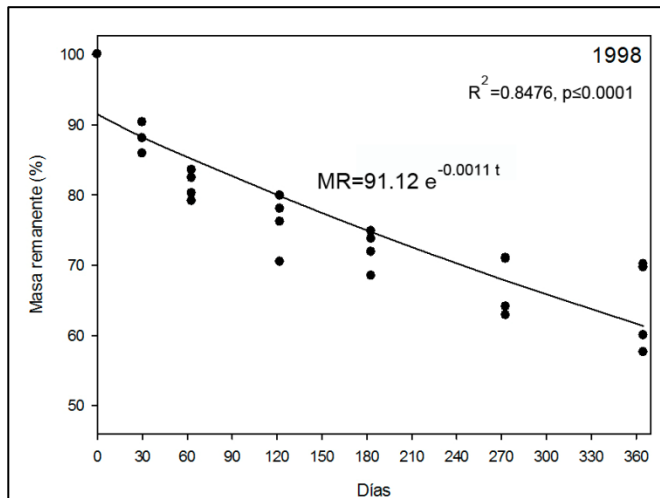
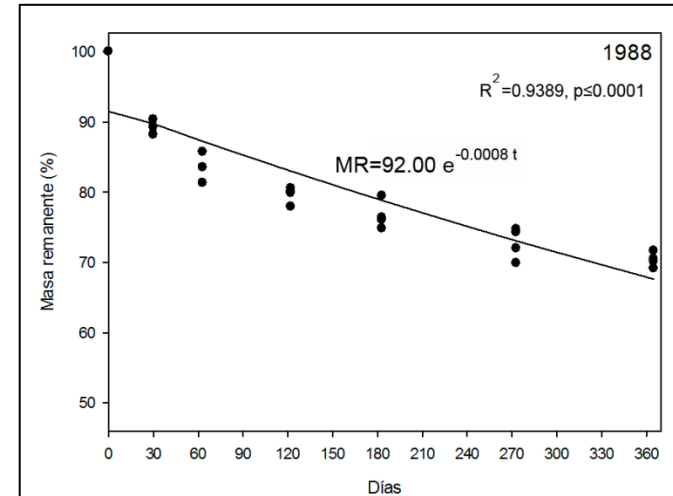
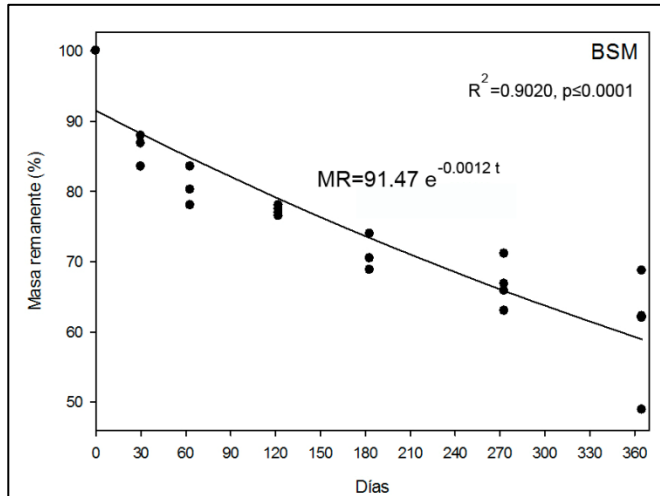
r= Coeficiente de correlación de Pearson, p= probabilidad ( $\alpha=0.05$ )

A partir de los resultados del análisis de regresión de la masa remanente a través del tiempo se obtuvieron las ecuaciones que se ajustan al modelo de descomposición para cada rodal (Figura 33).

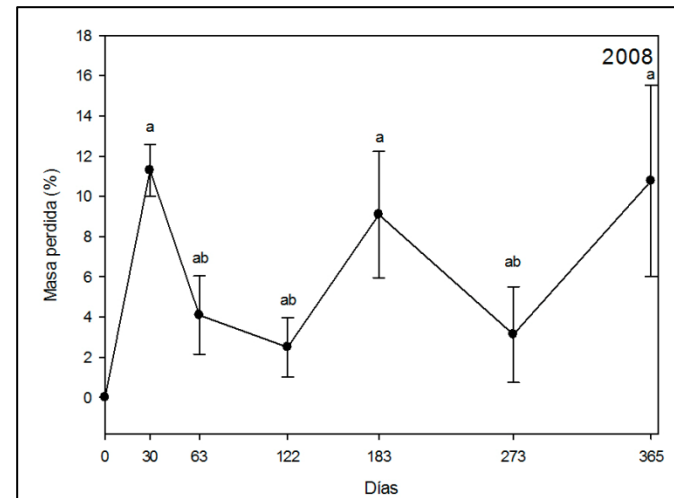
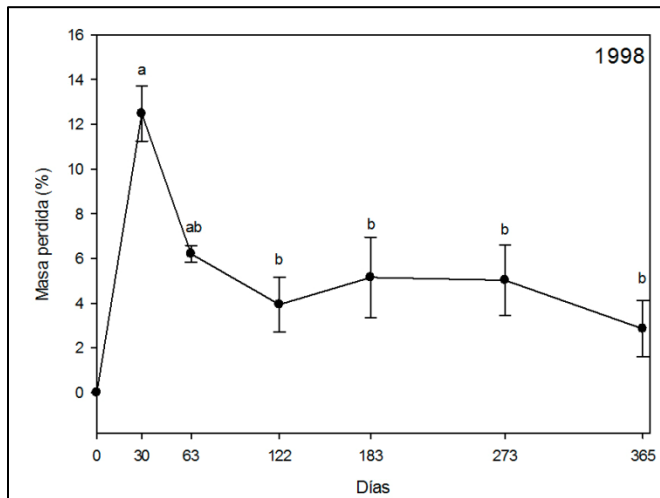
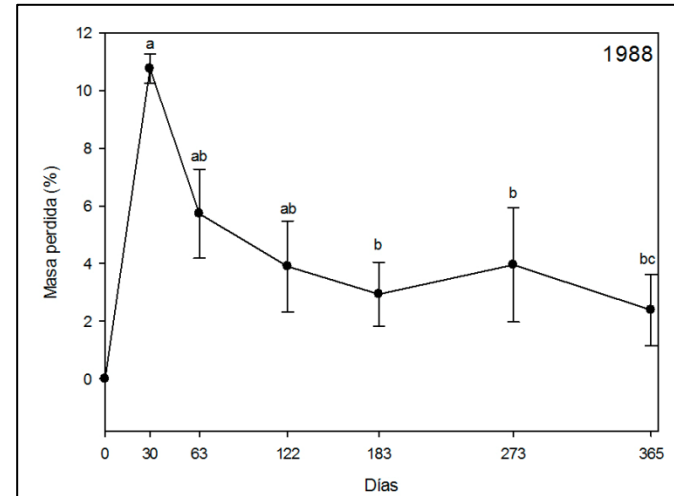
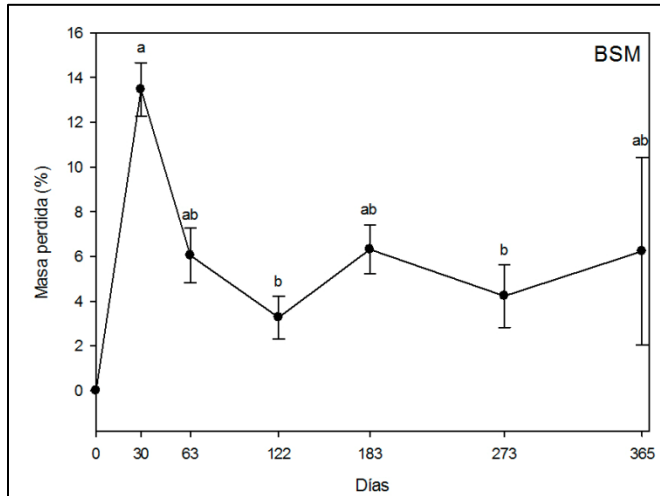
El porcentaje de masa perdida por mes fue diferente significativamente en cada uno de los rodales. En general el mayor porcentaje de masa perdida se presentó después de 30 días en los cuatro sitios. En el BSM se estimaron porcentajes con oscilaciones moderadas después de 30 días, al final del experimento se estimó un porcentaje de 6.2% el cual no difirió con los obtenidos en las muestras recuperadas a los 122 y 273 días ( $p<0.05$ ). En el rodal aprovechado en 1988 la tendencia de los porcentajes de masa perdida se mantuvo a la baja después de los primero 30 días, presentando solo una ligera variación a la alza en la pérdida de masa de las muestras recuperadas en el día 273 ( $p<0.05$ ). En el rodal de 14 años se observó una tendencia similar a la del rodal de 24 años, es decir, una tendencia a la baja después de los primeros 30 días. Después del día 122 no se detectaron diferencias significativas en los porcentajes de peso perdido hasta el fin del experimento ( $p<0.05$ ). En el rodal más joven el porcentaje de masa perdida a través de los meses del experimento presentó oscilaciones más marcadas, el



estimado en el día 183 no fue significativamente diferente al del día 365 ( $p < 0.05$ ) (Figura 34).



**Figura 33.** Relación entre la masa remanente y el tiempo de incubación durante un año en cuatro rodales de diferentes edades en Zacualtipán, Hidalgo.



**Figura 34.** Porcentajes de masa pérdida en función del tiempo de incubación en cuatro rodales de diferentes edades en Zacualtipán, Hidalgo. Letras distintas indican diferencias significativas en el tiempo de acuerdo con el análisis de varianza ( $p < 0.05$ ). Las barras verticales indican los errores estándar.

Con respecto a las tasas de descomposición calculadas mediante la fórmula de Olson (1963) la más alta se presentó en el rodal cosechado en 2008 ( $k= 0.56$ ), mientras que la más baja se encontró en el rodal de 1988 ( $k= 0.37$ ). Por otra parte el tiempo de semidescomposición (en años) más bajo se calculó para el rodal de 2008 ( $t_{50\%} = 1.33$ ), rodal en el que también se estima el menor tiempo necesario para que se descomponga el 99% de la hojarasca ( $t_{99\%} = 9.57$ ) (Cuadro 8).

**Cuadro 8.** Tasas de descomposición ( $k$ ) y tiempo necesario para que desaparezca el 50 y el 99% de la masa de las acículas de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Año de aprovechamiento	$k$ (año <sup>-1</sup> )	Pérdida del 50% (años)	Pérdida del 99% (años)
BSM	0.51	1.43	10.32
1988	0.37	1.86	13.39
1998	0.46	1.58	11.39
2008	0.56	1.33	9.57

De acuerdo con el análisis de varianza ( $\alpha= 0.05$ ) no se presentaron diferencias significativas en las tasas de descomposición entre los cuatro rodales ( $p= 0.225$ ), no así en el transcurso del tiempo donde se pudo apreciar una significancia similar a la observada en los porcentajes de masa restante ( $p<0.001$ ).

De acuerdo con el análisis de regresión la humedad relativa (HR) tuvo un efecto negativo sobre la tasa de descomposición en los rodales BSM ( $r^2= 0.714$ ), el rodal cosechado en 1998 ( $r^2= 0.681$ ) y el cosechado en 2008 ( $r^2= 0.673$ ). La temperatura media ambiental (TM), la radiación global (RG) y la evapotranspiración potencial (EP) no están relacionadas significativamente con la variación en la tasas de descomposición (Cuadro 9).

Con respecto al análisis de regresión múltiple la combinación de las cuatro variables climatológicas evaluadas no mostraron efectos significativos con la variación de  $k$  a través del tiempo. En el Cuadro 9 se muestra el resumen del análisis de regresión con las ecuaciones resultantes y los coeficientes de determinación normales y ajustados.

**Cuadro 9.** Análisis de regresión entre la tasa de descomposición ( $k$ ) y las variables climáticas temperatura media ambiental (TM), radiación global (RG), humedad relativa (HR) y evapotranspiración potencial (EP) después de un año de incubación en campo.

Rodal/Regresión	$r^2$	$r^2$ ajustada	p
<b>BSM</b>			
$k = 0.462 - (0.0101 * TM)$	0.022	0.000	0.779
$k = -0.548 + (0.00217 * RG)$	0.262	0.077	0.299
$k = 1.389 - (0.0133 * HR)$	0.714	0.642	0.034*
$k = 0.108 + (0.00190 * EP)$	0.160	0.000	0.432
$k = -0.768 - (0.0721 * TM) + (0.00540 * RG)$	0.808	0.680	0.084
$k = 1.363 + (0.00240 * TM) - (0.0134 * HR)$	0.715	0.525	0.152
$k = 0.311 - (0.0151 * TM) + (0.00208 * EP)$	0.208	0.000	0.705
$k = 0.973 + (0.000795 * RG) - (0.0120 * HR)$	0.742	0.570	0.131
$k = -0.543 + (0.00182 * RG) + (0.00126 * EP)$	0.325	0.000	0.554
$k = 1.763 - (0.0161 * HR) - (0.00132 * EP)$	0.757	0.595	0.120
$k = -0.760 - (0.0705 * TM) + (0.00507 * RG) + (0.000951 * EP)$	0.844	0.609	0.225
$k = 1.766 + (0.0104 * TM) - (0.0175 * HR) - (0.00172 * EP)$	0.775	0.438	0.317
$k = 1.337 + (0.000849 * RG) - (0.0149 * HR) - (0.00138 * EP)$	0.789	0.474	0.299
<b>1988</b>			
$k = 0.448 - (0.0127 * TM)$	0.070	0.000	0.615
$k = -0.228 + (0.00124 * RG)$	0.168	0.000	0.420
$k = 0.978 - (0.00884 * HR)$	0.629	0.536	0.060
$k = 0.177 + (0.000782 * EP)$	0.054	0.000	0.659
$k = -0.397 - (0.0554 * TM) + (0.00371 * RG)$	0.805	0.676	0.086
$k = 1.028 - (0.00468 * TM) - (0.00861 * HR)$	0.638	0.396	0.218
$k = 0.378 - (0.0150 * TM) + (0.000960 * EP)$	0.148	0.000	0.787
$k = 0.837 + (0.000269 * RG) - (0.00842 * HR)$	0.635	0.392	0.220
$k = -0.227 + (0.00113 * RG) + (0.000384 * EP)$	0.179	0.000	0.743
$k = 1.472 - (0.0126 * HR) - (0.00174 * EP)$	0.778	0.631	0.104
$k = -0.396 - (0.0551 * TM) + (0.00366 * RG) + (0.000142 * EP)$	0.807	0.518	0.275
$k = 1.473 + (0.00419 * TM) - (0.0132 * HR) - (0.00190 * EP)$	0.784	0.461	0.305
$k = 1.302 + (0.000338 * RG) - (0.0121 * HR) - (0.00176 * EP)$	0.789	0.472	0.300

Rodal/Regresión	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> ajustada	p
<b>1998</b>			
k = 0.538 - (0.0158 * TM)	0.066	0.000	0.624
k = -0.352 + (0.00166 * RG)	0.187	0.000	0.392
k = 1.256 - (0.0117 * HR)	0.681	0.601	0.043*
k = 0.179 + (0.00117 * EP)	0.074	0.000	0.601
k = -0.571 - (0.0717 * TM) + (0.00487 * RG)	0.846	0.744	0.060
k = 1.310 - (0.00508 * TM) - (0.0115 * HR)	0.687	0.478	0.175
k = 0.436 - (0.0192 * TM) + (0.00140 * EP)	0.169	0.000	0.758
k = 1.054 + (0.000386 * RG) - (0.0111 * HR)	0.689	0.481	0.174
k = -0.350 + (0.00148 * RG) + (0.000652 * EP)	0.207	0.000	0.706
k = 1.842 - (0.0162 * HR) - (0.00206 * EP)	0.810	0.684	0.083
k = -0.568 - (0.0712 * TM) + (0.00475 * RG) + (0.000340 * EP)	0.852	0.630	0.214
k = 1.844 + (0.00554 * TM) - (0.0169 * HR) - (0.00227 * EP)	0.817	0.542	0.262
k = 1.607 + (0.000467 * RG) - (0.0155 * HR) - (0.00209 * EP)	0.822	0.556	0.254
<b>2008</b>			
k = 0.374 - (0.00503 * TM)	0.004	0.000	0.907
k = -0.820 + (0.00283 * RG)	0.316	0.144	0.246
k = 1.538 - (0.0153 * HR)	0.673	0.591	0.046*
k = 0.0260 + (0.00254 * EP)	0.202	0.003	0.371
k = -1.056 - (0.0772 * TM) + (0.00629 * RG)	0.761	0.601	0.117
k = 1.435 + (0.00966 * TM) - (0.0157 * HR)	0.687	0.478	0.176
k = 0.180 - (0.0115 * TM) + (0.00267 * EP)	0.222	0.000	0.686
k = 0.851 + (0.00131 * RG) - (0.0132 * HR)	0.729	0.548	0.141
k = -0.814 + (0.00235 * RG) + (0.00171 * EP)	0.398	0.000	0.467
k = 1.795 - (0.0172 * HR) - (0.000902 * EP)	0.687	0.479	0.175
k = -1.044 - (0.0749 * TM) + (0.00580 * RG) + (0.00138 * EP)	0.814	0.536	0.265
k = 1.800 + (0.0169 * TM) - (0.0195 * HR) - (0.00155 * EP)	0.722	0.304	0.387
k = 1.115 + (0.00135 * RG) - (0.0153 * HR) - (0.000998 * EP)	0.746	0.366	0.355

r<sup>2</sup>= coeficiente de determinación; p=probabilidad (α=0-05)

## 5. 2. 2. Dinámica de carbono y nitrógeno en la descomposición de acículas de *Pinus patula*.

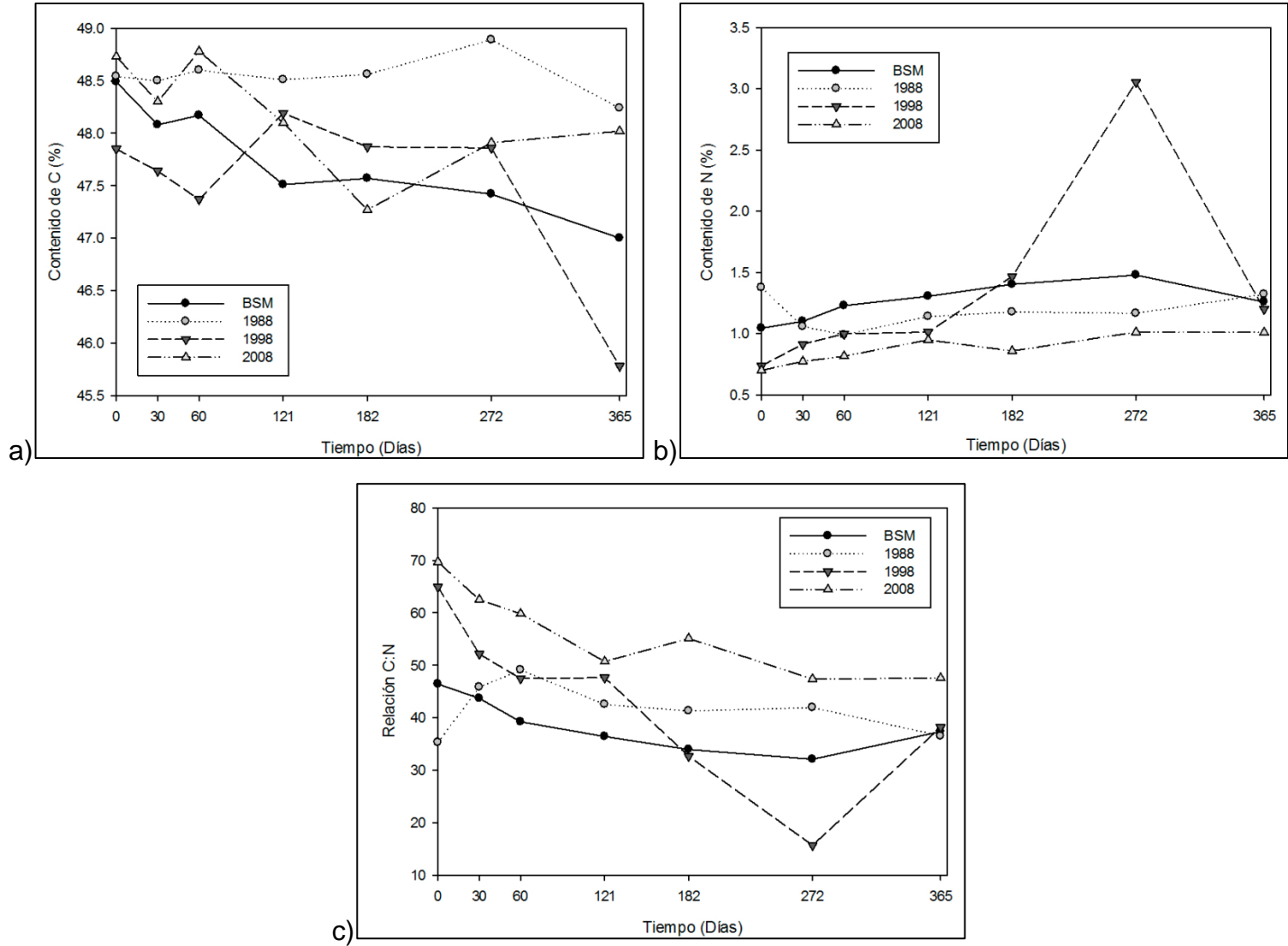
Analizando el contenido de carbono en las acículas durante el experimento de descomposición se detectaron diferencias significativas en la concentración entre los cuatro rodales, así como de la relación C:N ( $p < 0.05$ ). La concentración más alta se encontró en las muestras incubadas en el rodal cosechado en 1988 (48.5%), mientras que el menor se observó en el de 1998 (47.6%). Por otra parte el cociente más elevado se registró en el rodal cosechado en 2008 (55.4), mientras que el más bajo ocurrió en el bosque sin manejo (36.2). En cuanto al contenido de nitrógeno no se detectaron diferencias significativas ( $p > 0.05$ ) (Tabla 15).

**Cuadro 10.** Porcentajes promedio de carbono y nitrógeno, y la relación C:N en acículas de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en un experimento de descomposición en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal	Carbono (%)	Nitrógeno (%)	C:N
BSM	47.75±0.52ab	1.26±0.15a	38.44±5.14b
1988	48.55±0.19a	1.18±0.14a	41.79±4.85b
1998	47.51±0.80b	1.34±0.79a	42.67±15.72ab
2008	48.16±0.52ab	0.87±0.12a	55.11±8.35a

Letras distintas en sentido vertical denotan diferencias significativas entre los sitios ( $p \leq 0.05$ ).

Tanto el porcentaje de carbono y la relación C:N de las muestras en descomposición siguieron una tendencia oscilante a la baja desde el primer día del experimento que se mantuvo hasta el final del mismo en todos rodales, la oscilación fue menos marcada en el BSM con respecto a lo observado en los rodales intervenidos. Por el contrario el porcentaje de nitrógeno mostró una variación de baja oscilación con tendencia a la alza a lo largo de los días del experimento. Cabe resaltar un porcentaje muy elevado registrado de forma atípica en la muestra recuperada al día 272 en el rodal cosechado en 1998, la posible causa de esta variación puede ser la contaminación de la muestra en el laboratorio, ya que la adición de nitrógeno en campo por escorrentía o alguna otra fuente no detectada no sería suficiente para aumentar el porcentaje en esta magnitud (Figura 35).



**Figura 35.** Porcentajes de carbono y nitrógeno y relación C:N, obtenidos en las muestras incubadas en campo durante un año en un experimento de descomposición de acículas de *Pinus patula* Schtdl. & Cham. en Zacualtipán, Hidalgo.



El mayor contenido inicial promedio de carbono se encontró en las muestras del rodal aprovechado en 2008 (4.53 g) por su parte al término del periodo de incubación en campo el menor contenido promedio de carbono se registró en las muestras del mismo rodal (2.58 g). En cuanto a los contenidos de nitrógeno al inicio del experimento el mayor se registró en las muestras del rodal cosechado en 1988 (0.128 g) y al término del experimento el menor contenido promedio se encontró en las muestras del rodal cosechado en 2008 (0.054 g). El cociente de la relación C:N fue mayor al inicio del experimento en el rodal cosechado en 2008 (69.7) y el menor al final de la incubación se registró en el BSM (37.4) (Cuadro 11).

**Cuadro 11.** Contenidos promedio iniciales y finales de carbono y nitrógeno ( $\pm$  desviación estándar) y la relación C:N en un experimento de descomposición de acículas de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal	Contenido de carbono (g)		Contenido de nitrógeno (g)		C:N	
	Inicial	Final	Inicial	Final	Inicial	Final
BSM	4.41 $\pm$ 0.00c	2.59 $\pm$ 0.35a	0.095 $\pm$ 0.000b	0.069 $\pm$ 0.010ab	46.4c	37.4c
1988	4.51 $\pm$ 0.00b	3.09 $\pm$ 0.05a	0.128 $\pm$ 0.000a	0.085 $\pm$ 0.001a	35.3d	36.5d
1998	4.40 $\pm$ 0.00d	2.68 $\pm$ 0.27a	0.068 $\pm$ 0.000c	0.070 $\pm$ 0.007a	64.9b	38.2b
2008	4.53 $\pm$ 0.00a	2.58 $\pm$ 0.42a	0.065 $\pm$ 0.000d	0.054 $\pm$ 0.009b	69.7a	47.6a

### 5. 3. Caracterización estructural y diversidad arbórea de rodales de diferente edad

#### 5. 3. 1. Análisis estructural de cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo

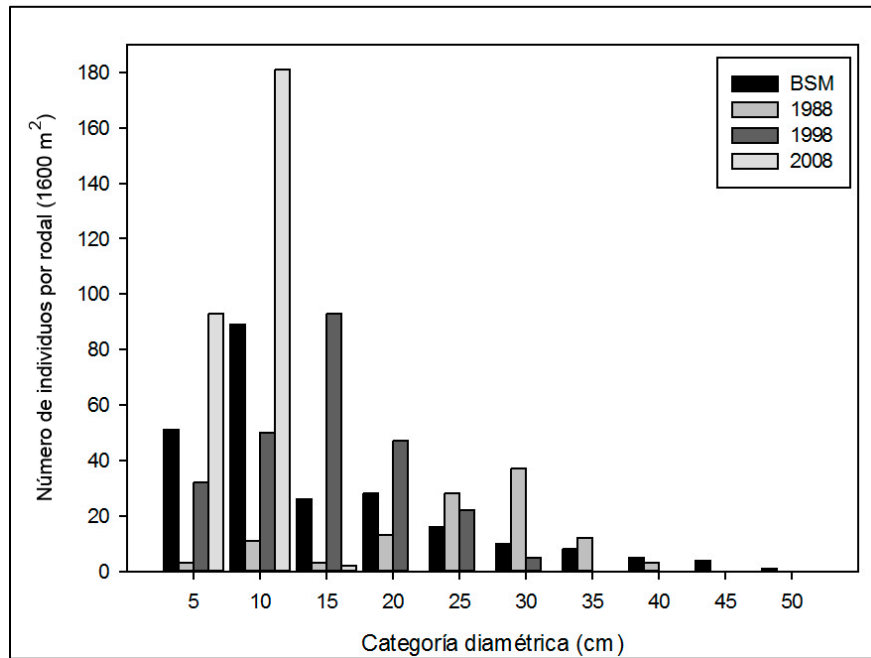
El rodal cosechado en 2008 presentó la mayor densidad arbórea (2299 árboles ha<sup>-1</sup>), mientras que la menor se registró en el rodal aprovechado en 1988 (916 árboles ha<sup>-1</sup>). Las individuos más altos se registraron en el rodal aprovechado en 1988 (33.3 m) y los árboles con diámetros mayores se encontraron en el BSM (49.9 cm) (Cuadro 12).

**Cuadro 12.** Características dasométricas de cuatro rodales con diferente periodo de aprovechamiento en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal	Altitud (msnm)	ET	D (árboles ha <sup>-1</sup> )	H Máxima (m)	H Mínima (m)	DN Máximo (cm)	DN Mínimo (cm)	DC (m)	Edad (años)
<b>BSM</b>	2016	S	1983	31.3	2.3	49.9	2.5	3.9±1.8	80
<b>1988</b>	2068	NE	916	33.3	5.5	40.0	4.4	3.8±1.2	24
<b>1998</b>	2012	S	2074	29.0	2.3	28.8	2.5	3.3±1.2	14
<b>2008</b>	2077	SO	2299	8.9	2.9	12.3	2.5	1.9±0.5	4

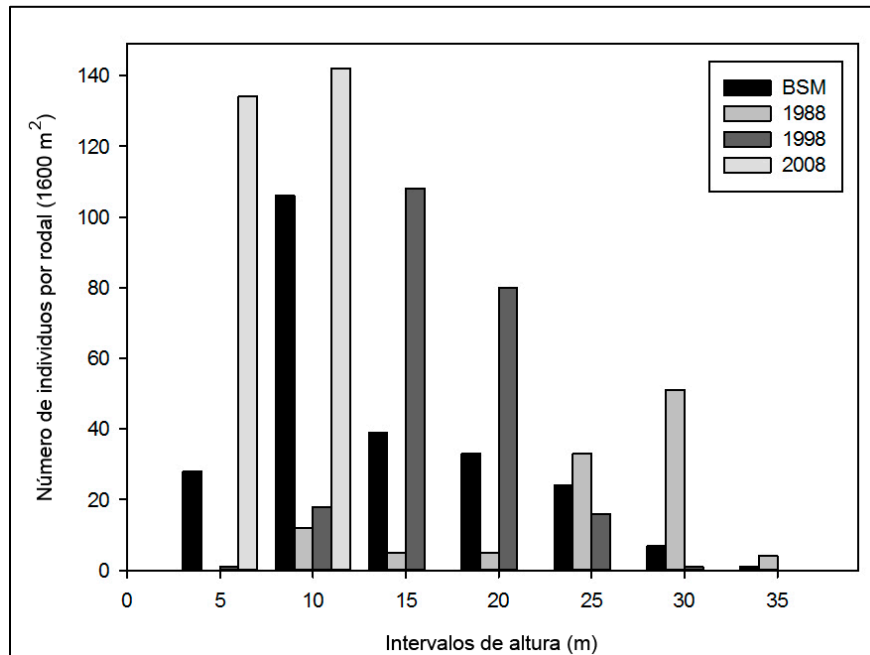
ET= Exposición topográfica; D= Densidad; H= Altura; DN= Diámetro normal y DC= Diámetro de copa (promedio ± desviación estándar).

A partir del histograma de frecuencias para las distribuciones diamétricas se aprecia que en el BSM el diámetro normal mínimo fue de 2.5 cm, mientras que el máximo fue de 49.9 cm, el 58.8% de los individuos tuvieron diámetros menores a 10 cm. Los individuos restantes se distribuyeron en las demás categorías diamétricas, observándose una menor frecuencia conforme aumenta el tamaño de las clases, el total de árboles medidos en dicho rodal fue de 238. En el sitio cosechado en 1988 el rango de diámetros estuvo entre los 4.4 y los 40 cm, este rodal fue el que presentó una menor cantidad de individuos (110) y la distribución diamétrica mostró la agrupación del 72.2% de los árboles en las categorías por encima de los 25 cm. En el rodal aprovechado en 1998 se obtuvieron 249 registros, cuyos diámetros estuvieron entre los 2.5 y los 28.8 cm, la mayor frecuencia se encontró en las clases diamétricas situadas por debajo de los 20 cm (89.2%). Para el rodal más joven la distribución horizontal se mantuvo con mayor frecuencia por debajo de los 10 cm (99.3%), el número total de individuos registrados fue de 276 y el rango de diámetros estuvo entre los 2.5 y los 12.3 cm (Figura 36).



**Figura 36.** Distribuciones diamétricas de los árboles medidos en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Con respecto a la distribución de las alturas registradas en los cuatro rodales, se encontró que en el BSM el estrato dominante (88.2% del total de individuos) se ubicó por encima de los 10 m, al igual que en el rodal cosechado en 1988 (76.4%). En el rodal aprovechado en 1998 el 75.5% de los individuos muestreados presentaron alturas de entre los 15 y los 25 m, mientras que en rodal más joven todos los individuos se agruparon en un intervalo de 2.9 a 8.9 m (Figura 37).



**Figura 37.** Distribuciones de alturas de árboles medidos en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

### 5. 3. 2. Diversidad de especies en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo

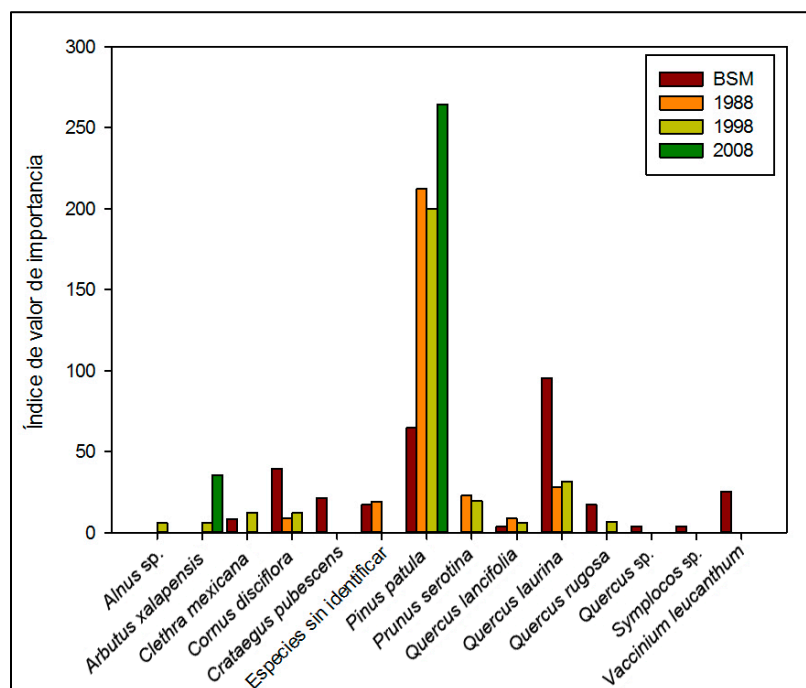
De acuerdo con los índices de Margalef y de Shannon-Wiener el BSM exhibió la mayor riqueza y diversidad de especies en comparación con los otros tres rodales, los bosques cosechados en 1988 y 1998 no difieren estadísticamente ( $p > 0.05$ ) y el de 2008 presenta los menores índices. Por otra parte el índice de Simpson alcanzó su valor más alto en el BSM, mientras que en los demás rodales no existieron diferencias significativas. En cuanto al índice de equidad de Pielou el BSM fue significativamente diferente a los demás rodales ( $p < 0.05$ ), y una vez más el contraste entre los rodales de 24 y 14 años no arrojó diferencias significativas, el menor índice se presentó en el rodal de 4 años (Cuadro 13).

**Cuadro 13.** Índices promedio (desviación estándar) de diversidad y riqueza de cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Índices	BSM	1988	1998	2008
$D_{Mg}$	3.80±0.48a	1.73±0.35b	2.01±0.61b	0.31±0.37c
$H'$	1.68±0.09a	0.54±0.18b	0.58±0.24b	0.08±0.09c
$D_{Sp}$	4.57±0.89a	1.39±0.19b	1.45±0.28b	1.04±0.04b
$J'$	0.83±0.06a	0.43±0.09b	0.38±0.12b	0.11±0.13c

$D_{Mg}$ = Riqueza de Margalef,  $H'$ = Diversidad de Shannon-Wiener;  $D_{Sp}$ = Dominancia de Simpson,  $J'$ = Equidad de Pielou. Distintas letras en sentido horizontal indican diferencias estadísticas.

Con respecto al índice de valor de importancia (IVI) el de *Pinus patula* fue mayor en los rodales cosechados, no así en el bosque sin manejo en donde *Quercus laurina* fue la especie que presentó un IVI más alto. Las demás especies presentan valores menores en los cuatro rodales (Figura 38).



**Figura 38.** Índices de valor de importancia calculados para las especies arbóreas existentes en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

En el caso de los rodales cosechados fue tanto la densidad como la dominancia relativa resultantes de las labores de aprovechamiento de la especie las variables que

mantienen a *Pinus patula* con los índices más elevados, mientras que en el bosque sin manejo fue la densidad relativa el atributo que confiere el mayor IVI a *Quercus laurina* (Cuadro 14).

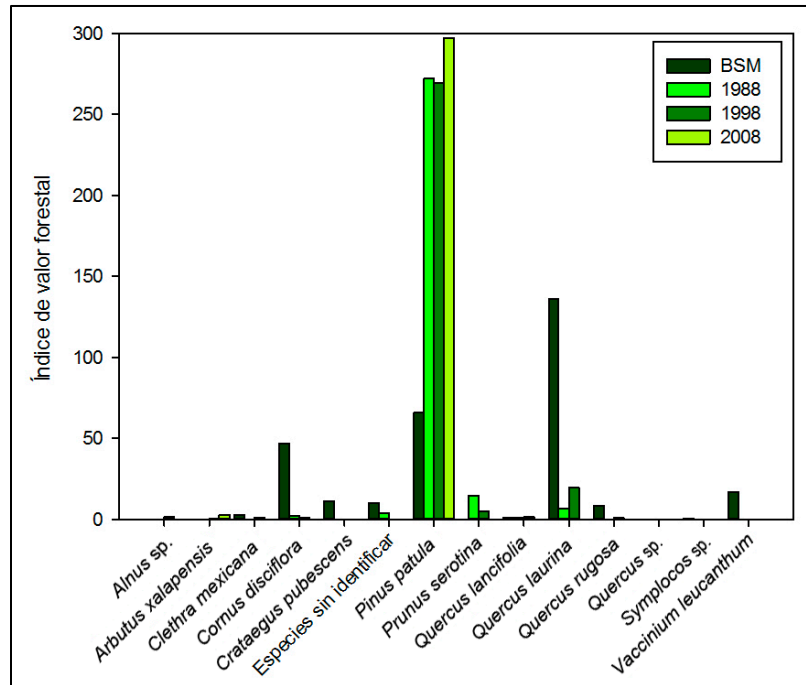
**Cuadro 14.** Índices de valor de importancia para las especies de cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal / Especies	Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )		Dominancia Área Basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		Frecuencia		IVI
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	
<b>BSM</b>							
<i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl	733.04	37.0	17.84	45.4	4	12.9	95.33
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	199.92	10.1	16.34	41.6	4	12.9	64.61
<i>Cornus disciflora</i> DC.	441.49	22.3	1.62	4.1	4	12.9	39.30
<i>Vaccinium leucanthum</i> Cham. & Schldl.	208.25	10.5	0.81	2.1	4	12.9	25.46
<i>Crataegus pubescens</i> (C. Presl) C. Presl	141.61	7.1	0.54	1.4	4	12.9	21.41
Especies desconocidas (4)	133.28	6.7	0.32	0.8	3	9.7	17.21
<i>Quercus rugosa</i> Née	74.97	3.8	1.44	3.7	3	9.7	17.14
<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	24.99	1.3	0.27	0.7	2	6.5	8.39
<i>Quercus lancifolia</i> Schltdl. & Cham.	8.33	0.4	0.05	0.1	1	3.2	3.77
<i>Symplocos</i> sp.	8.33	0.4	0.03	0.1	1	3.2	3.73
<i>Quercus</i> sp.	8.33	0.4	0.01	0.0	1	3.2	3.66
<b>Total</b>	<b>1982.54</b>	<b>100</b>	<b>39.26</b>	<b>100</b>	<b>31</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>1988</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	774.69	84.5	41.56	97.0	4	30.8	212.33
<i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl	41.65	4.5	0.20	0.5	3	23.1	28.09
<i>Prunus serotina</i> subsp. capuli (Cav.) McVaugh	49.98	5.5	0.88	2.0	2	15.4	22.88
Especies desconocidas (3)	33.32	3.6	0.09	0.2	2	15.4	19.23
<i>Cornus disciflora</i> DC.	8.33	0.9	0.06	0.1	1	7.7	8.75
<i>Quercus lancifolia</i> Schltdl. & Cham.	8.33	0.9	0.05	0.1	1	7.7	8.72
<b>Total</b>	<b>916.30</b>	<b>100</b>	<b>42.84</b>	<b>100</b>	<b>13</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>1998</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	1715.98	82.7	28.99	95.0	4	22.2	199.99
<i>Quercus laurina</i> Humb. & Bonpl	241.57	11.6	0.95	3.1	3	16.7	31.42
<i>Prunus serotina</i> subsp. capuli (Cav.) McVaugh	33.32	1.6	0.33	1.1	3	16.7	19.37
<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	24.99	1.2	0.02	0.1	2	11.1	12.39

Rodal / Especies	Densidad (árboles ha <sup>-1</sup> )		Dominancia Área Basal (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		Frecuencia		IVI
	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	
	<i>Cornus disciflora</i> DC.	16.66	0.8	0.01	0.0	2	
<i>Quercus rugosa</i> Née	16.66	0.8	0.02	0.1	1	5.6	6.42
<i>Alnus</i> sp.	8.33	0.4	0.09	0.3	1	5.6	6.24
<i>Quercus lancifolia</i> Schltld. & Cham.	8.33	0.4	0.07	0.2	1	5.6	6.19
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	8.33	0.4	0.03	0.1	1	5.6	6.04
<b>Total</b>	<b>2074.17</b>	<b>100</b>	<b>30.50</b>	<b>100</b>	<b>18</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>2008</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltld. & Cham.	2274.09	98.9	5.83	98.8	4	66.7	264.40
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	24.99	1.1	0.07	1.2	2	33.3	35.60
<b>Total</b>	<b>2299.08</b>	<b>100</b>	<b>5.90</b>	<b>100</b>	<b>6</b>	<b>100</b>	<b>300</b>



Con respecto a los índices de valor forestal (IVF) calculados las especies con un mayor índice fueron *Quercus laurina* en el BSM y *Pinus patula* en los demás rodales (Figura 39). Esto confirma la importancia de *P. patula* en los tres sitios aprovechados debido a que esta es la especie sobre la cual se basa el aprovechamiento comercial en el ejido, es por ello que todas las labores silviculturales esta orientadas a sus existencias.



**Figura 39.** Índices de valor forestal calculados para las especies arbóreas existentes en cuatro rodales con diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

El mayor IVF para *Quercus laurina* en el bosque sin manejo obedece a que esta especie presentó la mayor altura y cobertura relativa mientras que en los rodales bajo manejo la combinación de los tres atributos medidos contribuyeron al IVF más alto para *Pinus patula* (Cuadro 15).

**Cuadro 15.** Índices de valor forestal para las especies de cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Rodal / Especies	Diámetro (m ha <sup>-1</sup> )		Altura (m ha <sup>-1</sup> )		Cobertura (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		IVF
	Absoluto	Relativo	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	
<b>BSM</b>							
<i>Quercus laurina</i> Bonpl	13.39	10.5	1197.90	45.1	6161.92	45.4	136.13
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	7.50	25.4	573.70	21.6	2519.97	18.6	65.70
<i>Cornus disciflora</i> DC.	3.30	3.0	433.80	16.3	2633.47	19.4	46.97
<i>Vaccinium leucanthum</i> Cham. & Schldl.	1.60	2.3	154.60	5.8	743.80	5.5	16.75
<i>Crataegus pubescens</i> (C. Presl) C. Presl	1.05	2.9	124.65	4.7	412.24	3.0	11.31
Especies desconocidas (4)	0.82	4.6	113.60	4.3	379.10	2.8	9.87
<i>Quercus rugosa</i> Née	1.23	10.4	10.50	0.4	533.57	3.9	8.53
<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	0.31	6.9	29.60	1.1	85.33	0.6	2.80
<i>Quercus lancifolia</i> Schltdl. & Cham.	0.09	18.3	8.10	0.3	61.83	0.5	1.05
<i>Symplocos</i> sp.	0.07	5.8	6.20	0.2	15.27	0.1	0.58
<i>Quercus</i> sp.	0.03	9.8	3.20	0.1	12.06	0.1	0.30
<b>Total</b>	<b>29.37</b>	<b>100</b>	<b>2655.85</b>	<b>100</b>	<b>13558.55</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>1988</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	23.78	93.9	2346.00	93.3	4413.69	84.9	272.01
<i>Prunus serotina</i> subsp. capuli (Cav.) McVaugh	0.76	3.0	78.80	3.1	438.88	8.4	14.56
<i>Quercus laurina</i> Bonpl	0.38	1.5	44.80	1.8	166.32	3.2	6.47
Especies desconocidas (3)	0.23	0.9	27.50	1.1	89.60	1.7	3.72
<i>Cornus disciflora</i> DC.	0.10	0.4	9.10	0.4	67.73	1.3	2.05
<i>Quercus lancifolia</i> Schltdl. & Cham.	0.09	0.3	9.00	0.4	25.45	0.5	1.19
<b>Total</b>	<b>25.33</b>	<b>100</b>	<b>2515.20</b>	<b>100</b>	<b>5201.66</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>1998</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	28.56	92.1	3131.30	92.3	6855.30	85.1	269.42
<i>Quercus laurina</i> Bonpl	1.57	5.1	178.50	5.3	739.00	9.2	19.51
<i>Prunus serotina</i> subsp. capuli (Cav.) McVaugh	0.38	1.2	29.30	0.9	225.88	2.8	4.89
<i>Alnus</i> sp.	0.12	0.4	10.80	0.3	70.43	0.9	1.56

Rodal / Especies	Diámetro (m ha <sup>-1</sup> )		Altura (m ha <sup>-1</sup> )		Cobertura (m <sup>2</sup> ha <sup>-1</sup> )		IVF
	Absoluto	Relativo	Absoluta	Relativa	Absoluta	Relativa	
<i>Quercus lancifolia</i> Schltdl. & Cham.	0.11	0.3	9.10	0.3	56.55	0.7	1.31
<i>Cornus disciflora</i> DC.	0.05	0.2	10.30	0.3	44.17	0.5	1.02
<i>Clethra mexicana</i> A. DC.	0.10	0.3	12.60	0.4	24.94	0.3	1.02
<i>Quercus rugosa</i> Née	0.07	0.2	7.60	0.2	21.68	0.3	0.73
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	0.06	0.2	4.55	0.1	17.15	0.2	0.55
<b>Total</b>	<b>31.03</b>	<b>100</b>	<b>3394.05</b>	<b>100</b>	<b>8055.11</b>	<b>100</b>	<b>300</b>
<b>2008</b>							
<i>Pinus patula</i> Schltdl. & Cham.	15.06	98.8	1383.80	99.1	3250.57	99.2	297.16
<i>Arbutus xalapensis</i> Kunth	0.18	1.2	12.00	0.9	26.39	0.8	2.84
<b>Total</b>	<b>15.24</b>	<b>100</b>	<b>1395.80</b>	<b>100</b>	<b>3276.96</b>	<b>100</b>	<b>300</b>

De acuerdo con el análisis de correlación de Spearman se observan correlaciones significativas entre la producción de hojarasca, el área basal y la cobertura de copas. Mientras que para el análisis entre las tasas de descomposición y la altura se observa una correlación significativa en sentido negativo (Cuadro 16).

**Cuadro 16.** Análisis de correlación entre la producción de hojarasca, la descomposición de acículas y variables dasométricas en cuatro rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo.

Proceso	Área basal		Cobertura		Densidad		Altura	
	$\rho$	P	$\rho$	P	$\rho$	P	$\rho$	P
Producción	0.550	0.027*	0.818	0.000*	-0.051	0.839	0.300	0.252
Descomposición	0.021	0.935	0.059	0.822	0.492	0.051	-0.735	0.000*

$\rho$ = coeficiente de correlación de Spearman, P= probabilidad ( $\alpha=0.05$ ). El asterisco indica correlación significativa.

## 6. DISCUSIÓN

### 6. 1. Producción de hojarasca fina en rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo

La alteración de la cubierta vegetal a través de los tratamientos silvícolas se ve reflejada en los procesos de producción y descomposición de hojarasca, los cuales sostienen a los bosques durante el reciclaje de nutrientes (Waring y Schlesinger, 1985; Shure y Phillips, 1987; Facelli y Pickett, 1991; Díaz-Pinés *et al.*, 2011). Los efectos dependen del grado e intensidad de la alteración y pueden reducir la resiliencia del ecosistema y en última instancia su productividad (Spurr y Barnes, 1982; Nyland, 2002; Hättenschwiler, 2005; Descheemaeker *et al.*, 2006). La producción de hojarasca está mediada tanto por factores ambientales como por los ciclos fenológicos de las especies, la composición de las masas forestales y su estructura (Herbohn y Congdon, 1993; Aber *et al.*, 2001; Berg y Laskowsky, 2005; Gadow *et al.*, 2012; Gutiérrez-Vázquez *et al.*, 2012).

En este estudio se reportan diferencias entre las cantidades de hojarasca fina producida en el BSM y los rodales sometidos a extracción comercial. La mayor producción sucede en el BSM ( $6570.33 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ) mientras que la menor ocurre en el sitio cosechado en 2008 ( $175.09 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). La cantidad de hojarasca registrada en este trabajo en el BSM se sitúa por encima de lo reportado por Pérez-Suárez *et al.* (2009) para un bosque de pino-encino (*P. cembroides* y *Q. potosina*) ubicado en una región semiárida del centro de México, en donde se reporta una acumulación anual de hojarasca fina de  $5600 \text{ kg ha}^{-1}$ , y de lo registrado por González-Rodríguez *et al.* (2011) en bosques de *P. pseudostrobus* y *Quercus* spp. en el estado de Nuevo León ( $4400 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ). Así mismo la caída de hojarasca registrada en el BSM en este trabajo se ubica por debajo de lo reportado para un bosque de pino-encino (*P. pseudostrobus* y *Q. crassifolia*) localizado en Chiapas en donde se reporta una producción anual de  $7590 \text{ kg ha}^{-1}$  de hojarasca (Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial, 2009). Las diferencias entre

estos trabajos se pueden atribuir principalmente a la precipitación, la temperatura y el tipo de suelo característico de cada localidad, que de acuerdo con diversos autores definen los patrones en la caída de hojarasca a una escala regional (Berg y Laskowsky, 2005; Bernier *et al.*, 2008; Pérez-Suárez *et al.*, 2009; Chave *et al.*, 2010).

El análisis de correlación entre la producción de hojarasca total en los cuatro rodales y las variables climáticas evaluadas solo arroja una correlación significativa en sentido positivo entre el rodal cosechado en 1988 y la velocidad del viento, esto se puede deber a que este sitio exhibe una exposición topográfica hacia el noreste, mientras que los demás rodales presentaron una exposición sur y suroeste. Las variables climatológicas precipitación y temperatura atmosférica no se correlacionan significativamente con la caída de hojarasca. Huber y Oyarzún (1983), Gutiérrez-Vázquez *et al.* (2012) y Reyes-Carrera *et al.* (2013) reportaron correlaciones significativas entre la caída de hojarasca y la velocidad del viento, en este estudio solo se obtuvieron datos de una estación meteorológica cercana por lo que los datos climatológicos correlacionados fueron los mismos para los cuatro rodales, entre estos la intensidad y la dirección promedio del viento. De esta manera se puede afirmar que partiendo de una misma intensidad del viento para los cuatro rodales con diferente exposición, el patrón de la caída de hojarasca se ve más influenciado por la dirección del viento.

De acuerdo con el análisis de correlación la diferencia entre la producción de hojarasca fina de los cuatro rodales encontrada en este estudio, se debe principalmente a la diversidad de especies y a algunas de las características estructurales que este atributo confiere a cada rodal, específicamente el área basal y la cobertura de copa. En el BSM se registró un área basal de  $39.3 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  y una cobertura de  $13558.6 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ , mientras que en el rodal aprovechado en 2008 se reportan los siguientes valores  $5.90 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de área basal y  $3276.96 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de cobertura. Estas fluctuaciones se deben a la diversidad y riqueza de especies arbóreas observadas en ambos sitios, ya que en el BSM se estiman los mayores índices de Margalef ( $D_{Mg} = 3.80$ ) y Shannon-Wiener

( $H'=1.68$ ) con respecto a los demás rodales. La mayor edad del BSM explica una área basal mayor debido a la cantidad de individuos por unidad de área, mientras que la cobertura se explica a partir de la presencia de especies latifoliadas con copas con dimensiones más grandes que las de *P. patula*. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Pérez-Suárez *et al.* (2009) quien encontró una mayor producción de hojarasca a medida que aumentaba la mezcla de especies en los sitios de su trabajo. Por otra parte Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial (2009), reportan una producción mayor de hojarasca en función del aumento en el área basal de los rodales evaluados. Berg y Laskowsky (2005) mencionan que cuando se evalúa la caída de hojarasca a nivel local, la diferencia entre los patrones está determinada por las características estructurales de los rodales, en particular por la edad, el área basal y la cobertura de copa, debido a que comparten similitudes edafológicas y climáticas. La estructura de un rodal está influenciada por la diversidad de especies en él, debido a las variaciones en tamaños y tipos de crecimiento (Gadow *et al.*, 2012).

Con respecto a los componentes que conforman la hojarasca fina recolectada en los cuatro rodales estudiados fue la fracción foliar (*P. patula*, *Quercus spp.* y otras latifoliadas) la que se presenta en mayores cantidades conformando el 79% en el BSM y del 71.8 al 80.1% en los rodales manejados. Mientras que los fragmentos leñosos (ramillas y corteza) representan el segundo componente más abundante en los cuatro rodales y los misceláneos aportan las menores cantidades a la hojarasca fina total. En trabajos con otras especies de pino se ha observado el mismo patrón, reportándose porcentajes de 83.1% en bosques dominados por *Pinus radiata*, 92.3% por *P. greggii*, 79.1% por *P. halepensis*, 76.9% por *P. cembroides* y 72% en rodales de *P. oocarpa* (Huber y Oyarzún, 1983; Rocha-Loredo y Ramírez-Marcial, 2009; Gutiérrez-Vázquez *et al.*, 2012; López-López *et al.*, 2013). Este patrón se encuentra claramente relacionado con la fenología de las especies, además de las dimensiones de las estructuras tomadas en cuenta para el experimento (diámetro <2 cm), si se hubieran recolectado componentes de mayor tamaño el patrón sería distinto debido a la variación en los

pesos. Berg y Laskowsky (2005) mencionan que la edad de los rodales es el factor que define la proporción de los componentes de la hojarasca en rodales sin manejo.

De acuerdo con el análisis de correlación de Pearson la velocidad del viento se relaciona significativamente con la caída de acículas en el rodal cosechado en 1988, así como con la deposición de fragmentos leñosos en ese mismo rodal y en el cosechado en 1998. En el rodal de 24 años la influencia del viento sobre la producción de los dos componentes citados se puede deber tal como se mencionó anteriormente a la exposición del sitio combinada con el ciclo de abscisión que coincide en tiempo con la ocurrencia de los vientos más intensos. Por otra parte en el sitio cosechado en 1998 la correlación de la caída de fragmentos leñosos y la velocidad del viento se puede atribuir a la densidad del sitio ( $2074 \text{ árboles ha}^{-1}$ ) combinada con una frecuencia alta de individuos con alturas de entre los 15 y los 20 m. Huber y Oyarzún (1983) reportan una mayor influencia del viento que de los ciclos fenológicos en la caída de las acículas de *P. radiata*. Así mismo Gutiérrez-Vázquez *et al.* (2012) reportan una correlación significativa entre la caída de acículas de *P. cembroides* y rachas intensas de viento.

En cuanto al patrón temporal de la caída de hojarasca en los rodales analizados se observa en general un patrón unimodal con la menor producción en los primeros meses del experimento (julio-noviembre) en donde ocurren ligeras oscilaciones y un periodo de máxima producción ascendente entre los meses de diciembre a mayo. El periodo de producción mayor corresponde a los meses más secos, etapa en la que los árboles tienden a realizar un menor gasto energético en aras de la subsistencia, dando paso a la abscisión de las hojas fotosintéticamente menos rentables en aras de su subsistencia (Bidwell, 1993; Adl, 2003; Taiz y Zeiger, 2006; Bernier *et al.*, 2008). La fracción foliar es el componente más abundante en la hojarasca fina, es por ello que sus patrones estacionales se reflejan en el patrón de la totalidad de la hojarasca.

El rodal en el que se registró la hojarasca con los mayores contenidos de carbono y nitrógeno en el experimento fue el BSM ( $3115.8 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  y  $54.6 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ )



mientras que los menores se registraron en el rodal cosechado en 2008 (85.2 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 1.6 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). La calidad de la hojarasca está determinada por varios factores entre los cuales se pueden mencionar: la diversidad de especies y las características estructurales de los rodales (Berg y Laskowsky, 2005; Pérez-Suárez *et al.*, 2009), por estas razones se puede explicar que la hojarasca recolectada en el BSM presente las concentraciones más elevadas en comparación con los rodales manejados. En cuanto a los valores de la relación C:N el máximo después de un año se registró en el rodal cosechado en 1988 (63.9) mientras que el mínimo ocurrió en el rodal aprovechado en 2008 (52.8). Los valores de esta relación están principalmente influenciados por la cantidad de nitrógeno la cual es mayor en los sitios más diversos debido a que aumenta la disponibilidad de este nutriente respecto a la variabilidad de especies, además de que dicho elemento está influenciado también por la edad de los individuos y la magnitud del disturbio. Se ha encontrado que árboles que crecen en sitios empobrecidos tienden a realizar un ahorro de nutrientes mediante la traslocación de los mismos antes del proceso de abscisión (Hoobie, 1992).

Guardando las debidas proporciones respecto a las diferencias en la latitud y en las especies, el contenido de carbono estimado en el BSM se sitúa por encima de lo reportado para un bosque de pino-encino (*Pinus sylvestris-Quercus pyrenaica*) localizado en España en donde se registraron valores medios de 1500 a 2100 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (Díaz-Pines *et al.*, 2011). Por otra parte Chaturvedi y Singh (1987) reportan una cifra 74 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en la hojarasca analizada en un bosque natural de *P. roxburghii* en India; mientras que Roig *et al.* (2005) reportan un contenido de nitrógeno anual en la hojarasca de 4.791 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en un bosque de *P. pinaster* en España. Las características y la combinación de especies, el tipo de suelo y las variables climatológicas pueden ser los principales factores que ocasionan la variación en las cantidades de bioelementos estimadas en estos trabajos, dichas características son postuladas por Berg y Laskowsky (2005) como agentes de variación a una escala continental.

Con respecto a los contenidos promedio de C y N analizados en las estructuras de la hojarasca por separado no se observaron diferencias significativas entre rodales ni entre tiempos para las fracciones conformadas por las acículas de *P. patula* y las hojas de *Quercus* spp. Esto puede obedecer a las estrategias fisiológicas de ambas especies. Se sabe que la reabsorción de nutrientes previa a la senescencia varía respecto a factores tales como el estrés hídrico. Dicha variación no se hace visible en la escala espacio-temporal de este trabajo (Berg y Laskowsky, 2005).

Por otra parte el contenido de nitrógeno en las hojas de otras latifoliadas fue diferente entre los rodales evaluados, además de la relación C:N. En los fragmentos leñosos también se encontraron diferencias entre los rodales para el contenido de N, así como entre el contenido de C de los misceláneos. Las diferencias en el contenido de bioelementos en los componentes antes mencionados en los cuatro rodales se puede atribuir a la diversidad de especies, los componentes estructurales varían de acuerdo con la fisiología de cada especie lo que se refleja en composiciones químicas diferentes (Mendoza-Ponce y Galicia, 2010). Fassnacht y Gower (1999) reportan en un trabajo realizado en bosques de coníferas que más que la diversidad de especies es el contenido de nutrimentos disponibles en el suelo lo que ocasiona las diferencias antes mencionadas, si bien en este trabajo no se analizaron las composiciones químicas del suelo Barrales-Brito (2013) reporta diferencias en el contenido de C en el suelo de cinco rodales manejados en el ejido Atopixco, lo cual permite inferir la posible influencia de la disponibilidad de nutrimentos sobre el contenido de C y N en la hojarasca evaluada en este trabajo.

Con respecto a las tasas de flujo de C y N en la hojarasca total, las mayores se encontraron en el BSM para ambos elementos con 2604.66 y 44.73 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente, mientras que las menores ocurren en el rodal más joven (70.22 y 1.28 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Estos valores son menores a los reportados por Ramírez *et al.* (2014) en una plantación de *P. patula* de 39 años en Colombia, donde se mencionan tasas de retorno de carbono y nitrógeno de 3363 y 63.1 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente, cabe

mencionar que dicha plantación se estableció con fines de restauración ecológica. La diferencia entre las tasas de retorno registradas en estos bosques se debe a que existe una mayor producción de hojarasca en el bosque de Colombia. El patrón de las tasas de retorno entre los rodales de este trabajo es consistente con lo que reportan Triadiati *et al.* (2011) en su investigación desarrollada en 3 sistemas agroforestales en Indonesia, donde concluyen que en rodales con escaso disturbio se dan mayores flujos de C y N. Este comportamiento está dado en gran medida por el mayor volumen de hojarasca colectado en los sitios sin intervención en comparación con bosques manejados, las características estructurales de cada rodal marcan la pauta en los patrones de tasas de retorno debido a la ecuación que se utiliza para su estimación.

En cuanto a las tasas de retorno anuales de carbono y nitrógeno calculadas por separado para los componentes de la hojarasca las mayores se encontraron en las acículas de *Pinus patula* en los rodales manejados (1065.09 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 20.88 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y en las hojas de *Quercus* spp., en el BSM. Con esto se hace visible que en general para los bosques no intervenidos del Ejido Atopixco las especies de encino son las que aportaron más C y N al suelo mediante la caída de hojarasca foliar (1387.43 y 24.20 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> respectivamente), en comparación con los valores calculados para *P. patula* (342.27 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 5.20 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>) y todas las demás especies arbóreas (327.48 kg C ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y 6.42 kg N ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), lo cual es lógico debido a que esta especie es la que presenta el mayor IVI en el rodal evaluado. Mujuru *et al.* (2014) encontraron una influencia significativa de la edad del rodal sobre el contenido de C y N en la hojarasca de plantaciones comerciales de *P. patula* en Zimbabue, reportando cantidades de 9300 kg C ha<sup>-1</sup> y 300 kg N ha<sup>-1</sup> en rodales de 30 años. La incidencia de mayores tasas de flujo de C y N en el bosque sin intervención concuerda con lo encontrado en diversos trabajos donde se ha comprobado una mayor cantidad y flujo de estos elementos en la hojarasca de bosques mixtos con respecto a los aportes ocurridos en bosques puros y entre bosques sin manejo respecto a rodales bajo aprovechamiento maderable. Hobbie (1992) reporta que se producen mayores concentraciones de nutrimentos en bosque mixtos debido a la mezcla de especies que

ocurre en rodales de mayor edad. Prescott (2002) menciona que una mayor mezcla de especies ocasiona una mayor calidad en la hojarasca producida en el bosque, lo cual se reflejara en última instancia en la disponibilidad de nutrimentos en el ecosistema, además de que la mayor variedad de nutrimentos se presenta en bosques sin intervención.

## **6. 2. Descomposición de acículas de *Pinus patula* en rodales de diferente edad en Zacualtipán, Hidalgo**

En el experimento de descomposición de acículas el porcentaje de masa remanente registrado al final de la incubación en campo no fue diferente entre los cuatro rodales analizados. La menor masa remanente se registró en el rodal más joven (2008) donde el porcentaje estimado promedio fue de 59.1%, en contraste con el mayor encontrado en el rodal cosechado en 1988 (70.3%). Enfocándonos en el posible efecto de la temperatura del suelo y con base en la estimación de la misma por medio de los registradores no se encontraron diferencias entre las exhibidas en los cuatro rodales. Cabe mencionar además que en rodales influenciados por condiciones ambientales similares la variación en la descomposición se atribuye a la calidad de la hojarasca (Cotrufo *et al.*, 2009). Lavelle y Spain (2001) describen la influencia de diversos factores que afectan a la descomposición en una escala jerárquica espacio-temporal postulando a la actividad biológica, el tipo de vegetación y la calidad de la hojarasca como los principales causales de variación en las tasas de descomposición a una escala temporal de menos de 100 años y sobre superficies inferiores o iguales a una hectárea, dicha escala es la misma en la que se desarrolló este trabajo.

El patrón exhibido por la pérdida de masa remanente a través del tiempo en los cuatro rodales se caracterizó por una rápida disminución en el peso durante los primeros 180 días y una tendencia a la estabilización durante los días restantes del experimento. Esto concuerda con lo revisado en diversos trabajos con *Pinus* spp., en los cuales se explica este comportamiento debido a la liberación de los compuestos más solubles

(proteínas, ácidos nucleicos, celulosa y hemicelulosa) en la primera fase de la descomposición y la permanencia de los compuestos caracterizados por una mayor complejidad en su estructura química (lignina y compuestos polifenólicos), proyectando un proceso de descomposición de 2 a 3 fases, en la que en los primeros días llega a desaparecer hasta el 40% de la hojarasca (Melillo *et al.*, 1989; García-Plé *et al.*, 1990; Heal *et al.*, 1997; Pausas, 1997; Pérez-Suárez, 2009).

En cuanto a las tasas de descomposición encontradas en este trabajo no se detectaron diferencias estadísticamente significativas entre los rodales después de los 365 días del experimento, esto se debe a que no se encontraron diferencias entre los porcentajes de masa remanente y este parámetro se utiliza en el cálculo de dichas tasas mediante la fórmula de Olson (1963). La tasa más alta se registró en el rodal aprovechado en el 2008 ( $k= 0.56$ ) mientras que la más baja se registró en el rodal cosechado en 1988 ( $k= 0.37$ ). Estas tasas se sitúan ligeramente por debajo de las reportadas por León *et al.* (2011) en una plantación de 43 años en Colombia ( $k= 0.7$ ) Este sitio tiene una precipitación media mayor a la que ocurre en el ejido Atopixco y una densidad menor, lo que le podría conferirle características microclimáticas que favorecen una mayor descomposición por influencia en la comunidad de los descomponedores. La tendencia observada en las tasas de descomposición en este trabajo sugieren que la descomposición más rápida ocurre en el rodal cosechado en 2008, aun y cuando dicho rodal es el que presenta valores iniciales y promedios ligeramente más bajos de N y una relación C:N más elevada. Lo anterior es contrastante con lo mencionado por Williams y Gray (1974), Melillo *et al.* (1989) y White (2006) en cuyos trabajos postulan al nitrógeno como el constituyente químico más importante en la primer fase de la descomposición y un valor de alrededor de 20-25 como el óptimo en la relación C:N para una mayor eficiencia de los organismos descomponedores.

Los valores de la relación C:N encontrados en este trabajo (entre 38.44 y 55.11) nos permiten inferir una mala calidad en las acículas evaluadas por lo que las tasas de

descomposición se consideran bajas, esto concuerda con lo reportado para la mayoría de las coníferas, cuyo contenido de nitrógeno está asociado a la retención de las acículas en los árboles y a los altos contenidos de lignina (Heal *et al.*, 1997).

Estos resultados pueden explicarse por el efecto del microclima ya que si bien no se encontraron diferencias significativas en las temperaturas del suelo existe un valor ligeramente más elevado en el rodal cosechado en 2008 como consecuencia de presentar la menor cobertura de copa; esto aunado a la tasa de retorno de nitrógeno presentada en este rodal sugiere que el suelo presenta una cantidad limitada de este elemento. Heal *et al.* (1997) mencionan que al ocurrir concentraciones limitadas de nitrógeno utilizable por los descomponedores en el suelo el efecto de la temperatura del suelo sobre la descomposición se vuelve mayor.

De acuerdo con los análisis de regresión múltiple las tasas de descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* solo se relacionó de forma significativa negativa con la humedad relativa en los rodales cosechados en 1988, 2008 y en el BSM. Dicho análisis no mostró significancia en las relaciones entre los patrones de las tasas de descomposición con las demás variables climáticas analizadas por si solas o en combinación. Esto difiere con lo reportado por Salah y Scholes (2011), quienes encontraron una relación significativa de orden positivo entre la descomposición y la temperatura en acículas de *P. patula* incubadas en plantaciones fertilizadas en Sudáfrica. Por su parte Zhang *et al.* (2008) reportan a través de un trabajo realizado con bases de datos de experimentos de descomposición a escala global con varias especies, que la combinación de variables tales como la temperatura, la latitud y la calidad del sustrato explicaban alrededor del 87% de la variación en las tasas de descomposición. Por otra parte Murphy *et al.* (1998) reportaron que la precipitación y el contenido de lignina eran los factores que explicaban mejor la variación en las tasas de descomposición de *P. edulis* ( $R^2= 0.922$ ). Lo anterior puede explicarse debido a las características estructurales del de los rodales, de los cuatro fue el rodal cosechado en 1988 el que presentó intervalos diamétricos e individuos con las alturas más elevadas

pero también la menor densidad debido a los tratamientos intermedios que se aplicaron meses antes del experimento, lo que pudo haber conducido a un patrón irregular de la humedad relativa en este rodal.

### **6. 3. Análisis estructural de rodales manejados en el ejido Atopixco**

Los cuatro rodales resultaron diferentes significativamente en la mayoría de sus características dasométricas entre las cuales se enumeran la altura, el diámetro normal y el diámetro de copa ( $p < 0.001$ ). Mientras que las densidades (árboles por hectárea) no difirieron en los 4 sitios ( $p = 0.115$ ). Los individuos con mayores diámetros normales se registraron en el BSM (49.9 cm), mientras que los más altos (33.3 m) se reportaron en el rodal cosechado en 1988. Todo esto resultado del manejo que se realiza en los tres rodales con aprovechamiento en los que se generan intencionalmente mayores frecuencias en ciertas categorías diamétricas con el objetivo de obtener los mejores rendimientos maderables de la especie comercial (*P. patula*). Dicha especie aumentó drásticamente en abundancia, dominancia, frecuencia, IVI e IVF en los rodales cosechados en 1988 y 2008 con respecto al BSM. Por otra parte el rodal cosechado en 1998 presentaba un perfil similar al BSM debido a que no se hacen visibles tratamientos intermedios recientes. Esto concuerda con lo reportado por Hernández-Salas *et al.* (2013) en un bosque templado de pino-encino ubicado en Chihuahua donde se realiza aprovechamiento sobre especies del género *Pinus* spp. en detrimento de la población de *Quercus* spp. Los objetivos de los tratamientos intermedios en un bosque manejado son asegurar la composición, la calidad de los fustes, el espaciamiento y en general las características de crecimiento deseables dentro de un rodal. A partir de los resultados de este estudio podemos apreciar como dichos tratamientos son los agentes principales del cambio en las características dasométricas de los rodales evaluados (Perry, 1994).

Los resultados del análisis de los índices estructurales clasifican a *Pinus patula* con los mayores índices de valor de importancia e índices de valor forestal en los sitios con

manejo, mientras que en el BSM *Quercus laurina* fue la especie con los mayores índices. La estimación de los índices se deriva de las características dasométricas medidas en los cuatro rodales (dominancia, densidad, frecuencia relativa, área basal, diámetros y alturas), es por ello que en los sitios manejados los mayores promedios de todas las mediciones se presentan en la especie comercial en contraste con lo que ocurre en el bosque no intervenido. Los resultados directos del cambio en la estructura del bosque resultante del manejo forestal son la conformación de masas coetáneas y uniformes en los planos vertical y horizontal, con ello se favorece la presencia de algunas especies competidoras las cuales serán removidas por medio de los tratamientos intermedios en caso de que afecten el establecimiento y la regeneración de la especie de utilidad comercial (Castelán-Lorenzo y Arteaga-Martínez, 2009). En este estudio se observó de manera general que tanto el BSM como el cosechado en 1998 presentaban dos estratos bien desarrollados, en ambos el acceso fue difícil dado que el estrato herbáceo estaba conformado principalmente por zarzamora (*Rubus* sp.) y otras enredaderas con alturas de hasta 2 m aproximadamente. En contraste en el rodal cosechado en 1988 se había llevado a cabo un aclareo días antes al establecimiento del experimento lo cual generó un bosque más abierto con un estrato herbáceo muy incipiente. Por su parte el rodal más joven presentaba un estrato herbáceo con un tamaño promedio de 60 cm y un estrato arbóreo constituido por arboles de altura baja.

El manejo de los bosques en el ejido Atopixco también incidió en la diversidad de los sitios estudiados, la mayor diversidad y riqueza de especies se calculó para el BSM de acuerdo con los índices de Margalef ( $3.80 \pm 0.48$ ) y de Shannon-Wiener ( $1.68 \pm 0.09$ ) más elevados. En este mismo rodal se encontraron los índices de Simpson y Pielou más elevados ( $4.57 \pm 0.89$  y  $0.83 \pm 0.06$  respectivamente). En general se pudieron identificar 7 especies arbóreas en el bosque sin manejo mientras que en los rodales con aprovechamiento hubo una disminución gradual en la abundancia de las mismas. En un estudio realizado en un bosque de *P. patula* localizado en Oaxaca se encontró un aumento en la diversidad estructural (diámetros y alturas) con respecto a la edad de los



rodales (Castellanos-Bolaños *et al.*, 2008). Hernández-Salas *et al.* (2013) reportaron una sustitución de dominancia gradual después de 20 años en un bosque de pino-encino resultado de las prácticas de manejo en un ejido de Chihuahua, donde la especie comercialmente aprovechable sustituyó paulatinamente los valores ocupados por otras especies presentes en un bosque sin intervención. La reducción de la diversidad arbórea en un bosque sometido a manejo se ve reflejada en la disminución de la heterogeneidad de la hojarasca producida. Esto genera un descenso en la variabilidad de nutrimentos y demás elementos que entran al suelo, con ello se altera directamente la población de organismos descomponedores (Adl, 2003; Wardle, 2005). De no ocurrir un adecuado manejo este tipo de prácticas a la larga pueden generar un empobrecimiento en el suelo y una disminución en la productividad primaria del ecosistema (White, 2006).

La importancia de analizar la estructura del bosque en este trabajo radica en el aprovechamiento que se realiza en los rodales evaluados y como está influye en los procesos de producción de y descomposición de la hojarasca. Las correlaciones entre el promedio total de la producción de hojarasca fina con las variables dasométricas corroboran que dicha producción aumenta con el incremento en las dimensiones de los árboles (área basal y cobertura de copa). Williams-Linera y Tolome (1996) reportan una correlación significativa y positiva en la caída de hojarasca en un bosque templado situado en Veracruz donde describen una mayor deposición de residuos por parte de las especies dominantes en los rodales evaluados. Kim *et al.* (1996) mencionan que a medida que cambia la cubierta original de un bosque ocurre una disminución gradual en la cantidad de hojarasca depositada en el suelo. Con el cambio en la estructura del mantillo se pueden esperar además alteraciones a nivel de microclima que pueden afectar al proceso de descomposición y a los descomponedores por disminución del sustrato a degradar.

En cuanto a las variables dasométricas y el experimento de descomposición de acículas de *P. patula* se observó una correlación significativa en sentido negativo de las

tasas de descomposición y la altura de los árboles. Esto se puede deber a que las condiciones de los rodales con individuos de mayor tamaño permiten la entrada de mayor radiación solar aumentando con ello la temperatura en el suelo y la humedad ambiental. Gutiérrez *et al.* (1994) mencionan que al ocasionar claros en el dosel como consecuencia de las actividades de manejo en un bosque de *P. patula* hubo un aumento en la mineralización de nitrógeno debido al aumento de la temperatura en el suelo que aceleró la descomposición de materia orgánica. Por otra parte Barrales-Brito (2013) reporta menores cantidades de carbono y nutrimentos en bosques manejados de Zacualtipán con respecto a bosques no intervenidos. De acuerdo con lo reportado por Covington (1981) la menor deposición de hojarasca ocasionada por la remoción de biomasa y la descomposición acelerada por la apertura de claros ocasionan una degradación gradual y cíclica de los suelos forestales. A partir de los resultados y la revisión bibliográfica se hace evidente que la alteración de la cubierta vegetal ocasiona variaciones en los ciclos de nutrimentos que sostienen a los bosques del ejido Atopixco.

## 7. CONCLUSIONES.

La realización de estudios de este tipo es muy importante en el desarrollo de estrategias y planes de manejo a largo plazo en bosques aprovechados. Contar con indicadores ecológicos coadyuva a monitorear de manera real el sentido y la magnitud del impacto ocasionado en estos sitios, y con ello se pueden adecuar las prácticas silvícolas con el fin de mantener la productividad y el rendimiento de los recursos forestales.

La producción de hojarasca fina fue diferente entre los 4 rodales evaluados. Se registró una mayor producción en el bosque sin manejo y en los rodales en donde el aprovechamiento ocurrió 14 y 24 años antes de este experimento, la menor producción ocurrió en el rodal más joven. Se pudo comprobar que la producción de hojarasca se determinó por la intensidad del manejo. Las cortas y aclareos provocaron una alteración de la cubierta vegetal la cual redujo la cantidad de material que se depositó en el suelo debido a la remoción de individuos.

Si bien las tasas de descomposición no fueron significativamente diferentes entre los rodales analizados, se pudo apreciar una mayor tasa en el rodal aprovechado en el 2008 ( $k=0.56$ ) mientras que la menor se registró en el rodal aprovechado en 1988 ( $k=0.37$ ). Esta tendencia obedeció a que la edad del rodal no influyó en la calidad inicial de las acículas, por esta razón no se apreciaron diferencias significativas en el porcentaje de masa remanente después de 365 días, dichos porcentajes serían utilizados posteriormente para calcular las constantes de descomposición mediante la fórmula de Olson.

Los contenidos de C y N varían con la edad de los rodales, esto está influenciado tanto por la combinación de especies como por la disponibilidad de los nutrimentos y su asimilación en individuos de mayores dimensiones. Lo anterior se concluye a partir de

la incidencia de mayores cantidades de carbono y nitrógeno en las muestras evaluadas durante el experimento de producción en los sitios más longevos y diversos.

En cuanto a los contenidos de C y N de las acículas evaluadas en el experimento de descomposición se apreciaron diferencias entre todos los rodales al inicio del experimento. El contenido de C mayor se registró en el rodal aprovechado en 2008, mientras que el de nitrógeno ocurrió en el BSM. Por otra parte después de 365 días no se apreciaron diferencias entre rodales en el contenido de C, pero si en el de N encontrándose los contenidos más altos en los rodales con mayor edad. La relación C:N fue diferente entre todos los rodales tanto al inicio como al final de los experimentos. Todo lo anterior indica una degradación diferente entre los mismos debido mayormente a variaciones en el microclima de cada rodal.

La intensidad del manejo influye significativamente sobre la diversidad estructural de los rodales, lo anterior se hace visible con la disminución de diversidad en los rodales manejados, en donde el objetivo es mantener y generar mejores rendimientos en la especie de importancia comercial, lo cual se confirma con los resultados de este trabajo.

A partir de los resultados de este trabajo se recomienda realizar experimentos con mayor duración en este tipo de bosques debido al desarrollo del proceso de descomposición en las especies del género *Pinus*.

Aquí es importante mencionar que se debe contar por lo menos con el número de lotes experimentales recomendado a partir de otros trabajos, así como con recursos suficientes para realizar análisis químicos en la mayoría de las muestras evaluadas y así no perder la variabilidad estadística, ya que de lo contrario se podría ocasionar un sesgo interpretativo en el análisis de los resultados realizados a una escala local.

Para determinar el impacto total del manejo silvícola sobre los procesos ecológicos que sostienen a estos bosques sería conveniente evaluar las variaciones de dichos procesos en otros reservorios tales como el suelo o la biomasa, esto con el fin de tener el mapa completo. Contando solamente con los resultados obtenidos en este trabajo se puede inferir que la alteración causada por el aprovechamiento comercial en la cubierta forestal ocasiona una variación en los ciclos del carbono y el nitrógeno en estos bosques.

Así mismo para complementar este tipo de estudios a nivel local, se recomiendan realizar análisis para identificar los grupos de descomponedores característicos en los rodales y evaluar su proliferación con respecto a los factores climáticos. Otra recomendación es evaluar las concentraciones de más elementos químicos ya que de acuerdo con la revisión bibliográfica existen otras relaciones entre los bioelementos que pueden aportar con mayor detalle información útil para inferir los patrones que ocurren en los procesos de producción y descomposición de la hojarasca, ejemplo de ello puede ser los cocientes lignina:N, o lignina combinada con K, Ca y Mg.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

Aber, J., R. P. Neilson, S. McNulty, J. M. Lenihan, D. Bachelet and R. J. Drapek. 2001. Forest processes and global environmental change: predicting the effects of individual and multiple stressors. *Bioscience* 51(9): 735-751

Acosta, V. H., P. A., Araujo y M. C. Iturre. 2006. Caracteres estructurales de las masas. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Santiago del Estero. Serie Didáctica No. 22. Argentina. 34 p.

Adl, S. M. 2003. *The Ecology of Soil Decomposition*. CABI Publishing. Cambridge. 335 p.

Aguirre-Calderón, O. A. 2002. Índices para la caracterización de la estructura el estrato arbóreo de ecosistemas forestales. *Revista Ciencia Forestal en México* 27(92): 5-27

Álvarez-Sánchez, J., and R. Becerra-Enríquez. 1996. Leaf decomposition in a mexican tropical rain forest. *Biotropica* 28(4b): 657-667

Ángeles-Pérez, G. 1995. Efecto de la vegetación competidora en el desarrollo inicial de *Pinus patula*. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. México. 114 p.

Araujo, P., M. C. Iturre, V. H. Acosta y R. H. Renolfi. 2008. Estructura del bosque de La María EEA INTA Santiago del Estero. *Quebracho* 16: 5-19

Armson, K. A. 1977. *Forest soils: Properties and Processes*. University of Toronto Press. Toronto. 390 p.

Asociación de Productores Forestales de la Región de Zacualtipán Molango, A. C. 2011. *Estudio Regional Forestal UMAFOR 1302*. México. 424 p.

Bärlocher, F. 2005. Leaf mass loss estimated by litter bag technique. *In: Graça, M. A. S., F. Bärlocher and M. O. Gessner (eds.). Methods to Study Litter Decomposition, a Practical Guide*. Springer. Netherlands, pp. 37-42

Barrales-Brito, E. 2013. Balance de carbono y tasa de descomposición de mantillo y horizontes de fermentación de suelos forestales. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado en Edafología. México. 152 p.

Benckiser, G. 1997. Organic inputs and soil metabolism. *In: Fauna and Soil Ecosystems: Recycling Processes, Nutrient Fluxes, and Agricultural Production*. G. Benckiser (ed.). Marcel Dekker, Inc. New York, pp. 7-62

Berg, B., and Ch. McLaugherty. 2008. Plant litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Second edition. Springer. Heidelberg. 338 p.

Berg, B., and R. Laskowsky. 2005. Litter Decomposition: A Guide to Carbon and Nutrient Turnover. Academic Press Inc. Burlington. 448 p.

Bernier, P., P. J. Hanson and P. S. Curtis. 2008. Measuring litterfall and branchfall. *In*: Hoover, C. M. (ed.). Field Measurements for Forest Carbon Monitoring. Part III: Measuring aboveground carbon fluxes. Springer. New York, pp. 91-102

Bidwell, R. G. S. 1993. Fisiología Vegetal. A. G. T. Editor, S. A. México. 784 p.

Bishop, J., y N. Landell-Mills. 2006. Los servicios ambientales de los bosques. *In*: Pagiola, S., J Bishop y N. Landell-Mills. La Venta de Servicios Ambientales Forestales: Mecanismos Basados en el Mercado Para la Conservación y Desarrollo. Segunda Edición. INE-SEMARNAT. México, pp. 47-74

Bocock, K. L., and O. J. W. Gilbert. 1957. The disappearance of leaf litter under different woodland conditions. *Plant and Soil* 9(2): 179-185

Bremner, J. M. 1975. Total nitrogen. *In*: C. A. Black (ed.) Methods of Soil Analysis, Part 2. Agronomy. American Society of Agronomy. Madison. 1159 p.

Castelán-Lorenzo, M., y B. Arteaga-Martínez. 2009. Establecimiento de regeneración de *Pinus patula* Schl. et Cham., en cortas bajo el método de árboles padre. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 15(1): 49-57

Castellanos-Bolaños, J. F., E. J. Treviño-Garza, O. A. Aguirre-Calderón, J. Jiménez-Pérez, M. Musalem-Santiago y R. López-Aguillón. 2008. Estructura de bosques de pino patula bajo manejo en Ixtlán de Juárez, Oaxaca, México. *Madera y Bosques* 14(2): 51-63

Chaturvedi, O. P., and J. S. Signh. 1987. A quantitative study of the forest floor biomass, liter fall and nutrient return in a *Pinus roxburghii* forest in Kaumaun Himalaya. *Vegetatio* 91: 97-106

Chave, J., D. Navarrete, S. Almeida, E. Álvarez, L. E. O. C. Aragão, D. Bonal, P. Châtelet, J. E. Silva-Espejo, J.-Y. Goret, P. Von Hildebrand, E. Jiménez, S. Patiño, M. C. Peñuela, O. L. Phillips, P. Stevenson and Y. Malhi. 2010. Regional and seasonal patterns of litterfall in tropical South America. *Biogeosciences* 7: 43-55

Coleman, D. C., D. A. Crossley and P. F. Hendrix. 2004. Fundamentals of Soil Ecology. Elsevier Academic Press. California. 386 p.

Comisión Nacional Forestal. Sistema Nacional de Información Forestal, Especies Forestales. 2010. *Pinus patula* Schltld Et Cham. <http://conafor.sinapsiskms.com/pinus-patula-schl-et-cham/> (Consulta: Agosto, 2014).

Comisión Nacional Forestal. 2011. Manual y procedimientos para el muestreo de campo, re-muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2011. SEMARNAT. México. 140 p.

Comisión Nacional Forestal. 2012. Anuario estadístico de la producción forestal 2011. SEMARNAT. México. 222 p.

Congdon, R. A., and J. L. Herbhon. 1993. Ecosystem dynamics of disturbed and undisturbed sites in North Queensland wet tropical rain forest: I. Floristic composition, climate and soil chemistry. *Journal of Tropical Ecology* 9(3): 349-363

Cotrufo, M. F., I. Del Galdo and D. Piermatteo. 2009. Litter decomposition: concepts, methods and future perspectives. *In*: Kutsch, W. L., M. Bahn and A. Heinemeyer (eds.). *Soil and Carbon Dynamics: an Integrated Methodology*. Cambridge University Press. Cambridge. 298 p.

Covington, W. W. 1981. Changes in forest floor organic matter and nutrient content following clear cutting in Northern hardwoods. *Ecology* 62(1): 41-48

Cruz-Leyva, I. A. 2008. Modelado espacial de los recursos forestales en el Ejido de Atopixco, Estado de Hidalgo. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. México. 116 p.

Cruz-Leyva, I. A., J. R. Váldez-Lazalde, G. Ángeles-Pérez y H. M. De los Santos-Posadas. 2010. Modelación espacial de área basal y volumen de madera en bosques manejados de *P. patula* y *P. teocote* en el ejido Atopixco, Hidalgo. *Madera y Bosques* 16(3): 75-97

Cruz-Ruíz, F. 2004. Plan de Manejo Forestal para el aprovechamiento de los recursos forestales maderables, Ejido Atopixco. México. 50 p.

De Las Salas, G. 1987. Suelos y Ecosistemas Forestales, con Énfasis en América Tropical. Servicio Editorial IICA. San José. 450 p.

Del Río, M., F. Montes, I. Cañejas y G. Montero. 2003. Revisión: Índices de diversidad estructural en masas forestales. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales* 12(1): 159-176

Descheemaeker, K., B. Muys, J. Nyssen, J. Poesen, D. Raes, M. Haile and J. Deckers. 2006. Litter production and organic matter accumulation in exclosures of the Tigray highlands, Ethiopia. *Forest Ecology and Management* 233: 21-35



Díaz-Pines, E., A. Rubio and F. Montes. 2011. Aboveground soil inputs in the ecotone between Scots pine and Pyrenean oak in Sierra de Guadarrama. *Forest Systems* 20(3): 485-495

Díaz-Pinés, E., A. Rubio, H. Van Miegroet, F. Montes and M. Benito. 2011. Does tree species control soil organic carbon pools in Mediterranean mountain forest?. *Forest Ecology and Management* 262(10): 1895-1904

Elizondo, A. 2005. El Mercado de la madera en México. Estudio contratado INE-BOSQ-EC-01-2005. Instituto Nacional de Ecología. México. 41 p.

Facelli, J. M., and S. T. A. Picket. 1991. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure. *The Botanical Review* 57(1): 1-32

FAO (Food and Agriculture Organization). 2012. El estado de los bosques del mundo. <http://www.fao.org/docrep/016/i3010s/i3010s00.htm> (Consulta: Mayo, 2013).

Farjon, A., and B.T. Styles. 1997. *Pinus* (Pinaceae). *Flora Neotropica Monograph* 75. The New York Botanical Garden. New York. 291 p.

Fassnacht, K. S., and S. T. Gower. 1999. Comparison of the litterfall and forest floor organic matter and nitrogen dynamics of upland forest ecosystems in north central Wisconsin. *Biogeochemistry* 45: 265-284

Gadow, K. v., C. Y. Zhang, C. Wehenkel, A. Pommerening, J. Corral-Rivas, M. Korol, S. Myklush, G. Y. Hui, A. Kiviste and X. H. Zhao. 2012. Forest structure and diversity. *In*: Pukkala, T., and K. v. Gadow (eds.). *Managing Forest Ecosystems* 23. Second edition. Springer. Dordrecht, pp. 29-83

García-Plé, C., E. Prats, P. Vanrell, L. Sabater y M. Morey. 1990. Dinámica de la descomposición de las hojas de *Pinus halepensis* Mill. en Cap Des Pinar (Alcudia, Mallorca). *Bolletí de la Societat d'Història Natural de les Balears* 33(1989-1990): 175-187

Gillespie, A. J. R. 2000. *Pinus patula* Schiede & Deppe. *In*: Francis, J.K. and Lowe, C.A. *Bioecología de árboles nativos y exóticos de Puerto Rico y las Indias Occidentales*. USDA Forest Service. IITF. Río Piedras, Puerto Rico, pp. 404-409.

González-Medrano, F. 2003. Las Comunidades Vegetales de México: Propuesta para la Unificación de la Clasificación y Nomenclatura de la Vegetación de México. INE-SEMARNAT. México. 77 p.

González-Rodríguez, H., T. G. Domínguez-Gómez, I. Cantú-Silva, M. V. Gómez-Meza, R. G. Ramírez-Lozano, M. Pando-Moreno and C. J. Fernández. 2011. Litterfall

deposition and leaf litter nutrient return in different locations at Northeastern Mexico. *Plant Ecology* 212: 1747-1757

González-Villareal, L. M. 1987. Contribución al Conocimiento del Género *Quercus* (Fagaceae) en el Estado de Jalisco. Colección Flora de Jalisco. Instituto de Botánica, Universidad de Guadalajara. 240 p.

Gutiérrez, B., A. Velázquez-Martínez y J. E. Etchevers-Barra. 1994. Nitrógeno potencialmente mineralizable bajo diferentes intensidades de aclareo en rodales naturales de *Pinus patula*. Memoria. Colegio de Postgraduados. Sociedad Mexicana de las Ciencias del Suelo, pp. 11

Gutiérrez-Vázquez, M. H., J. Méndez-González, C. Flores-López, J. A. Ramírez-Díaz y B. N. Gutiérrez-Vázquez. 2012. Caída de hojarasca en plantaciones de *Pinus greggii* Engelm. y *Pinus cembroides* Zucc. en Coahuila, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 35(2): 123–133

Hättenschwiler, S. 2005. Effects of tree species diversity in litter quality and decomposition. *In*: Scherer-Lorenzen, M., C. Körner and E. –D. Schulze (eds.). *Forest diversity and function: temperate and boreal systems*. Ecological studies, Volume 176. Springer. Berlin, pp. 149-162

Heal, O. W., J. M. Anderson and M. J. Swift. 1997. Plant litter quality and decomposition: an historical overview. *In*: Cadisch, G., and K. E. Giller (eds.). *Driven by Nature, Plant Litter Quality and Decomposition*. C. A. B. International. Cambridge. 409 p.

Herbohn, J. L., and R. A. Congdon. 1993. Ecosystem dynamics at disturbed and undisturbed sites in north Queensland wet tropical rain forest. II. Litterfall. *Journal of Tropical Ecology* 9(3): 365-380

Hernández-Salas, J., O. A. Aguirre-Calderón, E. Alanís-Rodríguez, J. Jiménez-Pérez, E. J. Treviño-Garza, M. A. González-Tagle, C. Luján-Álvarez, J. M. Olivas-García y L. A. Domínguez-Pereda. 2013. Efecto del manejo forestal en la diversidad y composición arbórea de un bosque templado del noroeste de México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(2): 189-199

Hirobe, M., J. Sabang, B. K. Bhatta and H. Takeda. 2004. Leaf-litter decomposition of 15 tree species in a lowland tropical rain forest in Sarawak: decomposition rates and initial litter chemistry. *Journal of Forestry Research* 9: 341-346

Hoobie, S. E. 1992. Effects of plant species in nutrient cycling. *Trends in ecology and evolution* 7(10): 336-339

- Huber, A., y C. Oyarzún. 1983. Producción de hojarasca y su relación con factores meteorológicos en un bosque de *Pinus radiata* (D. Don.). *Bosque* 1(5): 1-11
- Jenny, H., S. P. Gessel and F. T. Bingham. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science* 68: 419-432
- Kanzler, A. 2002. Genotype x environment interaction in *Pinus patula* and its implications in South Africa. Thesis of Doctor of Philosophy. North Carolina State University. Department of Forestry. United States of America. 229 p.
- Kim, C., T. L. Sharik and M. F. Jurgensen. 1996. Canopy cover effects on mass loss, and nitrogen and phosphorus dynamics from decomposing litter in oak and pine stands in northern Lower Michigan. *Forest Ecology and Management* 80: 13-20
- Lambers, H., F. S. Chapin and T. L. Pons. 1998. *Plant Physiological Ecology*. Springer Verlag, Inc. New York. 540 p.
- Lavelle, P., and A. V. Spain. 2001. *Soil Ecology*. Kluwer Scientific Publications. Amsterdam. 654 p.
- León, J. D., M. I. González y J. F. Gallardo. 2011. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña en Colombia. *Revista de Biología Tropical* 59(4): 1883-1894
- López-López, J. D., J. Méndez-González, J. A. Nájera-Luna, J. Cerano-Paredes, J. D. Flores-Flores y J. A. Nájera-Castro. 2013. Producción de hojarasca en *Pinus halepensis* Mill. y *Pinus cembroides* Zucc. y su relación con algunos factores climáticos. *Agrociencia* 47: 495-510
- Lozada-Dávila, J. R. 2010. Consideraciones metodológicas sobre los estudios de comunidades vegetales. *Revista Forestal Venezolana* 54(1): 77-88
- Melillo, J. M., J. D. Aber, A. E. Linkins, A. Ricca, B. Fry and K. J. Nadelhoffer. 1989. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil* 115: 189-198
- Mendoza-Ponce, 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
- Merino L., y G. Segura. El manejo de los recursos forestales en México (1992-2002). Procesos, tendencias y políticas públicas. 2002. *In*: Leff, E., E. Ezcurra, I. Pisanty y P. Romero-Lankao (comps.). *La Transición Hacia el Desarrollo Sustentable. Perspectivas de América Latina y el Caribe*. SEMARNAT. México. 576 p.

- Mujuru, L. T. Gotor, E. J. Velthorst, J. Nyamangara and M. R. Hoosbeek. 2014. Soil carbon and nitrogen sequestration over an age sequence of *Pinus patula* plantations in Zimbabwean Eastern Highlands. *Forest Ecology and Management* 313: 254-265
- Muller-Landou, H. C., and S. J. Wright. 2010. Litterfall monitoring protocol. [http://www.ctfs.si.edu/data/documents/Litter\\_Protocol\\_20100317.pdf](http://www.ctfs.si.edu/data/documents/Litter_Protocol_20100317.pdf) (Consulta: Enero, 2012).
- Murphy, K. L., J. M. Klopatek and C. C. Klopatek. 1998. The effects of litter quality and climate decomposition along an elevational gradient. *Ecological Applications* 8(4): 1061-1071
- Nyland, R. D. 2002. *Silviculture: Concepts and Applications*. Second edition. McGraw-Hill. Boston. 682 p.
- Olson, J. S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 322-331
- Palacios-Bianchi P. 2002. Producción y descomposición de hojarasca en un bosque Maulino fragmentado. *Biología Ambiental*. <http://www.mantruc.com/pilar/seminario-palacios-bianchi2002.pdf> (Consulta: Septiembre, 2012).
- Pausas, J. G. 1997. Litter fall and litter decomposition in *Pinus sylvestris* forests and the eastern Pyrenees. *Journal of Vegetation Science* 8: 643-650
- Pérez-Olvera, C., R. Dávalos-Sotelo y E. Guerrero-Cuacuil. 2000. Aprovechamiento de la madera de encino en México. *Madera y Bosques* 6(1): 3-13
- Pérez-Suárez, M. 2009. Understanding the role of *Pinus cembroides* and *Quercus potosina* in water and nutrient dynamics in a semi-arid forest ecosystem of central-northwest Mexico applying the functional matrix approach. Tesis de Doctorado en Ciencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación y Tecnología, A. C. Postgrado en Ciencias Aplicadas. México. 98 p.
- Pérez-Suárez, M., J. T. Arredondo-Moreno, E. Huber-Sannwald and J. J. Vargas-Hernández. 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
- Perlin, J. 1989. *A Forest Journey: The Role of Wood in the Development of Civilization*. W. W. Norton. New York. 445 p.
- Perry, D. A. 1994. *Forest Ecosystems*. The Johns Hopkins University Press. Baltimore. 649 p.

Pitman R., A. Bastrup-Birk, N. Breda and P. Rautio. 2010: Sampling and Analysis of Litterfall. *In*: Manual on Methods and Criteria for Harmonized Sampling, Assessment, Monitoring, and Analysis of the Effects of Air Pollution on Forests. Part XIII. UNECE ICP Forests Programme Co-ordinating Centre. Hamburg. 16 p.

Plante, A. F., and W. J. Parton. 2007. The dynamics of soil organic matter and nutrient cycling. *In*: Paul. E. A. (ed.). Soil Microbiology, Ecology, and Biochemistry. Third edition. Academic Press. Oxford, pp. 433-464

Prescott, C. E. 2002. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology* 22: 1193-1200

Presidencia de la República. 2012. Sexto Informe de Gobierno: Anexo Estadístico. [http://sexto.informe.calderon.presidencia.gob.mx/pdf/ANEXO\\_ESTADISTICO/02\\_ESTADISTICAS\\_NACIONALES/2\\_DESARROLLO\\_SUSTENTABLE.pdf](http://sexto.informe.calderon.presidencia.gob.mx/pdf/ANEXO_ESTADISTICO/02_ESTADISTICAS_NACIONALES/2_DESARROLLO_SUSTENTABLE.pdf) (Consulta: Febrero, 2013).

Proctor, J., J. M. Anderson, S. C. L. Fogden and H. W. Vallack. 1983. Ecological studies in four contrasting lowland rain forest in Gunung Mulu National Park, Sarawak. *Journal of Ecology* 71: 261-283

Puig, H. 1991. Vegetación de la Huasteca México: Estudio Fitogeográfico y Ecológico. Instituto de Ecología, A. C. Xalapa. 625 p.

Ramírez, J. A., J. D. León-Peláez, D. Craven, D. A. Herrera, C. M. Zapata, M. I. González-Hernández, J. Gallardo-Lamcho and W. Osorio. 2014. Effects of nutrient cycling of conifer restoration in degraded tropical montane forest. *Plant Soil* 378: 215-226

Ramírez-Correa, J. A., C. M. Zapata-Duque, J. D. León-Peláez y M. I. González-Hernández. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia* 32(5): 303-311

Reyes-Carrera, S. A., J. Méndez-González, J. A. Nájera-Luna y J. Cerano-Paredes. 2013. Producción de hojarasca en un rodal de *Pinus cembroides* Zucc. en Arteaga, Coahuila, México y su relación con las variables climáticas. *Revista Chapingo. Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 19(1): 147-155

Robertson, G. P., D. C. Coleman, C. S. Bledsoe and P. Sollins. 1999. Standard Soil Methods for Long-term Ecological Research. Oxford University Press. Oxford. 462 p.

Rocha-Loredo, A. G., y N. Ramírez-Marcial. 2009. Producción y descomposición de hojarasca en diferentes condiciones sucesionales del bosque de pino-encino en Chiapas, México. *Boletín de la Sociedad Botánica de México* 84: 1-12

Roig, S., M. Del Río, I. Cañejas and G. Montero. 2005. Litter fall in Mediterranean *Pinus pinaster* Ait. stands under different thinning regimes. *Forest Ecology and Management* 206: 179-190

Sáenz-Romero, C., A. E. Snively and R. Lindig-Cisneros. 2003. Conservation and restoration of pine forest genetic resources in México. *Silvae Genetica* 52(5-6): 233-237

Salah, Y. M. S., and M. Scholes. 2011. Effect of temperature and litter quality on decomposition rate of *Pinus patula* needle litter. *Procedia Environmental Sciences* 6: 180-193

Salas, R., B. Fidalgo, J. Gaspar y P. Morais. 2009. Índices de biodiversidad y de estructura vertical-utilidad de aplicación en bosques con manejo forestal. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales* 5(2): 74-85

Sánchez-González, A. 2008. Una visión actual de la diversidad y distribución de los pinos de México. *Madera y bosques* 14(1): 107-120

Sánchez-Solís, I. 2010. Producción de hojarasca y descomposición de materia orgánica de cuatro especies arbóreas de selva baja caducifolia en una plantación de Zacatepec, Morelos. Tesis de Licenciatura en Biología. Universidad Nacional Autónoma de México. 92 p.

Schlesinger, W. H. 1997. *Biogeochemistry: an Analysis of Global Change*. Second edition. Academic Press Inc. California. 588 p.

Servicio Geológico Mexicano 2011 Panorama Minero del Estado de Hidalgo Secretaría de Economía México 63 p.

Shimadzu Corporation. 1997. TOC Control Software Manual. Japan. 33 p.

Shure, D. J., and D. L. Phillips. 1987. Litter fall patterns within different-sized disturbance patches in a Southern Appalachian Mountain forest. *American Midland Naturalist* 118(2): 348-357

Spies, T. A. 1998. Forest structure: a key to the ecosystem. *Northwest Science* 72: 34-39

Spurr, S. H., y B. Barnes. 1982. *Ecología Forestal*. A. G. T. Editor, S. A. México. 690 p.

Taiz, L., and E. Zeiger. 2006. *Plant Physiology*. Fourth edition. Sinauer associates, Inc., Publishers. Massachusetts. 764 p.

Thornton, P. E., S. C. Doney, K. Lindsay, J. K. Moore, N. Mahowald, J. T. Randerson, I. Fung, J. F. Lamarque, J. J. Feddema and Y. H. Lee. 2009. Carbon-nitrogen interactions

regulate climate-carbon cycle feedbacks: results an atmosphere-ocean general circulation model. *Biogeosciences* 6: 2099-2120

Torres-Rojo, J. M. 2004. Estudio de tendencias y perspectivas del Sector Forestal en América Latina Documento de Trabajo: Informe Nacional México. Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma. 86 p.

Triadiati, S., S. Tjitrosemito, E. Guhardja, I. Sudarsono, I. Qayim and C. Leuschner. 2011. Litterfall production and leaf-litter decomposition at natural forest and cacao agroforestry in central Sulawesi, Indonesia. *Asian Journal of Biological Sciences* 4(3): 221-234

Vázquez-Ibáñez, A. 2011. Aplicabilidad del modelo de contabilidad de carbono CBM-CFS3 en bosques templados de los ejidos La Mojonera y Atopixco, Zacualtipán de Ángeles, Hidalgo, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Postgrado Forestal. México. 109 p.

Vela-Gálvez, L. 1980. Contribución a la Ecología de *Pinus patula*. Publicación especial número 19. SARH. México. 109 p.

Young, R. A., y R. L. Giese. 1990. Introduction to Forest Science. Second edition. John Wiley & Sons. New York. 586 p.

Wardle, D. A. 2005. How plant communities influence decomposer communities. *In*: Bardgett, R. D., M. B. Usher and D. W. Hopkins (eds.). *Biological Diversity and Function in Soils*. Cambridge University Press. Carmbridge, pp. 119-138

Waring, R. H., and S. W. Running. 1998. *Forest Ecosystems: Analysis at Multiple Scales*. Third edition. Academic Press Inc. San Diego. 370 p.

Waring, R. H., and W. H. Schlesinger. 1985. *Forest Ecosystems, Concepts and Management*. Academic Press Inc. Orlando. 340 p.

White, R. E. 2006. *Principles and Practice of Soil Science: the Soil as a Natural Resource*. Fourth edition. Blackwell Publishing. Massachusetts. 363 p.

Williams, S. T., and T. R. G. Gray. 1974. Decomposition of litter on the soil surface. *In*: Dickinson, C. H. and G. J. F. Pugh (eds.). *Biology of Plant Litter Decomposition*. Volume 2. Academic Press. London, pp. 611-632

Williams-Linera, G., and J. Tolome. 1996. Litterfall, temperate and tropical dominant trees, and climate in a Mexican lower montane forest *Biotropica* 28(4b): 649-656

Zapata-Duque, C. M., J. A. Ramírez, J. D. León-Peláez y M. I. González-Hernández. 2007. Producción de hojarasca fina en bosques altoandinos de Antioquia, Colombia. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín* 60(1): 3771-3784

Zarco-Espinosa, V. M., J. I. Valdez-Hernández, G. Ángeles-Pérez y O. Castillo Acosta. 2010. Estructura y diversidad de la vegetación arbórea del Parque Estatal Agua Blanca, Macuspana, Tabasco. *Universidad y Ciencia* 26(1): 1-17

Zhang, D., D. Hui, Y. Luo and G. Zhou. 2008. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors. *Journal of Plant Ecology* 1(2): 85-93