



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

**PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA Y
DINÁMICA NUTRIMENTAL EN
UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus
urophylla* EN TABASCO, MÉXICO**

SECUNDINO TORRES LAMAS

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2017

La presente tesis titulada: **Producción primaria neta y dinámica nutrimental en una plantación de *Eucalyptus urophylla* en Tabasco, México** realizada por el alumno: **Secundino Torres Lamas**, 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
FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. MIGUEL ÁNGEL LÓPEZ LÓPEZ

ASESOR



DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO

ASESORA



MC. CELI GLORIA CALIXTO VALENCIA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Febrero de 2017

PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA Y DINÁMICA NUTRIMENTAL EN UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus urophylla* EN TABASCO, MÉXICO

Secundino Torres Lamas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2017

Resumen

El manejo sostenible de una plantación forestal comercial es posible con herramientas silvícolas confiables que auxilien en la toma de decisiones. En este trabajo se evaluó la Producción Primaria Neta (PPN) y la recirculación de nutrientes en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. Se estudiaron tres parcelas de 1000 m² para medir la producción de biomasa, caída de hojarasca, concentración de nutrientes en los componentes del árbol y el suelo mineral. Con esta información se estimaron los reservorios y flujos de N, P, K y Ca. La producción de biomasa total (aérea + subterránea) a los siete y ocho años de edad fue de 119 y 143 Mg ha⁻¹, respectivamente. A los ocho años de edad la plantación almacenó 348, 29, 20 y 143 kg ha⁻¹ de N, P, K, y Ca en componentes aéreos y subterráneos, respectivamente. El incremento anual de biomasa fue de 24.27 Mg ha⁻¹ año⁻¹, que se traduce en una tasa anual de captura de carbono de 13.21 Mg ha⁻¹. Para lograr este crecimiento se requiere de 73.7, 5.4, 3.2 y 41.8 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente. La caída de hojarasca fue de 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, a través de la cual los árboles retornan al suelo 21.9, 1.5, 1.1 y 20.2 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca, en el mismo orden. La mayor cantidad de biomasa y nutrientes se almacenó en el fuste que representó el 86 % de la biomasa total. Las hojas y ramas representaron 12.84 % de la biomasa total. Sin embargo, retirar estos compartimentos al momento de la cosecha afecta negativamente los almacenes de N y P en el sistema, comprometiendo la productividad del sistema en rotaciones subsecuentes.

Palabras claves: Biomasa, carbono, recirculación de nutrientes.

NET PRIMARY PRODUCTION AND NUTRIENT DYNAMICS IN AN *Eucalyptus urophylla* PLANTATION IN TABASCO, MEXICO

Secundino Torres Lamas, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2017

Abstract

Sustainable management of a commercial forest plantation is a possible goal when trustable silvicultural tools are used to make decisions. In this study we evaluated the Net Primary Production (PPN) and nutrient cycling in a plantation of *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake in Huimanguillo, Tabasco. Three 1000 m² were measured to quantify biomass production, litter fall, and nutrient concentration in the tree components and mineral soil. With the data obtained, N, P, K, and Ca pools and fluxes were estimated for the system. Production of total biomass (above + belowground) at seven and eight years of age was 119 and 143 Mg ha⁻¹, respectively. At age eight, the plantation stored 348, 29, 20, and 143 Kg ha⁻¹ N, P, K, and Ca, respectively. Annual biomass increment was 24.27 Mg ha⁻¹ y⁻¹, which gives an annual carbon sequestration rate of 13.21 Mg ha⁻¹. To achieve such a growth rate, 73.7, 5.4, 3.2, and 41.8 Kg ha⁻¹ y⁻¹ of N, P, K, and Ca, respectively, are needed. Litter fall was 3.25 Mg ha⁻¹ y⁻¹, and this process transferred 21.9, 1.5, 1.1, and 20.2 Kg ha⁻¹ y⁻¹ of N, P, K, and Ca into soil. Most biomass and nutrients were stored in stem, which comprised 86 % of total biomass. Foliage and branches comprised 12.84 % of total biomass. Harvesting of these components presumably negatively affects N and P pools, thus compromising the system productivity in future rotations.

Key words: Biomass, carbon, nutrient cycling.

A la memoria de Salvador Alejandro Ayala Ortega.

Hermano te adelantaste unos pasos en este camino que todos tenemos que recorrer. Gracias por tu amistad y por permitirme entrar en tu familia. Donde sea que te encuentres no dudo que estas en inmejorables condiciones, nos quedamos con tus ocurrencias y tu forma positiva de afrontar la vida. Gracias por todo y no me despido porque sé que algún día nos volveremos a encontrar.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por otorgarme la beca durante los dos años de estudio.

Al **Colegio de Postgraduados Campus Montecillo** en particular al **Postgrado en Ciencias Forestales** por brindarme la oportunidad para realizar mis estudios de maestría.

Al **Dr. Miguel Ángel López López** por ser un pilar importante en mi desarrollo personal y profesional al aceptar nuevamente ser mi director de tesis, ahora en mis estudios de maestría. Gracias por todo Dr. Miguel.

Al **Dr. Armando Gómez Guerrero** por todo el apoyo mostrado durante el desarrollo de la investigación, y las oportunas observaciones realizadas durante la elaboración del manuscrito.

Al **Dr. Antonio Trinidad Santos** por el interés mostrado y sus acertadas observaciones y recomendaciones durante el desarrollo de la investigación

A la **MC. Celi Gloria Calixto Valencia** por su apoyo en la elaboración de la tesis.

Al **Ing. Jurgen Stock** por las facilidades otorgadas para realizar mi investigación en las plantaciones de la empresa Proteak.

Al equipo de investigación de la empresa Proteak en particular a **Ing. Ramón Aguilar** y la **Ing. Jackelin Hernández** por el apoyo brindado en la logística durante la investigación.

CONTENIDO

CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.1. Plantaciones forestales.....	1
1.2. Nutrición forestal.....	2
1.3. Importancia del manejo nutrimental en las PFC.....	3
1.4. Uso de materiales fertilizantes en el manejo nutrimental de PFC.....	4
1.5. Recirculación de nutrimentos en PFC.....	5
1.6. Objetivos e hipótesis.....	7
1.7. Literatura citada.....	8
CAPITULO II.....	13
2. PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA DE UNA PLANTACIÓN DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO.....	13
2.1. Resumen.....	13
2.2. Abstract.....	14
2.3. Introducción.....	15
2.4. Materiales y métodos.....	16
2.5. Resultados y discusión.....	19
2.6. Conclusiones.....	26
2.7. Literatura citada.....	27
CAPITULO III.....	34
3. RECIRCULACIÓN DE NUTRIMENTOS EN UNA PLANTACIÓN DE <i>Eucalyptus urophylla</i> S. T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO.....	34
3.1. Resumen.....	34
3.2. Abstract.....	35
3.3. Introducción.....	36
3.4. Materiales y métodos.....	37
3.5. Resultados.....	41
3.6. Discusión.....	48
3.7. Conclusiones.....	54
3.8. Literatura citada.....	55
CAPITULO IV.....	61
4. CONCLUSIONES GENERALES.....	61

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake en Huimanguillo Tabasco.	17
Cuadro 2. Biomasa estimada en una plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake en Huimanguillo Tabasco.	19
Cuadro 3. Carbono almacenado en una plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco.	24
Cuadro 4. Determinaciones químicas del suelo a 30 cm de profundidad en el área de estudio en Huimanguillo, Tabasco.	41
Cuadro 5. Concentración de nutrimentos en los tejidos de árboles de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco.....	42
Cuadro 6. Almacenes de nutrimentos en los compartimentos de árboles de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo Tabasco.....	43
Cuadro 7. Requerimientos anuales de nutrimentos de la plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo Tabasco entre los siete y ocho años de edad.	44
Cuadro 8. Concentración de nutrimentos en la precipitación dentro y fuera de la plantación.....	46
Cuadro 9. Eficiencia en la utilización de nutrimentos (EUN) en la plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo Tabasco.	46
Cuadro 10. Balance nutrimental según el esquema de cosecha en la plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo Tabasco.	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de biomasa aérea en la plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco, a los siete (a) y ocho (b) años de edad.	20
Figura 2. Caída de hojarasca en una plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i> en Huimanguillo, Tabasco.	23
Figura 3. Descomposición de hojas en la plantación de <i>Eucalyptus urophylla</i>	45

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. Plantaciones forestales

Las Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) son fuentes importantes de celulosa y madera y seguirán tomando relevancia con el transcurso de los años ante la demanda de estos productos. El incremento de la demanda de productos forestales, aunado a la reducción de la superficie de bosques naturales favorece esta tendencia (Viera *et al.*, 2012). A nivel mundial la superficie de PFC ha tenido un crecimiento acelerado, pues las PFC se han convertido en una opción viable para reducir la presión hacia los bosques naturales, siempre y cuando las PFC generen empleo local (Viera *et al.*, 2012; Schumacher *et al.*, 2013). Para el año 2015 la FAO estima un total de 290 millones de hectáreas de plantaciones en el mundo, de las cuales aproximadamente 76 % tienen fines comerciales y 24 % para restauración ecológica. Dentro de los grupos vegetales plantados a nivel mundial destaca el género *Pinus sp.*, seguido por el género *Eucalyptus sp.*

En México las PFC siguen una tendencia similar. Cada vez más terrenos con uso agrícola, ganadero y algunos actualmente marginados por la poca rentabilidad, están dando un giro hacia esta actividad, que se vuelve más atractiva porque las especies forestales tienen requerimientos nutrimentales más bajos que los cultivos anuales (Neto *et al.*, 2013).

A pesar de que el impulso a las PFC es reciente, su expansión ha sido acelerada en las últimas décadas. Según datos de CONAFOR (2012) los primeros registros de PFC datan de 1930, y corresponden a plantaciones establecidas por la cerillera “La Imperial” en el Estado de México. Para los años 70 y principios de los 80 los proyectos de plantaciones aún no figuraban en el plano forestal nacional; sin embargo, una década después, al surgir el PRODEPLAN, esta actividad toma impulso a nivel nacional.

1.2. Nutrición forestal

Más de 60 elementos de la tabla periódica han sido encontrados en los tejidos de los vegetales (Hawkins, 2011). Sin embargo, sólo 17 de ellos se consideran como nutrimentos esenciales para el óptimo desarrollo de las plantas (Salas, 2003; Landis *et al.*, 2005). Según Epstein (1972) para que un nutrimento sea considerado esencial debe de cumplir tres criterios fundamentales: 1) sin la presencia de ese nutrimento la planta no puede completar su ciclo de vida; 2) ningún otro elemento lo puede substituir completamente; y 3) debe formar parte de un metabolito específico o ser funcional.

Los 17 nutrimentos se clasifican en macro y micronutrimentos con base en las concentraciones en que se encuentran en los tejidos de los vegetales (Jacobs y Landis, 2014). El carbono (C), hidrógeno (H), y oxígeno (O) componen alrededor del 95 % del peso seco de la planta (Mengel *et al.*, 2001; Landis *et al.*, 2005; Engels *et al.*, 2012; Alvarado, 2015). En conjunto con el nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S) integran el grupo de los macronutrimentos, que se caracterizan porque son absorbidos en grandes proporciones, tal es así que en general su concentración en el tejido se expresa como un porcentaje del peso seco total de la planta. Todos ellos a excepción del K, que es funcional, son constituyentes estructurales de las células (Salas, 2003; Landis *et al.*, 2005), forman compuestos orgánicos como proteínas y ácidos nucleicos (Kirkby, 2012).

El grupo de los micronutrimentos lo componen el hierro (Fe), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), boro (Bo), cloro (Cl) y níquel (Ni) (Jacobs y Landis, 2014). Son constituyentes de moléculas enzimáticas y sus requerimientos por las plantas son bastante más bajos comparados con los macros (Kirkby, 2012); sin embargo, su ausencia o baja disponibilidad para las plantas causa una disminución en su crecimiento (Osman, 2013).

Un concepto importante en el estudio de la nutrición de los vegetales es la Ley de Liebig o Ley del mínimo (Jacobs y Landis, 2014), la cual expresa que cuando

existen limitaciones de algún factor la planta adapta una estrategia de crecimiento con base en la disponibilidad de dicho factor (Salas, 2003). Los factores pueden ser nutrimentos o condiciones del medio ambiente como: humedad, temperatura, luz y condiciones del suelo (López-López y Alvarado-López, 2010). Cuando las limitaciones son muy agudas las plantas manifiestan síntomas de deficiencia, que varían dependiendo de la cantidad de nutrimento presente en el suelo en forma aprovechable para las plantas (Jacobs y Landis, 2014).

1.3. Importancia del manejo nutrimental en las PFC

El desarrollo de la masa forestal es clave en la rentabilidad de las plantaciones. Datos de CONAFOR (2015) indican que en México la tendencia es al establecimiento de especies forestales de rápido crecimiento, sobre todo porque éstas presentan turnos cortos, en comparación con las especies de clima templado-frío. Bajo esta perspectiva nace la importancia de estudiar a detalle los factores involucrados en el crecimiento de los árboles para desarrollar estrategias de manejo acordes a las necesidades de las especies. Los árboles para su crecimiento requieren: luz solar, dióxido de carbono, una apropiada temperatura del aire y suelo, así como un adecuado suministro de agua y nutrimentos (West, 2014).

En sistemas forestales intensivos como es el caso de las PFC es importante considerar otros factores relacionados al manejo como: preparación del terreno, podas, aclareos, control de plagas, control de malezas, mejoramiento genético; todos ellos en conjunto influirán directamente en la tasa de crecimiento de los árboles. Ciertos autores (Silva *et al.*, 2014; West, 2014) indican que el agua y los nutrimentos son los factores que más frecuentemente están ligados a la productividad de los rodales forestales, sobre todo en las regiones tropicales donde la luz y la temperatura no son una limitante (Barros *et al.*, 2005). Es por ello que el manejo nutrimental se vuelve un desafío en la silvicultura de las PFC para maximizar la producción y mantener la sostenibilidad del sitio

salvaguardando el equilibrio ecológico y reduciendo los efectos negativos que se generan por las continuas rotaciones (Silva *et al.*, 2013; Fernández-Moya *et al.*, 2014). Debido a que los nutrientes pueden ser un recurso limitado en el tiempo, es importante reponerlos en áreas bajo manejo intensivo para evitar que la productividad se vea comprometida en las siguientes rotaciones (Onyekwelu *et al.*, 2011).

1.4. Uso de materiales fertilizantes en el manejo nutrimental de PFC

Una de las acciones para corregir deficiencias nutrimentales y reponer los nutrientes que se extraen del suelo es la fertilización, actividad que actualmente forma parte de la mayoría de los programas de manejo de plantaciones forestales, misma que si se realiza de manera correcta cambia las características del rodal ya que acelera el crecimiento de los árboles (Binkley y Fisher, 2013). Las plantaciones localizadas en sitios con baja fertilidad y sujetas a constante remoción de nutrientes por efecto de la cosecha es muy probable que tengan una mejor respuesta a la aplicación de fertilizantes (Gonçalves *et al.*, 2013); sin embargo, es necesario determinar la demanda nutrimental para cada especie e identificar los nutrientes que están limitantes en el sitio; de otro modo la fertilización puede no surtir el efecto esperado. Los ensayos de fertilización proporcionan información puntual para establecer las necesidades nutrimentales. Como primer paso se evalúa el status nutrimental del suelo para definir la cantidad de nutrientes a aplicar con la fertilización; simultáneamente el análisis químico de tejido vegetal ayuda a determinar necesidades nutrimentales inmediatas (Onyekwelu *et al.*, 2011).

A nivel mundial existe una amplia experiencia sobre experimentos llevados a cabo en especies forestales con el objetivo de mejorar los crecimientos a través de la fertilización, muchos de ellos con resultados favorables (Cromer *et al.*, 1993; Faria *et al.*, 2002; Neto *et al.*, 2003; Xu *et al.*, 2005; Stape *et al.*, 2008; Ryan *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2014), estos autores encontraron una mayor producción de biomasa aérea en aquellas parcelas fertilizadas comparadas con

las que no se fertilizaron, sin embargo, algunos trabajos muestran que no siempre la dosis más alta produce la mayor cantidad de biomasa. Lo anterior, indica la importancia de definir las necesidades nutrimentales en cada caso, las cuales varían según la especie y las condiciones del sitio. Una apropiada fertilización combinada con un eficiente reciclaje de nutrimentos mejora la fertilidad del suelo y asegura la adecuada nutrición de las PFC (Onyekwelu *et al.*, 2011; Alvarado y Raigosa, 2012).

1.5. Recirculación de nutrimentos en PFC

Los bosques a diferencia de los cultivos agrícolas se caracterizan por ser ecosistemas con nutrición autónoma; dependen de los nutrimentos disponibles en el suelo y de los retenidos en su propia biomasa (Osman, 2013). Los nutrimentos en el suelo provienen principalmente de la caída de hojarasca, depósitos atmosféricos, descomposición y mineralización de la materia orgánica, fijación biológica y del intemperismo que sufre el material parental (Mengel *et al.*, 2001; Chapin *et al.*, 2011; Osman, 2013); estos procesos son importante a largo plazo al ser parte de la formación del suelo, sin embargo, el reciclaje de elementos minerales dentro del ecosistema es una de las mayores fuentes de nutrimentos que utilizan los árboles para su crecimiento (Binkley y Fisher, 2013).

Una evaluación global de los flujos y reservorios de los nutrimentos en una PFC proporcionará herramientas para definir estrategias de manejo con el fin de asegurar la sostenibilidad del sitio. Conocer las entradas y salidas de nutrimentos es fundamental para establecer el balance nutrimental del sitio y determinar si es necesario reponer los nutrimentos sobre todo después de cada rotación (Laclau *et al.*, 2003).

El propósito del presente estudio fue estimar la productividad, así como los reservorios y flujos de N, P, K y Ca en una plantación forestal de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en el municipio de Huimanguillo Tabasco, para conocer la dinámica nutrimental y determinar si mediante el actual régimen de manejo se

mantiene la productividad del sistema a largo plazo. De la misma forma se estimó la cantidad de nutrientes extraídos en la cosecha forestal y el impacto de esta actividad en el almacén de nutrientes de los diferentes reservorios del ecosistema.

1.6. Objetivos e hipótesis

1.6.1. Objetivo general

Evaluar la recirculación de nutrimentos en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco.

1.6.2. Objetivos específicos

- I. Estimar los reservorios de N, P, K y Ca en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.
- II. Estimar los flujos de N, P, K y Ca en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.
- III. Estimar la cantidad de N, P, K y Ca que se extrae con la cosecha en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

1.6.3. Hipótesis

- I. Los reservorios de N, P, K y Ca presentan niveles adecuados para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en el Estado de Tabasco.
- II. Los flujos de N, P, K y Ca corresponden a los intervalos adecuados para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.
- III. Las cantidades de N, P, K y Ca extraídos durante la cosecha son insignificantes y no ponen en riesgo la sustentabilidad de las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake.

1.7. Literatura citada

- Alvarado, A. 2015. Introduction to Plant Nutrition. En L. Pancel., y M. Köhl. (eds). Tropical Forestry Handbook. (pp. 1-75). Berlin. Alemania. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. doi: 10.1007/978-3-642-41554-8_105-1
- Alvarado, A., y J. Raigosa. 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 415 p.
- Barros, N. F., J. C. Neves L., y R. Novais F. 2005. Fertilidade de solos, nutrientes e produção florestal. Visão Agrícola 4: 76-79. Consultado en julio de 2016 <http://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va04-florestas-plantadas06.pdf>
- Binkley, D., and R. F. Fisher. 2013. Ecology and management of forest soils. John Wiley & Sons. USA. 347 p.
- Chapin, F. S., P. A. Matson., and P. M. Vitousek. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer-Verlag. New York. 529 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9504-9
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2012. Situación Actual y Perspectivas de las Plantaciones Forestales Comerciales en México. Consultado en enero de 2017 <http://biblioteca.xoc.uam.mx/docs/consulta/136525.pdf>
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2015. Principales especies maderables establecidas en PFC por año en el periodo 2000-2014. Consultado en enero de 2017 https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/80991/Principales_especies_no_maderables_establecidas_en_PFC_por_Entidad_Federativa_en_2000_-_2014.pdf
- Cromer, R. N., D. M. Cameron., S. J. Rance., P. A. Ryan., and M. Brown. 1993. Response to nutrients in *Eucalyptus grandis*. 2. Nitrogen accumulation.

- Forest Ecology and Management 62: 231-243. doi: 10.1016/0378-1127(93)90052-O
- Engels, C., E. Kirkby., and P. White. 2012. Mineral Nutrition, Yield and Source–Sink Relationships. En: P. Marschner. (ed), Marschner’s Mineral Nutrition of Higher Plants (pp. 85-133). USA: Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00005-4
- Epstein, E. 1972. Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives. John Wiley. New York. 412 p.
- FAO (2015). Evaluación de los recursos forestales mundiales. Roma. FAO. 54 p. Consultado en febrero de 2017 <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>
- Faria, G. E., N. F. Barros, R. Novais F, J. C. Lima, y J. L. Teixeira. 2002. Produção e estado nutricional de povoamentos de *Eucalyptus grandis*, em segunda rotação, em resposta à adubação potássica. Revista Árvore 26: 577-584. doi: 10.1590/S0100-67622002000500008
- Fernández-Moya, J., A. Alvarado., A. S. Miguel-Ayanz., y M. Marchamalo-Sacristán. 2014. Forest nutrition and fertilization in teak (*Tectona grandis* L.F.) plantations in Central America. New Zealand Journal of Forestry Science 44: 2-8. doi: 10.1186/1179-5395-44-S1-S6
- Gonçalves, M. J. L., C. A. Alvares., A. R. Higa., L. Silva D., A. Alfenas C., J. Stahl., S. F. Ferraz B., W. Lima P., P. H. Brancalion S., A. Hubner., J. P. D Bouillet., J. P. Laclau., Y. Nouvellon., and D. Epron. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. Forest Ecology and Management 301: 6-27. doi: 10.1016/j.foreco.2012.12.030
- Hawkins, B. J. 2011. Seedling mineral nutrition, the root of the matter. En L. E. Riley., D. L. Haase., y J. R. Pinto. (ed.), National Proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations (pp. 87-97). Fort Collins, USA: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Consultado en marzo

http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p065/rmrs_p065_087_097.pdf

Jacobs, D. F., y T. D. Landis. 2014. Plant Nutrition and Fertilization. En K. M. Wilkinson., T. D. Landis., D. L. Haase., B. F. Daley., y R. K. Dumroese. (ed.), *Tropical Nursery Manual: A Guide to Starting and Operating a Nursery for Native and Traditional Plants* (pp. 233-251). USA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service. Consultado en octubre de 2015 http://www.fs.fed.us/rm/pubs_wo/wo_ah732.pdf

Kirkby, E. 2012. Introduction, definition and classification of nutrients. En P. Marschner. (ed), *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (pp. 3-5). USA: Elsevier Ltd. doi: 10.1016/B978-0-12-384905-2.00001-7

Laclau, J. P., P. Deleporte., J. Ranger., J. P. Bouillet., and G. Kazotti. 2003. Nutrient dynamics throughout the rotation of *Eucalyptus* clonal stands in Congo. *Annals of Botany* 91: 879-892. doi: 10.1093/aob/mcg093

Landis, T. D., D. L. Haase., and R. K. Dumroese. 2005. Plant nutrient testing and analysis in forest and conservation nurseries. En R. K. Dumroese., L. E. Riley., y T. D. Landis. (eds), *National proceedings: Forest and Conservation Nursery Associations* (pp. 76-83). Charleston, USA: USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. Consultado en octubre de 2015 http://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p035/rmrs_p035_076_083.pdf

López-López, M. A., y J. Alvarado-López. 2010. Interpretación de nomogramas de análisis de vectores para diagnóstico nutrimental de especies forestales. *Madera y Bosques* 16: 99-108. Consultado en marzo de 2016 <http://www.scielo.org.mx/pdf/mb/v16n1/v16n1a7.pdf>

Mengel, K., E. A. Kirkby., H. Kosegarten., and T. Appel. 2001. *Principles of Plant Nutrition*. Springer. Netherlands. 849 p. doi: 10.1007/978-94-010-1009-2

- Neto, C. F. V., P. S. Leles S., M. G. Pereira., V. G. Bellumath H., y J. M. Alonso. 2013. Acúmulo e decomposição da serapilheira em quatro formações florestais. *Ciência Florestal*, Santa Maria 23: 379-387. doi: 10.5902/1980509810549
- Neto, O. S. N., G. Reis G., M. G. Reis F., y J. C. Neves L. 2003. Produção e distribuição de biomassa em *Eucalyptus camaldulensis* Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento. *Revista Árvore* 27: 15-23. doi: 10.1590/S0100-67622003000100003
- Onyekwelu, J. C., B. Stimm., and J. Evans. 2011. Review Plantation Forestry. En S. Günter., M. Weber., B. Stimm., y R. Mosandl. (ed). *Silviculture in the tropics* (pp. 399-454). Berlin: Springer-Verlag. doi: 10.1007/978-3-642-19986-8
- Osman, K. T. (2013). *Forest Soils: Properties and management*. Switzerland. Springer. 217 p. doi: 10.1007/978-3-319-02541-4
- Ryan, M. G., J. L. Stape., D. Binkley., S. Fonseca., R. A. Loos., E. N. Takahashi., C. R. Silva., S. R. Silva., R. E. Hakamada., J. M. Ferreira., A. M. N. Lima., J. L. Gava., F. P. Leite. H. B. Andrade., J. M. Alves., and G. G. C. Silva. 2010. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. *Forest Ecology and Management* 259: 1695–1703. doi: 10.1016/j.foreco.2010.01.013
- Salas, C. R. E. 2003. Nutrición mineral de plantas y el uso de fertilizantes. En: G. Meléndez., y E. Molina (eds). *Fertilizantes: características y manejo*. (pp. 1-19). Costa Rica. Centro de Investigaciones Agronómicas.
- Schumacher, M. V., R. Corrêa S., M. Viera., y E. F. Araújo. 2013. Produção e decomposição de serapilheira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* maidenii. *Cerne Lavras* 3: 501-508. doi: 10.1590/S0104-77602013000300018

- Silva, M. P. H., F. Poggiani., P. L. Libardi., and A. Gonçalves N. 2013. Fertilizer management of eucalypt plantations on sandy soil in Brazil: Initial growth and nutrient cycling. *Forest Ecology and Management* 301: 64-78. doi: 10.1016/j.foreco.2012.10.033
- Silva, M. P. H., F. Poggiani., W. Lima P., and P. L. Libardi. 2014. Soil water dynamics and litter production in eucalypt and native vegetation in southeastern Brazil. *Scientia Agricola* 71: 374-379. doi: 10.1590/0103-9016-2013-0325
- Stape, J. L., D. Binkley., and M. G. Ryan, 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. *Forest Ecology and Management* 255: 920-930. doi:10.1016/j.foreco.2007.09.085
- Viera, M., D. M. Bonacina., M. V. Schumacher., F. Calil, N., M. V. Caldeira W., y L. Watzlawick F. 2012. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus urograndis* na Serra do Sudeste-RS. *Ciências Agrárias, Londrina* 33: 2481-2490. doi: 10.5433/1679-0359.2012v33Supl1p2481
- West, P. W. 2014. *Growing Plantation Forests*. Springer. Switzerland. 329 p. doi: 10.1007/978-3-319-01827-0.
- Xu, D., B. Dell., Z. Yang., N. Malajczuk., y M. Gong. 2005. Effects of phosphorus application on productivity and nutrient accumulation of a *Eucalyptus urophylla* plantation. *Journal of Tropical Forest Science* 17: 447-461. Consultado en agosto de 2016 <http://www.jstor.org/stable/23616678>

CAPITULO II

2. PRODUCCIÓN PRIMARIA NETA DE UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO

2.1. Resumen

El género *Eucalyptus* es el más plantado en México, con una superficie actual de 32,452 ha. Sin embargo, a pesar de su importancia, existe poca información sobre su productividad y los posibles impactos por su manejo intensivo. En este trabajo se estimó la Producción Primaria Neta (PPN) de una plantación de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. Se establecieron tres parcelas para medir crecimiento de componentes vegetales y producción de hojarasca. Los resultados indicaron una biomasa acumulada de 119.04 y 143.31 Mg ha⁻¹ a la edad de siete y ocho años, respectivamente. La producción de hojarasca fue de 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con una distribución de 62.5, 18.8, 18.7 % para hoja, rama y corteza, respectivamente. La PPN estimada entre los siete y ocho años de edad fue de 27.82 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Considerando un valor de 48 % de carbono (C) en la biomasa de *Eucalyptus urophylla* la plantación fija 13.35 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. Los resultados sugieren que la productividad de la plantación bajo el actual régimen de manejo está dentro del intervalo estimado para otras plantaciones de eucalipto alrededor del mundo.

Palabras clave: Eucalipto, biomasa, carbono, hojarasca.

**NET PRIMARY PRODUCTION IN A PLANTATION OF *Eucalyptus urophylla* S.T.
Blake AT HUIMANGUILLO, TABASCO**

2.2. Abstract

Genus *Eucalyptus* is the most planted in Mexico, with 32,452 ha to date. However, information on productivity and intensive management impacts of the eucalypt plantations in Mexico is scarce. In this research work we estimated Net Primary Production (NPP) of a plantation of *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake at Huimanguillo, Tabasco. Three plots to measure growth of tree components and litter production were established in an eight year old plantation. Accumulated biomass was 119.04 and 143.31 Mg ha⁻¹ at ages seven and eight, respectively. Litter production was 3.25 Mg ha⁻¹ y⁻¹. Leaves, branches, and bark comprised 62.5, 18.8, and 18.7 % of total litter, respectively. NPP between ages seven and eight was 27.82 Mg ha⁻¹ y⁻¹. Considering a carbon (C) concentration of 48% in *Eucalyptus urophylla* biomass, the plantation fixes 13.35 Mg C ha⁻¹ y⁻¹. Results suggest that, under the present management regime, productivity of the plantation studied falls within the mean range for eucalypt plantations all over the world.

Key words: Eucalypt, biomass, carbon, leaf litter.

2.3. Introducción

La producción primaria neta (PPN) de los ecosistemas es la diferencia entre la fotosíntesis total (productividad primaria bruta) y la respiración total de las plantas (Quinto *et al.*, 2007). Incluye todo el material orgánico almacenado y reciclado por las plantas vivas de un ecosistema en un determinado periodo (Clark *et al.*, 2001). Las estimaciones de biomasa acumulada constituyen una medida de la PPN la cual puede ser expresada en $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Schlesinger y Bernhardt, 2013).

La PPN de una plantación forestal refleja la capacidad productiva del sitio (Ferrere *et al.*, 2014). En términos económicos la PPN es una herramienta para definir los turnos comerciales de las plantaciones (Alvarado y Raigosa, 2012). Lo deseable es que la PPN sea elevada; el caso contrario compromete la rentabilidad de las Plantaciones Forestales Comerciales (PFC).

Desde la perspectiva de cambio climático, la estimación de biomasa permite dar seguimiento a los flujos de carbono en los ecosistemas forestales prístinos o alterados en forma natural o antrópica (cambios de uso de suelo, deforestación, incendios; Escobar *et al.*, 2008). En resumen, la PPN es un indicador de la capacidad que tienen las plantaciones para almacenar carbono.

La PPN se utiliza como punto de partida para establecer las necesidades nutrimentales de una plantación (Bonomelli y Suárez, 1999), de forma que se garantice una producción de madera en rotaciones cortas y sucesivas (Geldres *et al.*, 2006) sin alterar la capacidad productiva de los sitios.

Por las condiciones ambientales y edáficas que presenta el Municipio de Huimanguillo, Tabasco, para el establecimiento de PFC con especies de rápido crecimiento, se espera que la superficie actualmente plantada aumente. Dada la escasez de información sobre la productividad de plantaciones de esta región, el objetivo de la investigación fue aportar datos de PPN de *Eucalyptus urophylla* para que se utilicen como herramienta de apoyo en el manejo sostenible de futuras plantaciones.

2.4. Materiales y métodos

2.4.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio se localiza en el municipio de Huimanguillo, Tabasco en las coordenadas 17°48'29" de latitud norte y 93°52'32" de longitud oeste. El clima es cálido húmedo (Am) según el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por García (2004). La precipitación media anual es de 2200 mm y la temperatura media anual es de 27 °C. Los suelos son de reciente formación originados de roca sedimentaria formada por sustrato calcáreos (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]-Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], 2013). El relieve de la zona consiste en lomeríos con pendientes menores a 10 %.

2.4.2. Diseño de muestreo

El estudio se realizó en una plantación de *Eucalyptus urophylla* de siete años de edad con una densidad de 1111 árboles ha⁻¹ (espaciamento de 3 m x 3 m). En la plantación se establecieron en forma aleatoria tres sitios experimentales circulares de 1000 m². En cada sitio se realizaron dos inventarios de todos los árboles; uno en abril del 2015 y el otro en junio del 2016. A cada árbol se le midió el diámetro normal (1.30 m) con cinta diamétrica y la altura total (AT) con pistola Haga.

2.4.3. Estimación de biomasa aérea

Mediante ecuaciones alométricas desarrolladas por Hernández (2016; Cuadro 1) y con los datos dasométricos registrados en los sitios, se estimó la biomasa por hectárea para cada componente de los árboles, en 2015 y en 2016.

Cuadro 1. Ecuaciones alométricas para estimar la biomasa aérea de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo Tabasco.

Componente	Ecuación	R ²	N	DN (cm)		AT (m)	
				Max	Min	Max	Min
Fuste con corteza	$\gamma = 31.08(DN)^{1.31}(AT)^{1.17}$	0.97					
	$\gamma = 7.57 + 827.94(DN)^2$		93	33.2	7.8	33.3	8.5
Ramas	$- 0.53(AT)$ $- 16.10(DN)^2(AT)$	0.47					
Hojas	$\gamma = 2 + 44.66(DN) - 0.27(AT)$	0.40					

Fuente: Hernández (2016); γ = biomasa por componente; DN= diámetro del fuste (cm) a una altura de 1.30 m sobre el nivel del suelo; AT= altura total del árbol (m); N= Número de árboles derribados para la elaboración de las ecuaciones alométricas; Max y Min= valores máximos y mínimos de diámetro normal y altura de los arboles utilizados para elaboración de las ecuaciones.

2.4.4. Estimación de biomasa subterránea

2.4.4.1 Raíces finas.

A los ocho años de edad de la plantación en cada sitio experimental se tomaron al azar cinco muestras de suelo hasta los 30 cm de profundidad con un muestreador cilíndrico de 10 cm de diámetro y 20 cm de longitud. Tres meses antes de realizar la colecta de suelo se colocó 1 m² de nylon negro en cada espacio elegido para hacer el muestreo, para evitar el establecimiento de malezas y el crecimiento de raíces del sotobosque. Las muestras se llevaron al laboratorio del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Las raíces finas visibles (menores a cinco milímetros de diámetro) se separaron manualmente; el resto de raíces finas se separaron por flotación diluyendo la muestra de suelo en agua (Pérez *et al.*, 2013). Las raíces finas se lavaron con agua, se pusieron en bolsas de papel y se secaron a 70 °C hasta peso constante; posteriormente se pesaron en una balanza analítica con precisión de 0.001 g. La media del peso seco de raíces finas de las cinco muestras en el sitio se extrapolaron a la superficie del sitio de 1000 m². El valor por hectárea se obtuvo extrapolaron la biomasa promedio de raíces finas

de los tres sitios experimentales. No se asumió incremento anual de biomasa de raíces finas.

2.4.4.2 Raíces gruesas superficiales

A la par del muestreo de raíces finas, en cada sitio experimental en forma al azar se cavaron cinco hoyos de 100 x 100 x 30 cm (largo, ancho y profundidad), en cada excavación se separaron las raíces gruesas de forma manual directamente del suelo, se consideraron aquellas raíces mayores a cinco milímetros de diámetro. Las raíces se lavaron con agua para quitar los residuos de suelo, se colocaron en bolsas de papel y se secaron en estufa de aire forzado a 70 °C hasta peso constante; finalmente se pesaron en balanza analítica. La extrapolación a masa por hectárea se hizo mediante el mismo procedimiento empleado para las raíces finas. El incremento anual de raíces gruesas se estimó dividiendo la biomasa de ese reservorio por la edad de la plantación.

2.4.5. Recolección de hojarasca

Se instalaron cinco trampas circulares de 1 m² de superficie, fijadas a una altura de 80 cm por encima del suelo. Las trampas se vaciaron mensualmente durante un año; de junio de 2015 a mayo de 2016. La hojarasca recolectada se secó a 70 °C hasta peso constante. La hojarasca seca se separó en sus diferentes componentes (hojas, ramas, corteza y frutos). Con una brocha pequeña se quitaron las partículas de suelo y otras impurezas adheridas a los componentes. Una vez limpios los materiales se pesaron en una balanza marca Ohaus con precisión de 0.001 g.

2.4.6. Contenido de carbono en la biomasa

Se estimó la cantidad de carbono almacenado por hectárea para cada componente considerando una concentración de 48 % de carbono (C) en la biomasa de *Eucalyptus urophylla* según los resultados de Téllez *et al.* (2008) y Stape *et al.* (2008).

2.4.7. Estimación de la Producción Primaria Neta (PPN)

Las estimaciones de PPN se realizaron con el enfoque propuesto por Clark *et al.* (2001).

$$PPN = \text{Incrementos de biomasa} + \text{Pérdidas}$$

Los incrementos anuales de biomasa de los componentes del árbol se sumaron para obtener el incremento total de biomasa. A este incremento se le agregó el peso seco de la hojarasca recolectada en el año y el resultado se consideró la PPN de la plantación.

2.5. Resultados y discusión

En el Cuadro 2 se muestra la biomasa estimada de los diferentes compartimentos de la plantación estudiada a siete y ocho años de edad.

Cuadro 2. Biomasa estimada en la plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo Tabasco.

Componente	7 años	8 años	Δ Biomasa
	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹ año ⁻¹
Fuste	100.82	123.98	23,160
Ramas	8.91	9.36	450
Hojas	3.33	3.48	150
Biomasa aérea	113.06	136.82	23,760
Raíces finas*	2.4	2.4	0
Raíces gruesas*	3.58	4.09	510
Biomasa subterránea*	5.98	6.49	510
Biomasa total	119.04	143.31	24,270

*A 30 cm de profundidad; Δ Biomasa= incremento de biomasa anual

2.5.1. Biomasa aérea

La producción de biomasa aérea se encuentra dentro del intervalo estimado para otras especies de eucalipto. A los siete años la plantación mostró valores de biomasa aérea (Cuadro 2) menores a los reportados por Schlatter *et al.* (2006) para una plantación de *Eucalyptus nitens* Deane et Maiden de la misma edad (167 Mg ha⁻¹). Sin embargo, a los ocho años de edad los valores de biomasa aérea (Cuadro 2) fueron superiores a los determinados por Turner y Lambert (2008) en plantaciones de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden de la misma edad en Australia (96.68 Mg ha⁻¹). Los incrementos en biomasa aérea (Cuadro 2) son similares a los reportados por Binkley y Ryan (1998) para plantaciones de *Eucalyptus saligna* Smith de 16 años en Hawaii (20.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹) y a los obtenidos por Nouvellon *et al.* (2012) para plantaciones de *Eucalyptus grandis* de seis años de edad en el estado de Sao Paulo en Brasil (22.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹). Guimarães *et al.* (2015) señalan que la capacidad productiva de las plantaciones de eucalipto está directamente relacionada con el mejoramiento genético, condiciones edafoclimáticas y el manejo silvícola.

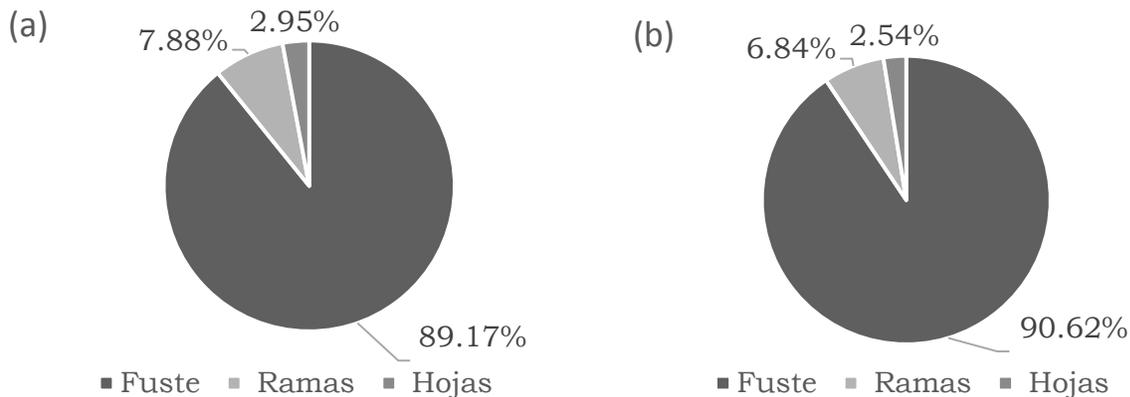


Figura 1. Distribución de biomasa aérea en la plantación de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco, a los siete (a) y ocho (b) años de edad.

El fuste fue la fracción que más aportó a la biomasa aérea, seguido por las ramas y las hojas (Figura 1). Los valores son similares a los reportados por Álvarez *et al.* (2005) quienes encontraron un promedio de 89.7 % de biomasa aérea en el

fuste, 8.4 % en las ramas y 2 % en las hojas en plantaciones de *Eucalyptus globulus* Labill. en España. Salvador *et al.* (2016), en plantaciones de *Eucalyptus saligna* en Brasil, reportan 95.9 % de la biomasa aérea en el fuste, 2.42 % en las ramas y solamente el 1.28 % en las hojas.

La edad de la plantación es uno de los principales factores que influyen en la distribución de biomasa aérea (Ferrere *et al.*, 2014; Salvador *et al.*, 2016). Como en el presente estudio, los autores anteriores encontraron mayor proporción de biomasa de ramas y hojas en árboles pequeños y ésta se redujo con el crecimiento de los árboles (Figura 1). Según Gonçalves *et al.* (2000) este comportamiento se debe a que antes del cierre de copas ocurre un periodo de intenso crecimiento, en que los carbohidratos son canalizados a la formación de copa y sistema radicular para optimizar la absorción de luz, agua y nutrimentos. Después del cierre del dosel los árboles compiten por espacio reduciendo la formación de copas y enviando la mayor parte de compuestos orgánicos sintetizados hacia el fuste (Schumacher y Caldeira, 2001). Otros factores que afectan la distribución de biomasa aérea además de la edad son: la especie, fertilidad de suelo y densidad de plantación (Schumacher *et al.*, 2011).

2.5.2. Biomasa de raíces

Los resultados relativos a raíces finas son similares a los de Pérez *et al.* (2013) para plantaciones de *Eucalyptus grandis* de 7 años (2.9 Mg ha⁻¹) y 17 años (2.8 Mg ha⁻¹) en Chile, muestreados a la misma profundidad (30 cm). Ferraz y Poggiani (2014) reportan una biomasa de 2.8 Mg ha⁻¹ en los primeros 20 cm de profundidad en parcelas experimentales de *Eucalyptus grandis* de 3.5 años de edad. Los resultados del presente estudio también son comparables con los de Witschoreck *et al.* (2003) en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* (1.47 Mg ha⁻¹) hasta una profundidad de 60 cm. La biomasa de raíces gruesas fue inferior a las de otros estudios en eucalipto. Resh *et al.* (2003) en plantaciones de *Eucalyptus nitens* en Australia estimaron un intervalo de biomasa de raíces gruesas de 26.2 Mg ha⁻¹ a 28.3 Mg ha⁻¹. Estimaciones hechas por Ryan *et al.*

(2010) para plantaciones de eucalipto en Brasil abarcan de 9.05 a 35.48 Mg ha⁻¹ de biomasa de raíces mayores a cinco milímetros. El muestreo aleatorio en el sitio, puede no ser el método más eficaz para estimar raíces gruesas, pues se subestima la biomasa real de este compartimento. Según Resh *et al.* (2003) aproximadamente un 76 % de las raíces gruesas se encuentra en el cepellón de la raíz principal. A pesar de esta inferioridad, las estimaciones de raíces gruesas hechas a 30 cm de profundidad en este estudio resultan muy importantes al ser un almacén de carbono y nutrientes disponibles para la biota del suelo y para la absorción de los árboles en las primeras capas del suelo, asumiendo un importante rol para la productividad del sistema a largo plazo (Resh *et al.*, 2003). Las diferencias en las estimaciones de biomasa subterránea, con respecto a otros estudios de eucalipto están relacionadas con la especie, la edad, metodología empleada (Witschoreck *et al.*, 2003), manejo (Donoso *et al.*, 1999; Ferraz y Poggiani, 2014) y condiciones de sitio. Se ha documentado que la fertilidad en el suelo influye directamente en la asignación de biomasa. En suelos poco fértiles la biomasa subterránea tiende a ser mayor comparada con suelos fértiles (Keyes y Grier, 1981). El aumento de la cantidad de raíces finas en los horizontes más próximos a la superficie del suelo en plantaciones de eucalipto es resultado de una mayor disponibilidad de agua y nutrientes producto de la descomposición de la hojarasca (Donoso *et al.*, 2002; Pérez *et al.*, 2013; Witschoreck *et al.*, 2003) así como la ausencia de impedimentos físicos que evitan que las raíces exploren un mayor volumen de suelo (Gaitán *et al.* 2005).

2.5.3. Caída de hojarasca

La producción anual de hojarasca estimada fue de 3.25 Mg ha⁻¹. De esta masa, 2.03 Mg ha⁻¹ fueron aportados por las hojas, 609.87 kg ha⁻¹ provinieron de las ramas y 607.37 kg ha⁻¹ correspondieron a corteza. La contribución de órganos reproductivos no fue representativa. Estas cifras son inferiores a las reportadas por Barlow *et al.* (2007) (4.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹) y Neto *et al.* (2015) (5.23 Mg ha⁻¹ año⁻¹) para *Eucalyptus urophylla* de cuatro y seis años de edad en Brasil. Las diferencias entre las plantaciones evaluadas por estos autores con respecto a la

plantación de Huimanguillo pueden atribuirse a la estructura y características del dosel (Cizungu *et al.*, 2014). Conforme las plantaciones de eucalipto avanzan en edad tienden a disminuir el tamaño de la copa (Ferrere *et al.*, 2014; Salvador *et al.*, 2016). En virtud que la plantación en Huimanguillo se encontró en un estado de sucesión más avanzado en relación a las plantaciones evaluadas por Barlow *et al.* (2007) y Neto *et al.* (2015), el tamaño de la copa pudo ser menor disminuyendo así la caída de hojarasca.

En la plantación estudiada el componente más representativo de la hojarasca fue el foliar (62.5 %), seguido por las ramas (18.8 %) y corteza (18.7 %). El porcentaje de hojas en la hojarasca fue muy similar a la documentado por Neto *et al.* (2015) para la misma especie en Brasil y para otras especies de eucalipto (Salvador *et al.*, 2014; Schumacher *et al.*, 2013; Viera *et al.*, 2014).

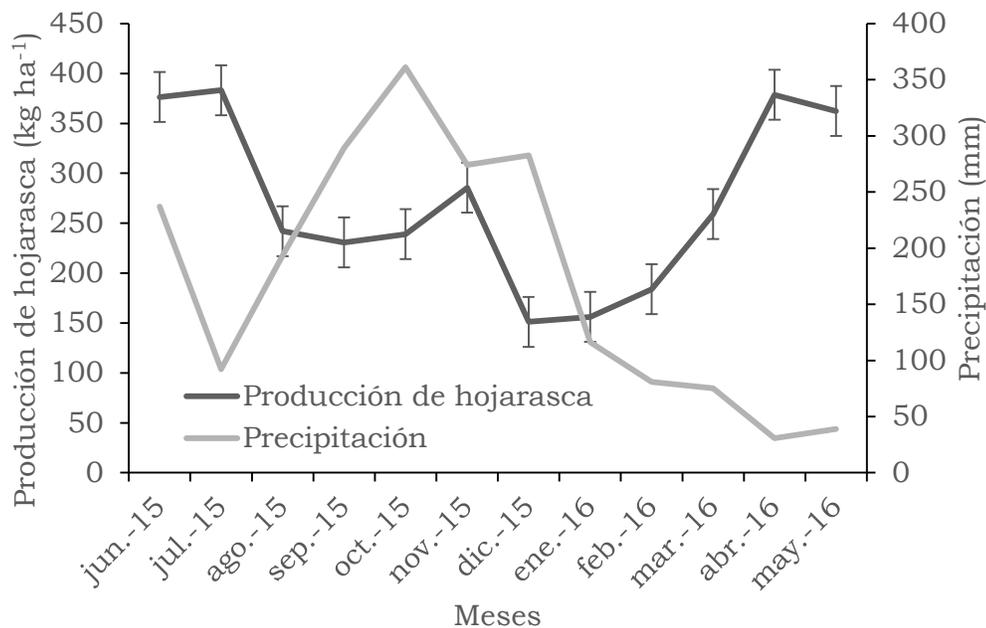


Figura 2. Caída de hojarasca en la plantación de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco.

La mayor caída de hojarasca se registró en los meses de menor precipitación (Figura 2). Ese patrón se ha documentado por otros autores para plantaciones de eucalipto (Corrêa *et al.*, 2013; Geldres *et al.*, 2006; Sayad *et al.*, 2014; Viera

et al., 2014) y otros tipos de bosques (Barlow *et al.*, 2007; Das y Mondal, 2016; López-López *et al.*, 2013; Viera y Schumacher, 2010). Según Schlatter *et al.* (2006) la caída de hojarasca en la estación seca es una respuesta fisiológica de los árboles para disminuir la transpiración, y con ello reducir el estrés hídrico que causa la escasez de agua en el sitio.

2.5.4. Captura de Carbono

Cuadro 3. Carbono almacenado en la plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco.

Componente	7 años	8 años	ΔC
	Mg C ha ⁻¹		kg ha ⁻¹ año ⁻¹
Fuste	48.39	59.51	11,117
Ramas	4.28	4.50	216
Hojas	1.60	1.67	72
Biomasa aérea	54.27	65.67	11,405
Raíces finas*	1.15	1.15	0
Raíces gruesas*	1.72	1.96	245
Biomasa subterránea*	2.87	3.11	245
Biomasa total	57.14	68.79	11,650
Hojarasca			1560
Productividad Primaria Neta			13,210

* A 30 cm de profundidad; ΔC = Incremento del carbono fijado

A la edad de siete años el valor reservorio de carbono (54.27 Mg ha⁻¹) es similar al determinado por Paixão *et al.* (2006) para *Eucalyptus grandis* de seis años de edad en Brasil (47.7 Mg C ha⁻¹). El carbono fijado en la biomasa aérea a los ocho años de edad (Cuadro 3) se asemeja al reportado por Ribeiro *et al.* (2015) en plantaciones de *Eucalyptus urograndis* (*E. urophylla* X *E. grandis*) de cinco años en Brasil (63.7 Mg C ha⁻¹). El incremento anual de C en biomasa aérea (Cuadro 3) fue equivalente al reportado por Stape *et al.* (2008) en ensayos de *Eucalyptus*

urograndis de tres y cinco años de edad en Brasil (9.5 Mg C ha⁻¹ año⁻¹) y al encontrado por Ryan *et al.* (2010), quienes también en Brasil determinaron una tasa de acumulación de 11.6 Mg C ha⁻¹ año⁻¹. El eucalipto es una especie maderable de muy rápido crecimiento y elevado potencial de captura de carbono. Por ello, las plantaciones de eucalipto pueden impactar favorablemente el calentamiento global.

2.5.5. Producción Primaria Neta (PPN)

La PPN total estimada para la plantación fue de 27.52 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con capacidad para almacenar 13.21 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ (en parte aérea y subterránea) (Cuadro 3). El aporte por componente se distribuyó de la siguiente manera: fuste > hojarasca > raíces gruesas > ramas > hojas. La PPN encontrada fue inferior a la determinada por Binkley y Ryan (1998) para plantaciones de *Eucalyptus saligna* de 16 años de edad en Hawaii (41.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹). También fue inferior a la PPN estimada por Ryan *et al.* (2010), quienes estimaron un rango de 15.66 a 29.59 Mg C ha⁻¹ año⁻¹ en plantaciones de *Eucalyptus* en Brasil, sólo que en estos estudios el aporte de la hojarasca y raíces fue muy superior al del presente estudio. Las diferencias en hojarasca y biomasa de raíces tienen fuertes implicaciones en el reciclaje de nutrientes por la cantidad de materia orgánica que aportan anualmente al suelo. Con base en los resultados obtenidos en este estudio la productividad de la plantación evaluada se encuentra dentro del intervalo determinado en plantaciones de eucalipto alrededor del mundo: Brasil (Nouvellon *et al.*, 2012; Ribeiro *et al.*, 2015; Ryan *et al.*, 2010; Stape *et al.*, 2008), Estados Unidos (Ares y Fownes, 2000; Binkley y Ryan, 1998) y Australia (Turner y Lambert, 2008). En los ensayos de Stape *et al.* (2008) y Ryan *et al.* (2010) las parcelas experimentales manifestaron nula respuesta a la aplicación de fertilizantes, sin embargo, mostraron una correlación directa con la aplicación de riego. En esos experimentos la precipitación fue menor a la que se registró en el presente estudio. No obstante, los incrementos de biomasa fueron similares. Los resultados de laboratorio indican que los suelos de esta región de Huimanguillo presentan bajo contenido nutrimental (fósforo <15 ppm, potasio

<0.2 cmol kg⁻¹ y Calcio <2 cmol kg⁻¹). Por ello, se asume que un adecuado manejo nutrimental puede redundar en un incremento sustancial de la productividad de la plantación.

2.6. Conclusiones

La PPN de la plantación estudiada está dentro del intervalo estimado para otras plantaciones alrededor del mundo. El componente más importante de la PPN de la plantación fue el fuste (85.15 %). A los ocho años de edad, la tasa de captura de carbono se aproxima a 13 Mg ha⁻¹ año⁻¹, principalmente en los fustes. Las plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en la región de Huimanguillo, a pesar que su objetivo principal no es la producción de madera, son de gran importancia como factor de mitigación del calentamiento global, especialmente si la madera se destina a la fabricación de productos de vida larga. La producción de hojarasca presenta un patrón estacional, incrementando durante la temporada de estiaje. Es necesario diseñar ensayos de investigación que involucren diversos factores (suelo, fertilización, material genético, densidad de plantación, preparación de suelo) que proporcionen información confiable para aumentar el potencial productivo de las plantaciones de la región estudiada.

2.7. Literatura citada

- Alvarado, A., y J. Raigosa. 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo.
- Álvarez, G. J.G., M. A. Balboa M., A. Merino., y R. Rodríguez S. 2005. Estimación de la biomasa arbórea de *Eucalyptus globulus* y *Pinus pinaster* en Galicia. Recursos Rurais 1: 21-30. Obtenido de http://dspace.usc.es/bitstream/10347/3783/1/RR_1_3.pdf
- Ares, A., and J. H. Fownes. 2000. Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. Forest Ecology and Management 139: 227-236. doi: 10.1016/S0378-1127(00)00270-X
- Barlow, J., T. A. Gardner., L. V. Ferreira., and C. A. Peres. 2007. Litter fall and decomposition in primary, secondary and plantation forests in the Brazilian Amazon. Forest Ecology and Management 247: 91-97. doi: 10.1016/j.foreco.2007.04.017
- Binkley, D., and M. G. Ryan. 1998. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. Forest Ecology and Management 112: 79-85. doi: 10.1016/S0378-1127(98)00331-4
- Bonomelli, C., y D. Suarez F. 1999. Fertilización de eucalipto. 1. Efecto sobre la acumulación de biomasa. Ciencia e Investigación Agraria, 26: 1-9. Obtenido de <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/8513>
- Cizungu, L., J. Staelens., D. Huygens., J. Walangululu., D. Muhindo., O. Van C., and P. Boeckx. 2014. Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and *Eucalyptus* plantation. Forest Ecology and Management 326: 109-116. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.015

- Clark, D. A., S. Brown., D. W. Kicklighter., J. Q. Chambers., J. R. Thomlinson., and J. Ni. 2001. Measuring net primary production in forests: concepts and field methods. *Ecological Applications* 11: 356–370. doi: 10.2307/3060894
- Corrêa, S. R., M. V. Schumacher., y D. Momolli R. 2013. Deposição de serapilheira e macronutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden sobre pastagem natural degradada no Bioma Pampa. *Scientia Forestalis* 41: 65-74. doi: 10.18671/scifor.v44n110.16
- Das, C., and N. K. Mondal. 2016. Litterfall, decomposition and nutrient release of *Shorea robusta* and *Tectona grandis* in a sub-tropical forest of West Bengal, Eastern India. *Journal of Forestry Research* 27: 1055–1065. doi:10.1007/s11676-016-0208-3.
- Donoso, S., A. Obispo., C. Sánchez., F. Ruiz., y M. A. Herrera. 1999. Efecto del laboreo sobre la biomasa de *Eucalyptus globulus* en el suroeste de España. *Investigaciones Agrarias: Sistema Recursos Forestales* 8: 377-386. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/28052608>
- Donoso, S., F. Ruiz., y M. Herrera. 2002. Distribución y cantidad de biomasa de raíces finas en plantaciones clonales de *Eucalyptus globulus*. *Ciencias Forestales* 16: 3-10. Obtenido de http://revistacienciasforestales.uchile.cl/2001-2002_vol16-17/n1-2a1.pdf
- Escobar, E., M. Maass., J. Alcocer D., E. Azpra R., L. I. Falcón Á., A. Gallegos G., F. J. García., F. García-Oliva., V. Jaramillo., R. Lecuanda C., V. Camacho., y J. Zavala-Hidalgo. 2008. Diversidad de procesos funcionales en los ecosistemas. In J. Soberon, G. Halffter, J. Llorente-Bousquets (Eds), *Capital natural de México, Vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad* (pp. 161-189). México: CONABIO.

- Ferraz, A. V., y F. Poggiani. 2014. Biomassa, nutrientes e metais pesados em raízes de eucaliptos adubados com diferentes lodos de esgoto. *Cerne* 20: 311-320. doi:10.1590/01047760.201420021491
- Ferrere, P., A. M. Lupi., y R. T. Boca. 2014. Estimación de la biomasa aérea en árboles y rodales de *Eucalyptus viminalis* Labill. *Quebracho* 22. 100-113. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48133884011>
- Gaitán, J. J., E. A. Penón., y M. C. Costa. 2005. Distribución de raíces finas de *Eucalyptus globulus* ssp. *maidenii* y su relación con algunas propiedades del suelo. *Ciência Florestal* 15: 33-41. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/242666854>
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. UNAM. México. 90 p.
- Geldres, E., V. Gerding., y J. E. Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque* 27: 223-230. doi: 10.4067/S0717-92002006000300001
- Gonçalves, M. J. L., J. L. Stape., V. Benedetti., V.A. Fessel G., y J. L. Gava. 2000. Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e nutrição das árvores. En: J. L. M. Gonçalves, V. Benedetti (Eds), *Nutrição e Fertilização Florestal* (pp 1-57). Piracicaba, Brasil: IPEF.
- Guimarães, C. C., M. V. Schumacher., R. Witshoreck., H. P. Souza., y J. Santo C. 2015. Biomassa e nutrientes em povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden no Pampa Gaúcho. *Árvore* 39: 873-882. doi: 10.1590/0100-67622015000500010
- Hernández, R. J. 2016. Estimación de biomasa aérea y volumen en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco (Tesis de maestría). Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.

- Keyes, M. R., and C. C. Grier. 1981. Above- and below-ground net production in 40-year-old Douglas-fir stands on low and high productivity sites. *Canadian Journal of Forest Research* 11: 509-605. doi: 10.1139/x81-082
- 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: 497-510. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/262106520>
- Neto, S. P. A., P. A. Barreto B., E. F. Gama-Rodrigues., A. Novaes B., y A. Paula. 2015. Produção de serapilheira em floresta estacional semidecidual e em plantios de *Pterogyne nitens* Tul. e *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake no sudoeste da Bahia. *Ciência Florestal* 25: 633-643. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/283633301>
- Nouvellon, Y., J. P. Laclau., D. Epron., G. L. Maire., J. M. Bonnefond., J. L. Gonçalves M., and J. P. Bouillet. 2012. Production and carbon allocation in monocultures and mixed-species plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil. *Tree Physiology* 32: 680-695. doi:10.1093/treephys/tps041
- Paixão, A. F., C. P. Soares B., L. A. Jacovine G., M. Silva L., H. Leite G., y G. Silva F. 2006. Quantificação do estoque de carbono e avaliação econômica de diferentes alternativas de manejo em um plantio de eucalipto. *Revista Árvore* 30: 411-420. doi: 10.1590/S0100-67622006000300011
- Pérez, C., J. Frangi., J. Goya., A. Luy., y M. Arturi. 2013. Contenido de nutrientes en las raíces finas y el mantillo de rodales de *Eucalyptus grandis* de diferente edad en la Mesopotamia Argentina. *Bosque* 34: 303-310. doi:10.4067/S0717-92002013000300006
- Quinto, M. H., Y. A. Ramos P., y D. Avadía B. 2007. Cuantificación de la caída de hojarasca como medida de la productividad primaria neta en un bosque

- pluvial tropical en Salero, Chocó, Colombia. *Biodiversidad* 26: 28-41. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/2544438.pdf>
- Resh. S. C., M. Battaglia., D. Worledge., and S. Ladiges. 2003. Coarse root biomass for eucalypt plantations in Tasmania, Australia: sources of variation and methods for assessment. *Trees* 17: 389-399. doi:10.1007/s00468-003-0250-6
- Ribeiro, C. S., C. P. Soares B., L. Fehrmann., L. A. Jacovine G., and K. Gadow. 2015. Aboveground and belowground biomass and carbon estimates for clonal *Eucalyptus* trees in southeast Brazil. *Revista Árvore* 39; 353-363. doi:10.1590/0100-67622015000200015
- Ryan, M. G., J. L. Stape., D. Binkley., S. Fonseca., R. A. Loos., E. N. Takahashi., C. R. Silva., S.R Silva., R. E. Hakamada., J. M. Ferreira., A. M. N. Lima., J. L. Gava., F. P. Leite., H. B. Andrade., J. M. Alves and G. G. C. Silva. 2010. Factors controlling *Eucalyptus* productivity: How water availability and stand structure alter production and carbon allocation. *Forest Ecology and Management* 259: 1695-1703. doi: 10.1016/j.foreco.2010.01.013
- Salvador, M. S., C. Consensa, B., y E. F. Araújo. 2014. Produção de serapilheira e devolução de macronutrientes em um povoamento de *Eucalyptus saligna* (F. Muell). *Ecologia e Nutrição Florestal* 2: 52-62. doi: 10.5902/2316980X15426
- Salvador, M. S., M. V. Schumacher., M. Viera., J. Stah., y C. Consensa, B. 2016. Biomassa e estoque de nutrientes em plantios clonais de *Eucalyptus saligna* Smith. em diferentes idades. *Scientia Forestalis* 44: 311-321. doi: 10.18671/scifor.v44n110.04
- Sayad, E., S. Gholami., and M. H. Salehe-Shooshtari. 2014. Litter production dynamics in relation to climatic factors in tree plantations. *Environmental Resources Research* 2: 57-66. Obtenido de

http://ijerr.gau.ac.ir/article_1680_a182e79520128616989a4376beff9a5c.pdf

- Schlatter, J. E., V. Gerdling., y S. Calderón. 2006. Aporte de la hojarasca al ciclo biogeoquímico en plantaciones de *Eucalyptus nitens*, X Región, Chile. Bosque 27: 115-125. doi: 10.4067/S0717-92002006000200006
- Schlesinger W. H., and E. S. Bernhardt. 2013. Biogeochemistry: An Analysis of Global Change. 3ra. Ed. Academic Press. UK. 672 p.
- Schumacher, M. V., R. Corrêa S., M. Viera., y E. F. Araújo. 2013. Produção e decomposição de serapilheira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* maidenii. Cerne 19: 501-508. doi: 10.13086/2316-980x.v01n01a01
- Schumacher, M. V., R. Witschoreck., y F. Calil, N. 2011. Biomassa em povoamentos de *Eucalyptus spp.* de pequenas propriedades rurais em Vera Cruz, RS. Ciência Florestal 21: 17-22. doi: 10.5902/198050982743
- Schumacher, M. V., y M. V. Caldeira W. 2001. Estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes de um povoamento de *Eucalyptus globulus* (Labillardière) sub-espécie *maidenii*. Ciência Florestal 11: 45-53. Obtenido de <http://coral.ufsm.br/cienciaflorestal/artigos/v11n1/art5v11n1.pdf>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales-Comisión Nacional Forestal (SEMARNAT-CONAFOR). (2013). Inventario Estatal Forestal y de Suelos-Tabasco 2013.
- Stape, J. L., D. Binkley., and M. G. Ryan. 2008. Production and carbon allocation in a clonal *Eucalyptus* plantation with water and nutrient manipulations. Forest Ecology and Management 255: 920-930. doi:10.1016/j.foreco.2007.09.085
- Téllez, M. E., M. J. González G., H. M. De los Santos P., A. M. Fierros G., R. J. Lilieholm., y A. Gómez G. 2008. Rotación óptima en plantaciones de

- eucalipto al incluir ingresos por captura de carbono en Oaxaca, México. Revista Fitotecnia Mexicana 31: 173-182. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/26575743>
- Turner, J., y M. J. Lambert. 2008. Nutrient cycling in age sequences of two *Eucalyptus* plantation species. Forest Ecology and Management 255: 1701-1712. doi:10.1016/j.foreco.2007.11.038
- Viera, M., M. V. Schumacher., E. F. Araújo., R. Corrêa S., y M. V. Caldeira W. 2014. Deposição de Serapilheira e Nutrientes em Plantio de *Eucalyptus urophylla* × *E. globulus*. Floresta e Ambiente 21: 327-338. doi:10.1590/2179-8087.053913
- Viera, M., y M. V. Schumacher. 2010. Deposição de serapilheira e de macronutrientes em um povoamento de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul. Ciência Florestal. 20: 225-233. doi:10.5902/198050981848
- Witschoreck, R., M. V. Schumacher., y M. V. Caldeira W. 2003. Estimativa da biomassa e do comprimento de raízes finas em *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake no município de Manta Maria-RS. Revista Árvore 27: 177-183. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/26353400>

CAPITULO III

3. RECIRCULACIÓN DE NUTRIMENTOS EN UNA PLANTACIÓN DE *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake EN HUIMANGUILLO, TABASCO, MÉXICO.

3.1. Resumen

El estado nutrimental y recirculación de nutrientes en las plantaciones forestales son factores determinantes de las tasas de crecimiento y productividad. En este trabajo se evaluó la dinámica de nutrientes a los siete y ocho años de edad, en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. En la plantación se delimitaron aleatoriamente tres parcelas de muestreo de 1000 m² para estimar la producción de biomasa y las reservas de nutrientes en los diferentes compartimentos. La biomasa total (subterránea + aérea) a los ocho años de edad fue de 143.31 Mg ha⁻¹. A esta edad la plantación almacenó 348.3 kg ha⁻¹ de N, 29.1 kg ha⁻¹ de P, 20.7 kg ha⁻¹ de K y 143.3 kg ha⁻¹ de Ca tanto en componentes aéreos como subterráneos. Entre los siete y los ocho años de edad los requerimientos nutrimentales fueron de 73.7, 5.5, 3.3 y 41.9 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente. La producción de hojarasca fue de 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, la cual retorna al suelo 21.9, 1.5, 1.1 y 20.3 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente. La tasa de descomposición fue de 0.46 año⁻¹, típica de un ambiente tropical. Los resultados sugieren que el K limita la productividad, pues presentó una elevada retranslocación (82 %), un tiempo medio de residencia en follaje elevado (5.8 años), mientras que la eficiencia en el uso de potasio fue superior a estándares internacionales publicados para eucalipto.

Palabras clave: Biomasa forestal, ciclos de nutrientes, descomposición de hojarasca.

**NUTRIENT CYCLING IN A PLANTATION OF *Eucalyptus urophylla* S.T.
Blake at HUIMANGUILLO, TABASCO, MEXICO.**

3.2. Abstract

Nutrient status and cycling in forest plantations are key factors for growth rates and productivity. In this study we evaluated nutrient dynamics at seven and eight years of age in a *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake plantation located at Huimanguillo, Tabasco. Three sampling 1000 m² plots were randomly established within the plantation in order to estimate biomass production and nutrient reserves within the various system compartments. Total biomass (below + aboveground) at eight years of age was 143.31 Mg ha⁻¹ y⁻¹. At this age, the plantation stored 348.3 Kg ha⁻¹ N, 29 Kg ha⁻¹ P, 20.7 Kg ha⁻¹ K, and 143.3 Kg ha⁻¹ Ca within total biomass. At seven/eight year old, nutrient requirements of the plantation were 73.7, 5.5, 3.3, and 41.9 Kg ha⁻¹ y⁻¹ N, P, K, and Ca, respectively. Litter production was 3.25 Mg ha⁻¹ y⁻¹ and it transferred 21.9, 1.5, 1.1, and 20.3 Kg ha⁻¹ y⁻¹ of N, P, K, and Ca, respectively. Decomposition constant was 0.46 y⁻¹, which falls within the typical range for tropical environments. Results suggest that K limits productivity, since this nutrient showed a high retranslocation rate (82 %), high mean residence time within foliage (5.8 years), while use efficiency was higher than international standards published for eucalypt.

Key words: Forest biomass, nutrient cycles, litterfall decomposition.

3.3. Introducción

En México tras casi 20 años de haber empezado con el establecimiento de Plantaciones Forestales Comerciales (PFC) de forma extensiva todavía se carece de estudios de la condición nutrimental. Tal es el caso de las plantaciones con el género *Eucalyptus*. Trabajos realizados por Delgado-Caballero *et al.* (2009), Pérez-Sandoval *et al.* (2012), Rodríguez-Juárez *et al.* (2014) y Palma-López *et al.* (2015) que abordan aspectos de fertilización en plantaciones de eucalipto en México son un gran aporte. Sin embargo, aún hace falta hacer estudios de recirculación de nutrimentos.

Los árboles en etapas juveniles absorben la mayor cantidad de nutrimentos del suelo. No obstante, con el cierre de copas la intensidad en la demanda de nutrimentos disminuye y los requerimientos nutrimentales pueden ser suplidos a través del reciclaje interno (Alvarado y Raigosa, 2012). Bajo este mecanismo cierto número de nutrimentos en el árbol se mueven de tejidos seniles a tejidos en crecimiento, disminuyendo la dependencia de nutrimentos disponibles en el suelo (Kolm y Poggiani, 2003).

Las concentraciones de nutrimentos en follaje y en la hojarasca que se incorpora al suelo influyen en la dinámica de nutrientes en un ecosistema (Osman 2013). La hojarasca y su descomposición forman un eslabón importante en la recirculación de nutrimentos de los bosques. A través de la descomposición se liberan los nutrimentos que quedan a disposición del árbol, mejorando las propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelo (Castellanos-Barliza y León, 2011).

Estudiar la dinámica nutrimental permite valorar los efectos de la silvicultura intensiva en las plantaciones de eucalipto, se genera información para inferir en alternativas silvícolas que garanticen una producción de madera sostenible (Zaia y Gama-Rodrigues, 2004). También mejora las condiciones de fertilidad del suelo y productividad del sitio. El objetivo del presente trabajo fue evaluar los

principales reservorios y flujos de N, P, K y Ca en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T Blake en Huimanguillo Tabasco.

3.4. Materiales y métodos

3.4.1. Sitio experimental.

El sitio de estudio se localiza en el municipio de Huimanguillo Tabasco, en las coordenadas 17°48'29" de latitud norte y 93°52'32" de longitud oeste. La región presenta un clima cálido húmedo (Am) (INEGI, 2005). La temperatura media anual es de 27 °C, la precipitación media anual es de 2200 mm distribuida la mayor parte en los meses de verano.

El relieve de la zona se caracteriza por ligeros lomeríos con pendientes no mayores al 10 %. La vegetación es típica de sabana con pastos para la cría de ganado bovino que se mezclan con árboles principalmente de *Quercus oleoides*, *Byrsonima crassifolia* L. Kunt y *Curatella americana* L.

3.4.2. Diseño de muestreo

El trabajo se hizo en una plantación de *Eucalyptus urophylla* S.T Blake con edades de siete y ocho años y densidad de 1111 árboles ha⁻¹ (espaciamiento de 3 m x 3 m). El experimento se realizó mediante la delimitación completamente al azar de tres parcelas experimentales dentro de la plantación. Cada parcela fue de forma circular con área de 1000 m².

3.4.3. Estimación de biomasa aérea

A todos los árboles de cada parcela experimental se les midió el diámetro normal (1.30 m) y la altura total dos veces durante un año. La primera medición se hizo en abril de 2015, la segunda en junio de 2016. Con ecuaciones alométricas desarrolladas por Hernández (2016) se estimó la biomasa aérea por hectárea en 2015 y 2016.

3.4.4. Estimación de biomasa subterránea

La biomasa de raíces finas se estimó a los ocho años de edad de la plantación. En cada parcela experimental se tomaron cinco muestras de suelo en forma al azar, hasta una profundidad de 30 cm con un muestreador de suelo de 10 cm de diámetro y 20 cm de largo. Para evitar el crecimiento de raicillas del sotobosque tres meses antes de realizar la colecta de suelo se colocó 1 m² de nylon negro en cada espacio elegido para extraer la muestra. Se consideraron raíces finas aquellas menores a cinco milímetro. Las raíces visibles se separaron directamente de la muestra de suelo. Las raíces no visibles se separaron por flotación en agua. Las raíces se colocaron en bolsas de papel y se secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante. Para estimar biomasa de raíces gruesas, en cada parcela experimental se cavaron cinco hoyos de 100 cm x 100 cm x 30 cm, las raíces gruesas se separaron directamente del suelo. Se consideraron aquellas mayores a cinco milímetros de diámetro. En el laboratorio se lavaron con agua y se metieron en estufa de secado hasta peso constante. Ya secas se pesaron con balanza analítica marca OHAUS con precisión de 0.001 g. Tanto para raíces finas y gruesas, la media del peso seco de las cinco muestras de cada parcela se extrapoló a la superficie de 1000 m². El valor por hectárea se obtuvo extrapolando la biomasa promedio de raíces finas y gruesas de las tres parcelas experimentales. En este trabajo no se evaluó incremento anual de raíces finas. El incremento anual de raíces gruesas se obtuvo dividiendo el peso seco estimado por hectárea entre la edad de la plantación.

3.4.5. Recolección de muestras vegetales

En cada parcela se eligieron tres árboles representativos, bien conformados y sin ataque de plagas o enfermedades. Los árboles se derribaron y sobre el suelo se les midió el diámetro normal (DN) con cinta diamétrica y la altura total (AT) con una cinta métrica. De cada árbol se tomaron muestras de raíces gruesas, raíces finas, fuste, ramas y hojas. El fuste se dividió en trozas de tres metros desde el tocón hasta la punta. De cada troza se tomó una rodaja de 5 cm de grosor. De

la copa se tomaron de 15 a 20 hojas maduras. Se tomó una muestra de suelo hasta una profundidad de 30 cm cerca de cada árbol derribado. Se hicieron tres recolectas de todos los componentes durante un año en las mismas parcelas de investigación repitiendo el proceso anterior. La primera se realizó en junio de 2015, la segunda en octubre de 2015 y la tercera en febrero de 2016. La muestra final fue de 27 árboles (nueve por sitio). Los materiales se llevaron al laboratorio del Postgrado en Ciencias Forestales del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Se lavaron con agua de la llave y agua destilada respectivamente. Posteriormente se metieron en bolsas de papel y se secaron en estufa a 70 °C hasta peso constante.

3.4.6. Recolección de hojarasca (detritos)

En cada parcela se instalaron cinco trampas circulares con área de colecta de 1 m² a una altura de 80 cm. Las trampas se vaciaron mensualmente durante un año, de junio de 2015 a mayo de 2016. En el laboratorio con una brocha pequeña se retiraron todas las impurezas ajenas a los detritos (hojarasca de sotobosque, residuos de suelo, insectos muertos). Una vez limpia la hojarasca se secó hasta peso constante, se separó en sus componentes (hojas, ramas, corteza, estructuras reproductivas), cada uno de ellos se pesó por separado en balanza analítica con precisión de 0.001 gramos.

3.4.7. Recolección de agua de lluvia

Se instalaron cuatro colectores de lluvia. Los colectores fueron botellas de plástico forradas con nylon negro para evitar el desarrollo de organismos. Tres colectores se ubicaron dentro de la plantación, uno en cada parcela experimental. El otro se colocó afuera de la plantación, en un claro adyacente, para estimar la precipitación mensual (pluviómetro). Los colectores se vaciaron mensualmente y con una probeta se estimó el volumen de agua capturado. De cada colector se tomaron muestras de agua mensualmente. Para corregir las estimaciones de la precipitación se utilizó un “calibrador”, que consistió en una botella de plástico con un volumen conocido de agua, protegida con un plástico

en forma de “paraguas” que permitió la evaporación pero evitó la entrada de agua de lluvia. El volumen de agua evaporado del calibrador durante el mes se sumó al volumen de agua que almacenó el pluviómetro.

3.4.8.Descomposición de hojarasca

Se siguió la metodología de la “bolsa de descomposición” (Goya *et al.*, 2008; Cizungu *et al.*, 2014). Se recolectaron hojas recién caídas en cada parcela experimental, las hojas se secaron en estufa a una temperatura de 70 °C hasta peso constante. Se pesaron 12 g de hojas secas y se metieron en bolsas de nylon de 25 cm x 25 cm con aberturas de 2 x 2 mm. Se distribuyeron 50 bolsas en forma aleatoria en cada parcela de investigación. Mensualmente durante un año se retiraron cuatro bolsas por parcela, las hojas de las bolsas se volvieron a secar hasta peso constante, se pesaron en balanza analítica OHAUS con precisión de 0.001 g y se registró el nuevo peso adquirido. Para describir la evolución del peso residual se utilizó el modelo de regresión no lineal propuesto por Olson (1963) que se describe en la siguiente ecuación.

$$\frac{X_t}{X_0} = e^{-kt}$$

Dónde: X_t = peso seco del material remanente en un tiempo t (g), X_0 = peso inicial (g), k = Constante de descomposición, t = tiempo transcurrido (días).

3.4.9.Análisis nutrimental

Con las muestras de agua, suelo y tejidos vegetales de las tres parcelas se hicieron muestras compuestas para cada reservorio y fecha de recolecta. Las muestras compuestas se enviaron al laboratorio “Salvador Alcalde Blanco” del Colegio de Postgraduados Campus Montecillo para determinar las concentraciones de Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K) y Calcio (Ca).

3.4.10. Estimación de reservorios y flujos

Con los valores de biomasa y la concentración de nutrientes se estimaron los reservorios para cada nutriente. Los flujos se estimaron a través de los

incrementos de biomasa (restando la biomasa de 2015 a la biomasa de 2016 para cada componente), caída y descomposición de hojarasca, precipitación y la cosecha final a los ocho años, edad a la cual se consideró el turno económico de la plantación.

3.4.11. Eficiencia en la Utilización de Nutrientos (EUN)

Para estimar la EUN (kg kg^{-1}) se utilizó el enfoque propuesto por Hiremath *et al.* (2002).

EUN= Producción Primaria Neta (PPN) dividido entre la absorción total de nutrientes

3.4.12. Tiempo Medio de Residencia (TMR)

El tiempo medio de residencia se obtuvo con el enfoque propuesto por Chapin *et al.* (2011).

TMR en follaje =almacén de nutrientes en follaje dividido por la salidas de nutrientes en hojarasca + lavado o lixiviado de follaje

TMR en el árbol=almacén de nutrientes en el árbol dividido por la salidas de nutrientes por hojarasca + lavado o lixiviado de follaje.

3.5. Resultados

Cuadro 4. Determinaciones químicas del suelo a 30 cm de profundidad en el área de estudio en Huimanguillo, Tabasco.

pH	CE	MO	NT	P	K	Ca	Mg	CIC
	— ds m^{-1} -----	----- %	-----	----- ppm -----	-----	----- cmol kg^{-1} -----	-----	-----
4.67	0.22	8.30	0.18	5.13	0.05	0.33	0.62	10.13

3.5.1. Características del suelo

Con base en los valores de referencia propuestos por NOM-021-RECNAT 2000, el suelo se caracterizó por presentar un pH fuertemente ácido, alto contenido de nitrógeno total (0.15 % - 0.25 %), elevado contenido de MO (> 6 %) y baja CIC (5-

15 cmol kg⁻¹). La concentración de P fue baja (<15 ppm), el K se catalogó como muy bajo (< 0.2 cmol kg⁻¹), al igual que los niveles de Ca (<2 cmol kg⁻¹) y bajas concentraciones de Mg (0.5-1.3 cmol kg⁻¹). Lo que demuestra que la productividad de estos sitios es altamente dependiente de las entradas de nutrimentos a través de la fertilización o depósitos atmosféricos, resaltando la importancia del reciclaje de nutrimentos como una vía para la conservación de elementos nutritivos dentro del sitio (Kolm y Poggiani, 2003).

3.5.2. Biomasa y nutrimentos

Cuadro 5. Concentración de nutrimentos en los tejidos de árboles de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo, Tabasco.

Componente	N	P	K	Ca
	%	ppm		
Fuste (F)	0.20	150.70	65.99	857.24
Ramas (Ra)	0.23	355.16	395.78	966.08
Hojas (Ho)	1.42	1063.44	1850.29	5623.23
Raíces finas (Rg) *	0.52	867.70	494.71	2065.80
Raíces gruesas (Rf)*	0.34	314.10	285.56	869.71
Hojarasca o detritos (Dt)	0.68	468.15	340.69	6248.26

* Hasta 30 cm de profundidad

La concentración de nutrimentos varió según el compartimiento y nutrimentos en cuestión (Cuadro 2). En general los componentes maderables (fuste, ramas, raíces gruesas) tuvieron las más bajas concentraciones de nutrimentos. El fuste tuvo las más bajas concentraciones de todos los nutrimentos. Las hojas presentaron las mayores concentraciones de N, P y K, mientras que los detritos registraron los mayores valores de Ca. El N fue el elemento que se encontró en mayor concentración en todos los compartimentos del árbol. El P y K tuvieron las menores concentraciones en todos los componentes. El Ca presentó la mayor variabilidad de concentración dentro del árbol.

Según los niveles críticos foliares reportados por Dell *et al.* (2001) para *Eucalyptus urophylla* la concentración de N se encuentra ligeramente por debajo del óptimo. P y Ca están en el nivel adecuado, mientras que las concentraciones de K están muy por debajo del óptimo. Estos autores reportan fajas de suficiencia en follaje entre 1.5 y 3.0 % para N, 1000 y 3000 ppm para P, 8000 y 14000 ppm para K y de 3000 a 15000 ppm para Ca.

Cuadro 6. Almacenes de nutrientes en los compartimentos de árboles de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo Tabasco.

Componente	Biomasa		N	P	K	Ca
	Mg ha ⁻¹		kg ha ⁻¹			
Fuste (F)	124	(86)	250.7 (72)	18.7 (64.2)	8.2 (39.6)	106.3 (74.1)
Ramas (Ra)	9.4	(7)	21.8 (6.2)	3.3 (11.4)	3.7 (17.9)	9.0 (6.3)
Hojas (Ho)	3.5	(2)	49.3 (14.1)	3.7 (12.7)	6.4 (31.1)	19.6 (13.7)
Raíces finas (Rf) *	2.4	(2)	12.6 (3.6)	2.1 (7.6)	1.2 (5.8)	5.0 (3.5)
Raíces gruesas (Rg)*	4.1	(3)	13.9 (3.9)	1.3 (4.4)	1.2 (5.7)	3.6 (2.5)
Total	143.3	(100)	348.3 (100)	29.1 (100)	20.7 (100)	143.4 (100)

* Hasta 30 cm de profundidad. Los valores entre paréntesis representan el porcentaje respecto al total

La biomasa total estimada a los 8 años fue de 143.3 Mg ha⁻¹. El fuste almacenó la mayor cantidad de biomasa, mientras que las raíces finas y las hojas tuvieron el menor contenido (Cuadro 3). A pesar que el fuste presentó las más bajas concentraciones (Cuadro 2), la mayor cantidad de nutrientes se almacenó en este compartimento. Esto sucedió porque el fuste presentó la mayor proporción de biomasa del árbol (Cuadro 3). Por el contrario las hojas fueron el segundo almacén con mayor cantidad de nutrientes, aun cuando este compartimento presentó, junto con las raíces finas, la menor cantidad de materia seca; la razón es que este compartimento presenta la mayor concentración de nutrientes comparada con los otros componentes. A nivel de plantación el N fue el elemento presente en mayor cantidad, seguido por el Ca, el P y el K (Cuadro 3).

3.5.3. Flujos de nutrientes

Cuadro 7. Requerimientos anuales de nutrientes de la plantación de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo Tabasco entre los siete y ocho años de edad.

Componente	Δ Biomasa	N	P	K	Ca
	kg ha ⁻¹ año ⁻¹				
Fuste	23160	46.83 (63.5)	3.49 (63.6)	1.53 (47.2)	19.85 (47.4)
Ramas	450	1.05 (1.4)	0.16 (2.9)	0.18 (5.5)	0.43 (1.0)
Hojas	150	2.12 (2.9)	0.16 (2.9)	0.28 (8.6)	0.84 (2.0)
Raíces finas*	0	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)	0.00 (0.0)
Raíces gruesas*	510	1.74 (2.3)	0.16 (2.9)	0.15 (4.6)	0.44 (1.0)
Detritos	3250	21.98 (29.7)	1.52 (27.7)	1.11 (34.2)	20.29 (49.9)
Total	24270	73.72	5.49	3.24	41.87

* Hasta 30 cm de profundidad. Los valores entre paréntesis representan el porcentaje respecto al total del nutriente

El incremento anual de biomasa total (aérea + subterránea) fue de 24270 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Cuadro 4). De esta cantidad el 95.4 % se asignó en el fuste, 1.9 % se asignó en las ramas, 0.6 % y 2.1% se fijó en hojas y raíces gruesas, respectivamente. Los requerimientos anuales de nutrientes se presentan en el Cuadro 4, en el que se observa que la mayor cantidad de elementos nutritivos es requerida para la formación de fustes. La fracción de hojas, a pesar de presentar el menor incremento anual, requiere mayor cantidad de nutrientes que las ramas y raíces gruesas. La caída de detritos registró 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹. De este total 2.0 Mg ha⁻¹ año⁻¹ fueron aportados por las hojas, 609.9 kg ha⁻¹ año⁻¹ por las ramas y 607.4 kg ha⁻¹ año⁻¹ correspondieron a corteza. La mayor caída de detritos se presentó en los meses de menor precipitación. Dependiendo de cada nutriente, entre 27.7 y 49.9 % de los nutrientes absorbidos anualmente, son retornados al suelo por la vía de la caída de detritos (Cuadro 4).

La división de los reservorios de nutrientes en el follaje por las salidas de nutrientes del mismo a través de la caída de hojarasca (Chapin *et al.*, 2011) produce tiempos medios de residencia en ese componente, de 2.24, 2.43, 5.80 y

0.96 años para N, P, K y Ca, respectivamente. Las tasas de reciclaje correspondientes a los mismos nutrientes son 0.45, 0.41, 0.17 y 1.04 año⁻¹. Esto denota que mientras el Ca se recicla totalmente en un año, sólo 17 % del K lo hace en el mismo período.

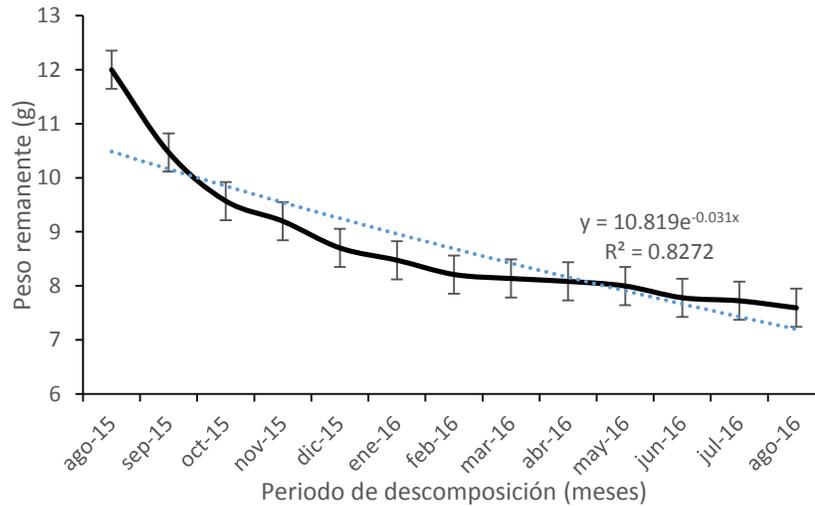


Figura 3. Descomposición de hojas en la plantación de *Eucalyptus urophylla*

La descomposición de la hojarasca después de 12 meses fue de 37 %. El 63 % del peso total permaneció dentro de las bolsas de malla. Con este porcentaje se obtuvo una constante de descomposición (k) de 0.46. En los primeros tres meses la descomposición fue más acelerada con respecto al resto del año (Figura 1). En el primer trimestre se descompuso el 23 % de las hojas. A partir del cuarto mes (noviembre de 2015) hubo una ligera estabilización en la tasa de descomposición. Con base en el modelo exponencial ajustado (Figura 1) el 50 % de las hojas se descompone en un tiempo de 1.58 años. Para que se descomponga el 95 y 99 % del material foliar se requiere un período de 7.7 y 10.06 años respectivamente. Con base en la concentración inicial de nutrientes de los detritos (Cuadro 2), en el primer año se liberaron 8.13, 0.56, 0.41, y 7.50 kg ha⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente. Antes de la abscisión de las hojas, 52 % del N, 56 % de P, 82 % de K y 0 % de Ca fueron retranslocados hacia *órganos* perennes del árbol.

Cuadro 8. Concentración de nutrimentos en la precipitación dentro y fuera de la plantación.

Precipitación	NO ₃	NH ₄	P	K
	ppm			
Precipitación normal (cielo abierto)	6.3	7.89	0.95	0.45
Precipitación dentro de plantación	7.12	12.44	2.55	1.29

La precipitación estimada fue de 2115 mm durante el año de evaluación. Este valor es muy cercano a la media histórica (2233 mm) registrada para el municipio. Además se comparó con la precipitación medida en la estación meteorológica del INIFAP campo experimental Huimanguillo (2071.7 mm) localizado a 50 km del sitio de evaluación. Las concentraciones de nutrimentos en la precipitación bajo el dosel fueron superiores (casi tres veces en los casos de P y K) que la de cielo abierto (Cuadro 5).

Cuadro 9. Eficiencia en la utilización de nutrimentos (EUN) en la plantación de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo Tabasco.

	Eficiencia en la utilización de nutrimentos (kg kg ⁻¹)			
	N	P	K	Ca
EUN	373	5,013	8,504	657

El P y K fueron los nutrimentos más eficientemente utilizados, seguidos por el Ca y el N (Cuadro 7). El coeficiente de utilización decreció en el siguiente orden K>P>Ca>N.

Cuadro 10. Balance nutrimental según el esquema de cosecha en la plantación de *Eucalyptus urophylla* en Huimanguillo Tabasco.

	Extracción	Permanencia en el sitio			Balance
		Suelo*	Raíces*	Hojarasca	
		kg ha ⁻¹			
Cosecha de árbol completo (biomasa aérea)					
N	321.82	162**	26.94	21.98	-110.1
P	25.7	9.23	3.36	1.52	-11.59
K	18.32	33.15	2.36	1.1	18.29
Ca	134.89	120.23	8.52	20.29	14.15
Cosecha de fustes					
N	250.72	162**	26.94	93.08	31.3
P	18.68	9.23	3.36	8.54	2.45
K	8.18	33.15	2.36	11.25	38.58
Ca	106.28	120.23	8.52	48.9	71.37

*A 30 cm de profundidad, ** Considerando una disponibilidad del 5 % con respecto al N total

El aprovechamiento del árbol completo es el esquema que más impacta negativamente las reservas de nutrimentos en el sistema en el largo plazo. Para una segunda rotación las reservas de N y P ya no alcanzarían a cubrir la demanda de la plantación (Cuadro 7). Mediante este esquema es necesario reponer estos nutrimentos en el sitio para poder sostener la productividad en la nueva rotación. El resto de elementos cubren completamente un ciclo de 8 años. Si se dejan las hojas y ramas en el sitio de la cosecha las reservas de nutrimentos aumentan considerablemente logrando incrementar la capacidad productiva del sitio. Dejando estos componentes las reservas nutrimentales son suficientes para una segunda rotación. Es menester mencionar que la caída de hojarasca es constante y este flujo puede suministrar una vasta cantidad de nutrimentos durante un periodo de 8 años. Asumiendo una cantidad constante de 3.25 kg

ha⁻¹ año⁻¹ de hojarasca durante los 8 años del ciclo se estarían incorporando 175.8, 12.2, 8.9 y 162.3 kg ha⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente. Cantidades de nutrimentos suficientes que sumados a los residuos de cosecha alcanzan para cubrir la demanda de un tercer ciclo de corta en el mismo sitio de plantación.

3.6. Discusión

3.6.1. Atributos químicos del suelo

El pH ácido del suelo (Cuadro 1) es el resultado de un alto contenido de ácido carbónico, producto de la descomposición y la mineralización de la MO. La elevada cantidad de MO se explica por el flujo constante de detritos de la plantación y la textura arcillosa que forma complejos órgano-minerales en el suelo superficial. El aporte de materia seca de los eucaliptos y el sotobosque es determinante para mantener los niveles altos de MO, la cual también explica el alto contenido de N total encontrado en el suelo (Palma-López *et al.*, 2015). Según estos autores estas dos variables están correlacionadas. Una fuerte cantidad del N en el suelo puede ser atribuida a las deposiciones realizadas por la lluvia (Cuadro 5). Por el contrario, la baja fertilidad de los suelos, a pesar de la alta cantidad de MO, puede ser explicada por la alta cantidad de aluminio intercambiable encontrado en estos suelos en otros estudios (Pérez-Sandoval *et al.*, 2012; Palma-López *et al.*, 2015). El aluminio se adhiere a las arcillas desplazando los iones (Ca, Mg, K) de la zona de intercambio, los cuales son lavados posteriormente por efecto de la precipitación (Casierra-Posada y Aguilar-Avenidaño, 2007). El aluminio también reacciona con el fósforo formando fosfatos de aluminio que se precipitan hacia horizontes profundos. El pH ácido del suelo también influye en la disponibilidad de nutrimentos (Osman, 2013b). Lo cual explica la deficiencia de K en los tejidos, aunque las reservas en el suelo son bajas, el poco K disponible no es fácilmente absorbible por los árboles de eucalipto. Pero además, estos suelos tienen muy baja CIC, lo que implica una baja capacidad para retener cationes, los cuales son lixiviados. Esto significa que

los programas de fertilización en estos sitios deben ser muy cuidadosamente diseñados, si se desea mantener o mejorar la productividad.

A pesar que la cantidad de N total almacenado en el suelo es alta (3240 kg ha⁻¹) solo una pequeña fracción es fácilmente disponible. El porcentaje varía según el tipo de bosque y las condiciones ambientales. Toit y Scholes (2002) determinaron porcentajes de 5 % del N total fácilmente disponible en plantaciones de *Eucalyptus grandis* de 7 años de edad en Sudáfrica. Para ejercicio de este estudio si consideramos un valor medio de 5 %, alrededor de 162 kg ha⁻¹ de N (Cuadro 7) pueden ser fácilmente disponibles para el árbol.

3.6.2. Biomasa y nutrimentos en los tejidos del árbol

La concentración de nutrimentos en los tejidos del árbol, así como la producción de biomasa están relacionados con la densidad de plantación y la fertilidad del suelo (Hernández *et al.*, 2009). La baja concentración de macronutrimentos en los componentes maderables ya ha sido documentada por otros autores para eucalipto. Al igual que en este estudio González *et al.* (2016) determinaron las menores concentraciones en el fuste en plantaciones de *Eucalyptus globulus* de 10 años de edad en Uruguay. Gatto *et al.* (2014) también observaron esta tendencia en plantaciones de *Eucalyptus urograndis* en Brasil. La mayor concentración de nutrimentos en raíces finas con respecto a las raíces gruesas también fue documentada por Laclau *et al.* (2000) en plantaciones de eucalipto en el Congo. Esta condición es resultado de una mayor actividad biológica de las raíces finas, las cuales son las encargadas de la absorción de agua y nutrimentos. La mayor concentración de nutrimentos en las hojas con respecto a los demás componentes se debe a que estos tejidos realizan los principales procesos metabólicos (fotosíntesis, respiración, transpiración) necesarios para el crecimiento de los árboles (Rosim *et al.*, 2016). El alto contenido de Ca en los detritos está relacionado con la poca movilidad que presenta este elemento en los tejidos del árbol. Al igual que en este estudio Zaia y Gama-Rodrigues (2004) determinaron una a mayor concentración de Ca en los detritos comparado con

el restos de los componentes en plantaciones de *E. grandis*, *E. camaldulensis* y *E. pellita* de seis años de edad. En plantaciones de *Eucalyptus urograndis* de tres años de edad Barreto *et al.* (2012) determinaron que el 49% del nitrógeno fue retranslocado antes de la caída de las hojas. Este valor es similar al encontrado en el presente estudio (52 %). Santos *et al.* (2017) determinaron porcentajes de retranslocación de 58.9 % de N, 73.2 % de P y 73.2 % de K en plantaciones de *Eucalyptus urograndis* de 5 años de edad en Brasil. Zaia y Gama-Rodrigues (2004) obtuvieron valores entre 42.8 y 50 % de N, 55.5 y 66.7 % de P y 0 % de retranslocación de Ca en plantaciones de eucalipto. Los intervalos de estos autores son semejantes a los obtenidos en este estudio.

La eficiencia en la utilización de N y P estimada en este estudio (Cuadro 6) fue inferior a la encontrada para otras plantaciones de eucalipto (Santana *et al.*, 2002; Zaia y Gama-Rodrigues, 2004; Faria *et al.*, 2008; González *et al.*, 2016; Frangi *et al.*, 2016). Por otro lado, la eficiencia en la utilización de K fue superior a la encontrada en la literatura para eucalipto (Santana *et al.*, 2002; Zaia y Gama-Rodrigues, 2004; Faria *et al.*, 2008; Viera *et al.*, 2015; González *et al.*, 2016; Frangi *et al.*, 2016). De los autores citados anteriormente Faria *et al.* (2008) determinaron los mayores valores de EUN para K (1487.8 kg kg⁻¹), el valor es inferior al obtenido en este estudio (Cuadro 6). Según Santana *et al.* (2002) y Faria *et al.* (2008) esta condición sugiere, que el K se encuentran deficientes en el sistema. Lo cual coincide con las bajas concentraciones en el follaje (cuadro 2), bajas concentraciones en el suelo (Cuadro 1), elevado valor de tiempo medio de residencia (TMR) del nutrimento en follaje (5.8 años), baja tasa de reciclaje (0.17 año⁻¹) y elevada tasa de retranslocación del nutrimento antes de la caída de las hojas (82 %). Estos parámetros de la dinámica de los nutrimentos en la vegetación pueden ser indicadores importantes del funcionamiento del ecosistema y su determinación pudiera conducir a la definición de las actividades de manejo adecuadas para sostener la productividad del ecosistema.

3.6.3. Flujo de nutrimentos

Los requerimientos anuales de nutrimentos fueron inferiores a los obtenidos por Laclau *et al.* (2003) para el clon de eucalipto E.PF1 en el Congo, quienes estimaron requerimientos de 136.8, 17.6, 36.4 y 32.6 kg ha⁻¹ para N, P, K y Ca respectivamente a los siete años de edad. Los requerimientos anuales de N y P fueron similares a los obtenidos por Bargali (1995) para plantaciones de *Eucalyptus tereticornis* de ocho años de edad en la india. Este autor obtuvo 81.9 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N y 4.7 kg ha⁻¹ año⁻¹ de P. Los requerimientos anuales de K obtenidos por este autor (62.7 kg ha⁻¹ año⁻¹) fueron superiores a los estimados para la plantación de Huimanguillo. Cabe mencionar que las exigencias nutrimentales no son las mismas para todos los árboles. Factores como: la especie, la edad del árbol, fertilidad del suelo y condiciones ambientales, determinan los requerimientos en ecosistemas forestales (Osman, 2013). Sin embargo, el orden de las necesidades de cada nutrimento fue similar en este trabajo comparado con los estudios de Laclau *et al.* (2003) y Bargali (1995). El N y Ca fueron los nutrimentos más requeridos con respecto a P y K.

La distribución de nutrimentos en los componentes del árbol desempeña un rol importante en la nutrición de las plantaciones, ya que un manejo intensivo aumenta la producción de biomasa y por consiguiente la extracción de nutrimentos a través de la cosecha (Viera *et al.*, 2011). Sólo con la cosecha de fuste se extraen del sistema el 77.9 % de N, 72.7 % de P, 44.7 % de K y 78.8 % de Ca con respecto a la biomasa aérea. A pesar que las hojas y ramas representan sólo el 12.8 % y 9 % con respecto a la biomasa aérea y biomasa total respectivamente, dejar estos compartimentos en el sitio de extracción aporta al suelo 71.1, 7.02, 10.1 y 28.6 kg ha⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente, lo que representa el 22.1 % de N, 27.3 % de P, 55.4 % de K y 21.2 % de Ca con respecto a la biomasa aérea. Tales cantidades suplen el 96 % de las necesidades anuales de N, la totalidad de los requerimientos anuales de P, las demandas de K para tres años de crecimiento de la plantación y casi el 50 % de los requerimientos anuales de Ca. Este fuerte aporte de nutrimentos está relacionado con la alta

concentración de nutrimentos en las hojas comparada con los materiales leñosos (Cuadro 2). Es importante resaltar la importancia del sistema radical como almacén de nutrimentos, ya que el aprovechamiento forestal no altera este compartimento. Al final del turno a los ocho años de edad una cantidad considerable de nutrimentos se queda fijada en las raíces (Cuadro 7). Se hace hincapié que las cantidades estimadas en este estudio son calculadas a 30 cm de profundidad, si se realizan estimaciones a mayor profundidad la masa de nutrimentos puede aumentar. A pesar que no se evaluó la corteza, estudios (Viera *et al.*, 2015; González *et al.*, 2016) demuestran que este componente contiene una alta cantidad de nutrimentos, sobre todo Ca. Las concentraciones pueden ser superiores a las hojas. Por ello se considera que dejar la corteza en el sitio de la cosecha podría mejorar la fertilidad aumentando las reservas de calcio en el suelo.

La caída de detritos fue inferior a la reportada en otros estudios de eucalipto. Zaia y Gama-Rodrigues (2004) determinaron una media de caída de hojarasca de 4.77 Mg ha⁻¹ en plantaciones de eucalipto de seis años. Salvador *et al.* (2014) determinaron una caída de detritos de 9.93 Mg ha⁻¹ en plantaciones de *E. saligna* en Brasil. Según estos autores la caída de detritos está influenciada por la densidad de plantación, estado sucesional, especie y variables climáticas. La proporción de hojas en los detritos que caen anualmente es similar a la obtenida por Schumacher *et al.* (2013), quienes también encontraron 60 % de hojas en los detritos en plantaciones de *E. urophylla* x *E. globulus maidenii*. Zaia y Gama-Rodrigues (2004) determinaron un aporte de 66.4 % de hojas, 24.3 % de ramas y 9.3 % de misceláneos. La tasa de descomposición (k) está dentro del intervalo determinado para otras especies de eucalipto. Costa *et al.* (2005) en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en Brasil determinaron porcentajes de descomposición (30 %) similares a los obtenidos en el presente estudio (37 %). Goya *et al.* (2008) determinaron una k=0.30 para plantaciones de *Eucalyptus grandis* en Argentina. Zaia y Gama-Rodrigues (2004) determinaron en plantaciones de *E. camaldulensis* y *E. pellita* una k de 0.59 y 0.51 respectivamente. Schumacher *et*

al. (2013) determinaron una *k* de 0.54 en plantaciones de *E. urophylla* x *E. globulus maidenii*. Estos autores sugieren que esta tasa de descomposición es baja y se puede atribuir a características propias de la especie. Costa *et al.* (2005) indican que la lenta descomposición también es atribuida a factores ambientales y a la mala calidad de las hojas, pues estos autores encontraron altas concentración de compuestos poco solubles (celulosa y lignina) en hojas viejas de eucalipto.

3.6.4. Concentración de nutrimentos en la lluvia

A través de las deposiciones ingresa una fuerte cantidad de nutrimentos al sistema sobre todo nitrógeno. La mayor concentración de nutrimentos en la precipitación dentro de la plantación ya se ha observado en otros estudios de eucalipto (Andrade *et al.*, 1995; Dovey *et al.*, 2011). Aunque existen reportes de ingresos de iones en regiones de EEUU, similares a los encontrados en el presente estudio (Root *et al.*, 2004), en general éstos son muy elevados comparados con los reportados en la mayor parte de literatura. El Programa Nacional de Depositaciones Atmosféricas (NADP) de los EEUU indica que la depositación de N en el país oscila entre 0 y 7 Kg de N ha⁻¹ año⁻¹. El valor encontrado en el presente estudio es de 162 Kg N ha⁻¹ año⁻¹. La marcada diferencia pudiera estar asociada a la ubicación geográfica y actividades industrial y agropecuaria en los alrededores del sitio de evaluación, pero se sugiere verificar los resultados con otros estudios en el sitio. Investigaciones realizadas por Jia-qi y Li-li (1998) muestran que el agua de mar no contiene iones de NO₃ y NH₄ por lo que la cercanía del océano (40 km) al sitio de estudio, probablemente sólo influye en la presencia de K y Mg (Jia-qi y Li-li, 1998).

3.7. Conclusiones

Los suelos de la plantación estudiada presentan un pH ácido y bajas reservas de P, K y Ca. Los componentes maderables presentaron las menores concentraciones de nutrimentos. La fracción de fuste representa la mayor cantidad de biomasa y nutrimentos. La extracción de fustes es el esquema de cosecha que menos impacta la reserva de nutrimentos en el sistema. El alto contenido de nutrimentos de la hoja mejora la fertilidad del suelo si se dejan los residuos en el sitio de extracción. El K es el nutrimento que más limita la productividad de la plantación. Los nutrimentos más limitantes de la productividad presentan tiempos medios de residencia mayores y tasas de reciclaje menores que los nutrimentos no limitantes.

3.8. Literatura citada

- Alvarado, A., y J. Raigosa. 2012. Nutrición y fertilización forestal en regiones tropicales. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 416 p.
- Andrade, G. C., H. D. Silva., C. A. Ferreira., A. F. J. Bellote., y L. Moro. 1995. Contribución del agua de lluvia en la oferta de nutrientes minerales para *Eucalyptus grandis*. Bosque 16: 47-51. Disponible en http://mingaonline.uach.cl/scielo.php?pid=S071792001995000100004&script=sci_arttext
- Bargali, S. S. 1995. Efficiency of nutrient utilization in an age series of *Eucalyptus tereticornis* plantations in the Tarai belt of central Himalaya. Journal of Tropical Forest Science 7: 383-390. Disponible en <http://www.jstor.org/stable/43581830>
- Barreto, B. P. A., A. C. Gama-Rodrigues., E. F. Gama-Rodrigues., and N. F. Barros. 2012. Nitrogen balance in soil under *Eucalyptus* plantations. Revista Brasileira de Ciência do Solo 36:1239-1248. doi: 10.1590/S0100-06832012000400018
- Casierra-Posada, F., y O. E. Aguilar-Avenidaño. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas 1: 246-257. Disponible en <http://www.soccolhort.com/revista/pdf/magazin/Vol1/vol.1no.2/Vol.1.No.2.Art.11.pdf>
- Castellanos-Barliza, J., y J. D. León. 2011. Descomposición de hojarasca y liberación de nutrientes en plantaciones de *Acacia mangium* (Mimosaceae) establecidas en suelos degradados de Colombia. Revista de Biología Tropical 59: 113-128. Disponible en <http://www.scielo.sa.cr/pdf/rbt/v59n1/a09v59n1.pdf>

- Chapin, F. S., P. A. Matson., and P. M. Vitousek. 2011. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York. Springer-Verlag. 529 p. doi: 10.1007/978-1-4419-9504-9
- Cizungu, L., J. Staelens., D. Huygens., J. Walangululu., D. Muhindo., O. V. Cleemput., and P. Boeckx. 2014. Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and *Eucalyptus* plantation. Forest Ecology and Management 326: 109–116. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.015
- Costa, G., A. C. Gama-Rodrigues., y G. Cunha. 2005. Decomposição e liberação de nutrientes da serapilheira foliar em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no norte fluminense. Revista Árvore 29: 563-570. doi: 10.1590/S0100-67622005000400008
- Delgado-Caballero. C. E., A. Gómez-Guerrero., J. R. Valdez-Lazalde., H. De los Santos-Posadas., A. M. Fierros-González., and W. R. Horwath. 2009. Site index and soil properties in young plantations of *Eucalyptus grandis* and *E. urophylla* in southeastern México. Agrociencia 43: 61-72. Disponible en <http://www.scielo.org.mx/pdf/agro/v43n1/v43n1a7.pdf>
- Dell, B., N. Malajczuk., D. Xu., and T. S. Grove. 2001. Nutrient Disorders in Plantation Eucalypts. Canberra, Australia. ACIAR. 188 p. Disponible en <http://aciarc.gov.au/publication/mn074>
- Dovey, S. B., B. Toit., and W. Clercq. 2011. Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in *Eucalyptus* stands on the Zululand coastal plain, South Africa. Southern Forests 73: 193–206. doi: 10.2989/20702620.2011.639506
- Faria, G. E., N. F. Barros., V. L. Cunha P., I. S. Martins., y R. C. Martins C. 2008. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus spp.* no vale do Jequitinhonha, MG. Ciencia Florestal 18: 363-373. doi: 10.5902/19805098448

- Frangi, J., C. Pérez., J. Goya., N. Tesón., M. Barrera., y M. Arturi. 2016. Modelo empírico integral de una plantación de *Eucalyptus grandis* en Concordia, Entre Ríos. *Bosque* 37: 191-204. doi: 10.4067/S0717-92002016000100018
- Gatto, A., A. Bussinguer., F. Ribeiro., G. Azevedo., M. Bueno., M. Monteiro., y P. Souza. 2014. Ciclagem e balanço de nutrientes no sistema solo-planta em um plantio de *Eucalyptus sp.*, no Distrito Federal. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38:879-887. doi: 10.1590/S0100-06832014000300019
- González, A., J. Hernández., y A. Pino. 2016. Extracción y reciclaje de elementos nutritivos por cosecha de *Eucalyptus globulus* en Uruguay. *Bosque* 37: 179-190. doi: 10.4067/S0717-92002016000100017
- Goya, J. F., J. L. Frangi., C. Pérez., and F. Dalla T. 2008. Decomposition and nutrient release from leaf litter in *Eucalyptus grandis* plantations on three different soils in Entre Ríos, Argentina. *Bosque* 29: 217-226. doi: 10.4067/S0717-92002008000300005
- Hernández, J. 2016. Estimación de biomasa aérea y volumen en plantaciones forestales de *Eucalyptus urophylla* S.T. Blake en Huimanguillo, Tabasco. Tesis de maestría. Texcoco. México. Colegio de Postgraduados. Campus Montecillo. Postgrado en Ciencias Forestales. 104 p.
- Hernández, J., A. Pino., L. Salvo., and G. Arrarte. 2009. Nutrient export and harvest residue decomposition patterns of a *Eucalyptus dunnii* Maiden plantation in temperate climate of Uruguay. *Forest Ecology and Management* 258: 92-99. doi:10.1016/j.foreco.2009.03.050
- Hiremath, A. J., J. J. Ewel., and T. G. Cole. 2002. Nutrient use efficiency in three fast-growing tropical trees. *Forest Science* 48: 662-672. Disponible en <http://people.clas.ufl.edu/jackewel/files/hiremath-ewel-cole-forest-science-2002.pdf>

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). 2005. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Huimanguillo, Tabasco. Consultado 6 diciembre 2016. Disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/27/27008.pdf>
- Jia-qi, L., and S. Li-li. 1998. Analysis of chemical composition of precipitation in a typical background site. *Journal of Environmental Sciences* 10: 325-333. Disponible en http://www.jesc.ac.cn/jesc_cn/ch/reader/create_pdf.aspx?file_no=19980311&year_id=1998&quarter_id=3&falg=1
- Kolm, L., y F. Poggiani. 2003. Ciclagem de nutrientes em povoamentos de *Eucalyptus grandis* submetidos à prática de desbastes progressivos. *Scientia forestalis* 63:79-93. Disponible en <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr63/cap07.pdf>
- Laclau, J. P., J. P. Bouillet., and J. Ranger. 2000. Dynamics of biomass and nutrient accumulation in a clonal plantation of *Eucalyptus* in Congo. *Forest Ecology and Management* 128:181-196. doi: 10.1016/S0378-1127(99)00146-2
- Laclau, J. P., P. Deleporte., J. Ranger., J. P. Bouillet., and G. Kazotti. 2003. Nutrient Dynamics throughout the Rotation of *Eucalyptus* Clonal Stands in Congo. *Annals of Botany* 91: 879-892. doi:10.1093/aob/mcg093
- NOM-021-RECNAT. 2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2001. 85 p.
- Olson, J. S. 1963. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology* 44: 322-331. doi: 10.2307/1932179

- Osman, K. T. 2013. Forest Soils: Properties and Management. Switzerland. Springer. 217 p. doi: 10.1007/978-3-319-02541-4
- Osman, K. T. 2013b. Soils: Principles, Properties and Management. Netherlands. Springer. 271 p. doi 10.1007/978-94-007-5663-2
- Palma-López, D. J., S. Salgado-García., G. Martínez Sebastian., J. Zavala-Cruz., y L. C. Lagunes-Espinoza. 2015. Cambios en las propiedades del suelo en plantaciones de eucalipto de Tabasco, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios* 2:163-172. Disponible en <https://www.researchgate.net/publication/277253917>
- Pérez-Sandoval, R., A. Gómez-Guerrero., A. Fierros-González., and W. R. Horwath. 2012. Site Productivity of Clone and Seed Raised Plantations of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis* in Southeast Mexico. *Open Journal of Forestry* 2: 225-231. doi:10.4236/ojf.2012.24028
- Rodríguez-Juárez, M. I., A. Velázquez-Martínez., A. Gómez-Guerrero., A. Aldrete., y M. Domínguez-Domínguez. 2014. Fertilización con boro en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake en Tabasco. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* doi: 10.5154/r.rchscfa.2013.09.038
- Root, E., W. Jones., B. Schwarz., and J. Gibbons. 2004. Rainwater Chemistry Across the United States. Disponible en [http://www.people.carleton.edu/~bhaileab/environmentalgeology/Rain Water.pdf](http://www.people.carleton.edu/~bhaileab/environmentalgeology/RainWater.pdf)
- Rosim, C. C., T. Y. Hsing., and R. C. Paula. 2016. Nutrient use efficiency in interspecific hybrids of eucalypt. *Revista Ciência Agronômica* 47: 540-547. doi: 10.5935/1806-6690.20160065
- Salvador, M. S., C. Consensa B., y E. F. Araújo. 2014. Produção de serapilheira e devolução de macronutrientes em um povoamento de *Eucalyptus saligna*

- (F. Muell). *Ecologia e Nutrição Florestal* 2:52-62. doi: 10.5902/2316980X15426
- Santana, C. R., N. F. Barros., y J. C. Neves L. 2002. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. *Revista Árvore* 26: 447-457. doi: 10.1590/S0100-67622002000400007
- Santos, M. F., G. Chaer M., A. Diniz R., and F. Balieiro C. 2017. Nutrient cycling over five years of mixed-species plantations of *Eucalyptus* and *Acacia* on a sandy tropical soil. *Forest Ecology and Management* 384: 110-121. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.041
- Schumacher. M. V., R. Corrêa S., M. Viera., y E. F. Araújo. 2013. Produção e decomposição de serapilheira em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus* maidenii. *Cerne* 19: 501-508. doi: 10.1590/S0104-77602013000300018
- Toit, B., and M. C. Scholes. 2002. Nutritional sustainability of *Eucalyptus* plantations: A case study at Karkloof, South Africa. *The Southern African Forestry Journal* 195: 63-72. doi: 10.1080/20702620.2002.10434605
- Viera, M., M. V. Schumacher., P. Trüby., y E. F. Araújo. 2015. Implicações nutricionais com base em diferentes intensidades de colheita da biomassa de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*. *Ciência Rural* 45:432-439. doi: 10.1590/0103-8478cr20120367
- Viera, M., M. V. Schumacher., y D. M. Bonacina. 2011. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. *Revista Árvore* 35: 371-379. doi: 10.1590/S0100-67622011000300001
- Zaia, F. C., y A. C. Gama-Rodrigues. 2004. Ciclagem e balanço de nutrientes em povoamentos de eucalipto na região norte fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 28:843-852. doi: 10.1590/S0100-06832004000500007

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES GENERALES

La producción primaria neta (PPN) estimada está dentro del intervalo determinado para plantaciones de eucalipto alrededor del mundo. La producción de biomasa total (aérea + subterránea) es de 119.04 y 143.31 a los siete y ocho años de edad respectivamente. La mayor proporción de biomasa se almacena en el fuste (86 %), seguido por las ramas (7%), raíces gruesas (3 %), raíces finas (2 %) y hojas (2%). Entre los siete y los ocho años de edad la tasa de acumulación de carbono es de 13 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Los mayores contenidos de carbono se encuentran en el fuste y la hojarasca.

El suelo en el sitio de estudio es ácido y tiene alto contenido de materia orgánica. Sin embargo, presenta bajas reservas de P, K y Ca. La concentración de nutrientes en el árbol varía según el tejido y nutrientes. La fracción de hojas presenta la mayor concentración de N, P y K con respecto a los materiales leñosos. Por otro lado, la mayor concentración de Ca se localiza en la hojarasca. Los requerimientos anuales de nutrientes son de 73.7, 5.5, 3.3 y 41.9 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca respectivamente, lo cual produce un incremento de biomasa total anual de 24,270 kg ha⁻¹ año⁻¹. La caída de hojarasca es de 3.25 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con un máximo durante la temporada de estiaje. A través de la hojarasca se retornan al suelo 21.9, 1.5, 1.1 y 20.2 kg ha⁻¹ año⁻¹ de N, P, K y Ca, en el mismo orden. Esos valores representan el 29.7, 27.3, 33.3 y 48.2 % de los requerimientos anuales.

El K es el nutriente que limita la productividad del sitio. La concentración foliar de este nutriente es inferior a los estándares internacionales para *Eucalyptus urophylla*. El K presenta una alta tasa de retranslocación dentro del árbol; un tiempo medio de residencia (TMR) en el follaje, superior a los otros nutrientes y la eficiencia en su uso es superior a la de otras plantaciones de eucalipto alrededor del mundo. El esquema de cosecha de árbol completo impacta de forma más negativa las reservas de nutrientes del sistema con respecto a la

cosecha sólo de fustes. La extracción de hojas y ramas del sitio exporta grandes cantidades de N y P, cuya reposición es imperativa después de la cosecha para evitar que se comprometa la productividad del sitio a largo plazo.