



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN CIENCIAS FORESTALES

RESERVORIOS Y DINÁMICA DE NUTRIENTES EN UN BOSQUE DE *Pinus montezumae* Lamb. BAJO MANEJO EN NANACAMILPA, TLAXCALA, MÉXICO

NORMA FABIOLA LÓPEZ ESCOBAR

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

MAESTRA EN CIENCIAS

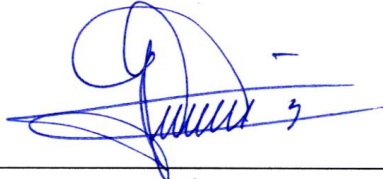



MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2015

La presente tesis titulada: **RESERVORIOS Y DINÁMICA DE NUTRIENTES EN UN BOSQUE DE *Pinus montezumae* Lamb. BAJO MANEJO EN NANACAMILPA, TLAXCALA, MÉXICO**, realizada por la alumna Norma Fabiola López Escobar, bajo la dirección del consejo particular indicado, fue aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS FORESTALES

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 _____ DR. ARMANDO GÓMEZ GUERRERO
ASESOR	 _____ DR. ALEJANDRO VELÁZQUEZ MARTÍNEZ
ASESOR	 _____ DR. AURELIO MANUEL FIERROS GONZÁLEZ
ASESOR	 _____ DR. JOSÉ AMANDO GIL VERA CASTILLO

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Octubre 2015

RESERVORIOS Y DINÁMICA DE NUTRIENTES EN UN BOSQUE DE *Pinus montezumae* Lamb. BAJO MANEJO EN NANACAMILPA, TLAXCALA, MÉXICO

Norma Fabiola López Escobar, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

El estudio de la dinámica de nutrientes en los bosques es fundamental para el diseño de esquemas de aprovechamiento sustentable. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar los reservorios de N, P, K, Ca y Mg en biomasa arbórea, piso forestal y suelo mineral y sus transferencias en dos rodales de *Pinus montezumae*. Se evaluó la producción de hojarasca, tasa de descomposición y reabsorción de N, P y K. La biomasa en árboles y sus componentes se estimó a partir de un muestreo destructivo de diez árboles representativos. La biomasa del piso forestal se cuantificó con seis parcelas circulares de 30 cm de diámetro. La cantidad de nutrientes del suelo mineral se calculó con los análisis de laboratorio para cada nutriente y la densidad aparente los horizontes hasta una profundidad de 80 cm. La descomposición de la hojarasca se estimó con bolsas de descomposición y con datos de caída de hojarasca y piso forestal, asumiendo condiciones de equilibrio. La tasa de reabsorción de N, P y K se midió con la diferencias en concentración entre hojas maduras y seniles. Los resultados indicaron que la biomasa aérea en árboles varió entre 120 y 133 Mg ha⁻¹, y la masa de nutrientes fue de 241.8, 12.4, 28, 166.7 y 117.7 kg ha⁻¹ para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. La biomasa en el piso forestal correspondió a 22 Mg ha⁻¹. El mayor reservorio es el suelo mineral con 5399, 66.7, 1249, 9071 y 2025 kg ha⁻¹ de N total, P extraíble, y cationes intercambiables de K, Ca y Mg, respectivamente. La producción de hojarasca de 6.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, con una masa de nutrientes de 49, 2.7, 2.2, 21.4 y 8.3 kg ha⁻¹ año⁻¹, en el mismo orden. Las tasas de descomposición de la hojarasca por el método de la bolsa y asumiendo condiciones de equilibrio fueron similares con valores de 0.29 a 0.32, que indican que el tiempo que tarda la hojarasca en completar el proceso de descomposición es de 3.5 años. El porcentaje de N, P y K reabsorbido fue de 39, 40 y 53%, respectivamente. La biomasa anual que se cosecha equivale a 4.29 y 5.17 Mg ha⁻¹, y representa salidas en masa mineral de

7.3, 0.26, 0.64, 6.3 y 4.4 kg ha⁻¹ año⁻¹ para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Los reservorios de nutrientes podrían mantener el crecimiento del bosque por más de 160 años, por lo que el ecosistema podría considerarse sustentable. No obstante, el P sería el nutriente crítico en un futuro, por tanto, es importante considerar los efectos de la cosecha sobre el ciclo del P.

Palabras clave: Ciclo de nutrientes, *Pinus montezumae*, manejo forestal, cosecha forestal, biogeoquímica, suelos forestales.

RESERVOIRS AND NUTRIENT DYNAMICS IN A MANAGED FOREST OF *Pinus montezumae* Lamb. IN NANACAMILPA, TLAXCALA, MÉXICO

Norma Fabiola López Escobar, M. C.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

The study of nutrient dynamics in forests is critical to design sustainable harvest methods. This work aimed to evaluate reservoirs of N, P, K, Ca y Mg in tree biomass, forest floor, mineral soil and their transfers in two *Pinus montezumae* stands. Litter production and its decomposition rate and the reabsorption of N, P y K was evaluated. The biomass of trees and its components was evaluated from a destructive sample of ten representative trees. The forest floor was measured from six circular plots with 30 cm in diameter. The mass of soil nutrients was calculated from laboratory analyses and bulk density of each horizon up to 80 cm of soil depth. Litter decomposition was estimated from litter bags and from litter and forest floor data assuming steady conditions. Reabsorption rates for N, P y K were estimated from differences in nutrient concentration between mature and senescent leaves. Results indicated that the aboveground tree biomass ranged from 120 y 133 Mg ha⁻¹, and the mass of nutrients was 241.8, 12.4, 28, 166.7 y 117.7 kg ha⁻¹ for N, P, K, Ca y Mg, respectively. Forest floor biomass was 22 Mg ha⁻¹. The major reservoir was the mineral soil with 5399, 66.7, 1249, 9071 y 2025 kg ha⁻¹ of total N, extractable P, and exchangeable cations of K, Ca y Mg, respectively. Litter production was 6.3 Mg ha⁻¹ y⁻¹, with a mass nutrient of 49, 2.7, 2.2, 21.4 y 8.3 kg ha⁻¹ y⁻¹, in the same order. The decomposition rates with the bag method and assuming steady conditions were similar ranged from 0.29 to 0.32 and, indicating that the mean residence time of the forest floor is 3.5 years. Reabsorption for N, P and K were 39, 40 and 53%, respectively. The harvested biomass per year is 4.29 and 5.17 Mg ha⁻¹, corresponding to a nutrient mass of 7.3, 0.26, 0.64, 6.3 y 4.4 kg ha⁻¹ y⁻¹ for N, P, K, Ca and Mg, respectively. The nutrients reservoirs may sustain forest growth for more than 160 y suggesting that the actual manage system is sustainable. Nevertheless, the P would be the critical element in the future, therefore is important to consider the effect of forest harvesting in this nutrient.

Palabras clave: Nutrient cycling, *Pinus montezumae*, forest management, forest harvesting, biogeochemistry, forest soils.

AGRADECIMIENTOS

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

Al **Colegio de Postgraduados** por la oportunidad brindada para la realización y culminación de mis estudios de maestría.

Al **Dr. Armando Gómez Guerrero**, por la oportunidad y el apoyo para la realización de esta investigación bajo su dirección, por las enseñanzas, las aportaciones, la orientación y las exigencias para su culminación.

Al **Dr. Alejandro Velázquez Martínez**, por la confianza brindada y por su calidad humana, gracias por el apoyo otorgado y el aliento para culminar este trabajo, asimismo, por las observaciones y comentarios al escrito.

Al **Dr. Aurelio M. Fierros González**, por sus valiosas aportaciones y observaciones constructivas que enriquecieron el escrito.

Al **Dr. José A. Gil Vera**, por formar parte del consejo particular y por las observaciones realizadas a la tesis.

Al **Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala** y en especial al **Ing. Juan Flores**, por las facilidades y el apoyo otorgado para la realización de este trabajo dentro de sus predios forestales.

Al **M. C. Rafael Espinoza Marín**, por el invaluable apoyo durante el trabajo de campo.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS	4
2.1 Objetivo general.....	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
2.3 Hipótesis	5
3. REVISIÓN DE LITERATURA.....	6
3.1 Reservorios de nutrientes	7
3.1.1 Biomasa aérea	7
3.1.2 Piso forestal	11
3.1.3 Suelo mineral.....	13
3.2 Transferencias de nutrientes	16
3.2.1 Producción de hojarasca	16
3.2.2 Descomposición de la materia orgánica.....	19
3.2.3 Retranslocación	21
3.3 Efecto del manejo silvícola sobre el ciclo de nutrientes	23
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	26
4.1 Ubicación del área de estudio.....	26
4.2 Selección de sitios de muestreo	30
4.3 Determinación de los reservorios de nutrientes	31
4.3.1 Biomasa aérea del arbolado y masa de nutrientes.....	32
4.3.2 Piso forestal	35
4.3.3 Suelo mineral.....	35
4.4 Cuantificación de la transferencia de nutrientes.....	37
4.4.1 Caída de hojarasca.....	37
4.4.2 Descomposición de hojarasca.....	37
4.4.3 Estimación de la tasa de reabsorción	39
4.5 Cuantificación de la salida de nutrientes por la cosecha forestal	40
4.6 Requerimiento de nutrientes anual por el arbolado	40
4.7 Estimación de la sustentabilidad del ecosistema	41
4.8 Análisis químico y contenido de nutriente	41
5. RESULTADOS.....	43
5.1 Reservorios de nutrientes	43

5.1.1	Biomasa aérea del arbolado	43
5.1.2	Piso forestal	48
5.1.3	Suelo mineral.....	49
5.2	Transferencia de nutrientes.....	53
5.2.1	Caída de hojarasca.....	53
5.2.2	Descomposición de hojarasca.....	58
5.2.3	Reabsorción	62
5.3	Cosecha forestal	63
5.4	Requerimiento anual de nutrientes por el arbolado	65
5.5	Sustentabilidad del ecosistema	67
6.	DISCUSIÓN	69
6.1	Reservorios de nutrientes en el bosque bajo manejo	69
6.2	Transferencias de nutrientes en el bosque bajo manejo	77
6.3	Pérdidas de nutrientes por la cosecha forestal.....	83
6.4	Requerimiento anual de nutrientes del arbolado	83
6.5	Sustentabilidad del bosque bajo manejo.....	84
7.	CONCLUSIONES	85
8.	LITERATURA CITADA	88

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1.- Distribución de cada elemento en los diferentes compartimentos de <i>P. montezumae</i> en San Juan Tetla, Puebla.	9
Cuadro 2.- Contenido total de nutrientes de algunos ecosistemas y la distribución de nutrientes dentro de cada uno.	10
Cuadro 3.- Masa mineral de nutrientes en el suelo mineral de una plantación de <i>Pinus taeda</i> en Misiones, Argentina.	15
Cuadro 4.- Aporte anual de nutrientes al suelo mineral por la caída de hojarasca en algunas especies gimnospermas en el sur de Europa.	18
Cuadro 5.- Biomasa de hongos, bacterias y microfauna en distintos biomas.	20
Cuadro 6.- Coeficientes de descomposición (<i>k</i>) para follaje, material leñoso fino y grueso para bosques deciduos y perennes en ambientes contrastantes.	20
Cuadro 7.- Antecedentes de los aprovechamientos en el Predio Nanacamilpa, Tlaxcala.	30
Cuadro 8.- Características estructurales de los dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	43
Cuadro 9.- Biomasa promedio de cada compartimento de <i>Pinus montezumae</i> en dos rodales, en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	44
Cuadro 10.- Concentración media de nutrientes en cada compartimento de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	44
Cuadro 11.- Concentración media de nutrientes (mg kg^{-1} y %) en el piso forestal de dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	48
Cuadro 12.- Características físicas y químicas del suelo mineral del rodal I de un rodal de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nancamilpa, Tlaxcala. CIC (capacidad de intercambio catiónico), PMP (punto de marchitez permanente).	50
Cuadro 13.- Características físicas y químicas del suelo mineral del rodal II de un rodal de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. CIC (capacidad de intercambio catiónico), PMP (punto de marchitez permanente).	50
Cuadro 14.- Composición elemental promedio de nutrientes del suelo en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	52
Cuadro 15.- Masa neta de nutrientes en el suelo de dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	52
Cuadro 16.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca recolectada por periodo estacional en un rodal de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	55
Cuadro 17.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca recolectada en el año 2014 en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	56
Cuadro 18.- Tasas de mineralización y tiempo medio de residencia (TMR) de la hojarasca acumulada en el piso forestal en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	58
Cuadro 19.- Relación C/N, C/P, C/K, C/Ca y C/Mg de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos de incubación, en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	62
Cuadro 20.- Porcentajes de reabsorción y masa de N y P reabsorbido ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	63
Cuadro 21.- Absorción y requerimiento anual de nutrientes, en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	65
Cuadro 22.- Comparación de la concentración de nutrientes en los diferentes componentes de la biomasa aérea reportado para rodales de <i>Pinus montezumae</i>	71

<i>Cuadro 23.- Comparación de la biomasa aérea en sus diferentes componentes, reportadas para rodales de Pinus montezumae.....</i>	<i>72</i>
<i>Cuadro 24.- Comparación de la biomasa y concentración de nutrientes del piso forestal reportado para rodales de Pinus montezumae</i>	<i>73</i>
<i>Cuadro 25.-Comparación de la masa nutrimental del suelo mineral reportadas para Pinus taeda y P. montezumae.....</i>	<i>75</i>
<i>Cuadro 26.- Comparación del contenido total de nutrientes (kg ha⁻¹) de algunos ecosistemas y la distribución de nutrientes dentro de cada uno.</i>	<i>76</i>
<i>Cuadro 27.- Comparación de la masa mineral de la producción de hojarasca reportada para algunas especies gimnospermas.</i>	<i>79</i>
<i>Cuadro 28.-Comparación de los porcentajes de reabsorción reportadas para algunas especies de Pinus y Quercus.....</i>	<i>82</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.- Diagrama que muestra los diferentes componentes del ciclo de nutrientes de un sistema forestal. Modificado de Landsberg y Gower (1997).	6
Figura 2.- Localización geográfica de Nanacamilpa de Mariano Arista y área limítrofe del predio de San José Nanacamilpa, Tlaxcala.	26
Figura 3.- Ubicación de los sitios de muestreo en Nanacamilpa de Mariano Arista, Tlaxcala.	26
Figura 4.- Precipitación (barras), temperaturas máximas y mínimas (líneas) en la región de Nanacamilpa, Tlaxcala, promedios en el periodo (1949-1988).	28
Figura 5.- Diseño del muestreo y elementos evaluados en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en Nanacamilpa, Tlaxcala. Reservorios (biomasa aérea, piso forestal, suelo mineral) y transferencias (producción de hojarasca, descomposición de la hojarasca y reabsorción) de N, P, K, Ca y Mg.	31
Figura 6.- Masa mineral promedio de los diferentes componentes de la biomasa, en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).	45
Figura 7.- Incremento en área basal (IAB) en el tiempo en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. IAB promedio \pm EEM (arriba), b) IAB acumulada promedio \pm EEM (abajo). EEM= Error estándar de la media.	47
Figura 8.- Masa mineral promedio \pm EEM de la hojarasca del piso forestal en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. EEM= error estándar de la media.	49
Figura 9.- Producción de hojarasca anual en el periodo diciembre 2011- diciembre 2012 en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	54
Figura 10.- Masa mineral promedio de la hojarasca colectada en cada periodo estacional en un rodal de <i>Pinus montezumae</i> , en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	56
Figura 11.- Masa mineral promedio de la hojarasca recolectada en el año 2014 en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.	57
Figura 12.- Porcentaje de peso remanente (líneas lisas: promedio \pm EEM; líneas punteadas: extrapolación a 830 días) en bolsas en descomposición de hojarasca y ecuaciones de la tasa de descomposición, en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. EEM= Error estándar de la media.	59
Figura 13.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos (0, 63, 126, 217, 252 y 336 días) del rodal I en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. P, K y Mg (arriba), Ca y N (abajo). PPM= Partes por millón.	60
Figura 14.- Concentración media de nutrientes (PPM) de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos (0, 63, 126, 217, 252 y 336 días) del rodal II en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. P, K y Mg (arriba), Ca y N (abajo). PPM= Partes por millón.	61
Figura 15.- Masa mineral promedio que se exporta por la cosecha forestal en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).	64
Figura 16.- Masa mineral promedio de la ganancia neta anual de la biomasa aérea en los diferentes componentes del arbolado, en dos rodales de <i>Pinus montezumae</i> en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).	66
Figura 17.- Balance entre los reservorios (letras anaranjadas kg ha^{-1}), transferencias (letras verdes $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), salidas (letras rojas $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) y requerimiento (letras azules $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).	

¹ año⁻¹) de nutrientes de un bosque de Pinus montezumae en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (izquierda), Rodal II (derecha)..... 68

1. INTRODUCCIÓN

Como resultado de la alteración de los bosques y la manifestación de cambios ambientales, durante los últimos años, ha crecido el interés por estudiar los reservorios y flujos de nutrientes en relación a la funcionalidad de los ecosistemas, especialmente en los sistemas forestales manejados, los cuales son afectados por el efecto de las prácticas silvícolas, provocando cambios en su productividad y su continuidad (Goya *et al.*, 2003; Imbert, *et al.*, 2004).

Los ciclos biogeoquímicos en los bosques son importantes por su relación con el crecimiento de estos y la pérdida de nutrientes del sistema, lo cual puede comprometer su sustentabilidad (Landsberg y Gower, 1997). Mediante el estudio del ciclo de nutrientes pueden estimarse indicadores de la eficiencia en productividad del bosque y hacer proyecciones sobre el manejo sustentable (Goya *et al.*, 2003; Imbert *et al.*, 2004).

Los principales procesos que se asocian al ciclo de nutrientes en un sistema forestal corresponden a:

- Absorción por las plantas (Árboles, arbustos y herbáceas)
- Translocación (Ciclo interno en la vegetación)
- Retorno al piso y suelo forestal (Hojarasca)
- Mineralización (Descomposición de material orgánico)
- Inmovilización (Competencia por nutrientes por los microorganismos del suelo)
- Ingreso de nutrientes vía atmosférica (Depósito húmedo y seco), geológica (Intemperismo de la roca) y biológicas (Plantas fijadoras de nitrógeno)
- Salida o exportación de nutrientes (Por la cosecha forestal, Lixiviación, erosión e incendios)

No obstante, estos procesos tienen relaciones más complejas con los diferentes compartimentos del sistema, es decir, la biomasa aérea (fuste, corteza, ramas y follaje), el piso forestal, las raíces, el suelo mineral, la solución del suelo y la roca madre. Sin embargo, no siempre es posible estudiar todos los procesos y compartimentos de un sistema forestal, pero el estudio de los más representativos con relación a su masa neta nos ayuda a entender el funcionamiento del ecosistema (Imbert *et al.*, 2004).

El principal reservorio de nutrientes que limita el crecimiento de las plantas dentro de los sistemas forestales es el suelo mineral, por lo tanto, su conservación es un factor clave en el manejo forestal, aunque sus reservas totales generalmente superan lo requerido por la vegetación, un proceso como la mineralización de nitrógeno controla su disponibilidad antes que las plantas puedan absorberlos (Grigal, 2000; Landsberg y Gower, 1997).

La forma de aprovechar el arbolado de los bosques puede provocar pérdidas considerables en los reservorios de nutrientes del ecosistema y en consecuencia, cambios en la productividad de las rotaciones sucesivas (Goya *et al.*, 2003; Grigal, 2000; Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997). Los cambios en productividad de las rotaciones sucesivas se analizan como una referencia para modificar la estrategia de aprovechamiento y no comprometer la productividad a largo plazo.

En bosques manejados, la cosecha forestal es la actividad que causa mayor impacto en la disminución de nutrientes, debido a la extracción de los componentes del árbol (fuste, corteza, ramas, hojas) y la vulnerabilidad del suelo a la erosión después del aprovechamiento forestal (Grigal, 2000; Imbert *et al.*, 2004). Aunque, comparado con cultivos agrícolas intensivos, las especies forestales demandan menos nutrientes y el suelo tiene reservas bastas, los métodos intensivos puede llegar abatir los reservorios de nutrientes del bosque y por consiguiente el crecimiento del mismo (Goya *et al.*, 2003; Hopmans *et al.*, 1993). Por lo anterior, tener conocimiento de la

magnitud de los reservorios de nutrientes, del cómo se transfieren entre estos y la cantidad de nutrientes exportados por la cosecha forestal, ayuda a valorar si los métodos de aprovechamiento son sustentables.

El objetivo del presente estudio consistió en cuantificar los principales reservorios de nutrientes, su transferencia y la exportación a través de la cosecha forestal en un bosque de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, en el Estado de Tlaxcala; con la finalidad de conocer si mediante el manejo forestal actual que realiza este ejido, los reservorios y las transferencias de nutrientes podrán mantener la productividad del bosque en el mediano y largo plazo.

Las preguntas que se formularon fueron las siguientes

- I. ¿Existe equilibrio entre los requerimientos del ecosistema y el regreso de nutrientes al piso forestal?
- II. ¿La liberación de nutrientes del piso forestal al suelo mineral es acorde a los requerimientos del ecosistema?
- III. ¿Cuál es la importancia relativa de la cosecha forestal respecto a los reservorios de nutrientes del suelo?
- IV. ¿Asumiendo las condiciones actuales de aprovechamiento, en cuantos años se agotarían estos reservorios?

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivo general

Cuantificar los principales reservorios de nutrientes, las transferencias y la exportación a través de la cosecha forestal en un bosque de *Pinus montezumae* Lamb. bajo manejo en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala, con la finalidad de conocer si los reservorios y las transferencias pueden sostener el crecimiento del bosque bajo el manejo forestal implementado por el ejido.

2.2 Objetivos específicos

- Determinar los reservorios de N, P, K, Ca y Mg en biomasa aérea, piso forestal y suelo mineral (80 cm de profundidad) con la finalidad de conocer la magnitud de los almacenamientos de nutrientes en el sistema.
- Cuantificar la transferencia de N, P, K, Ca y Mg del dosel al piso forestal y del piso forestal al suelo mineral para conocer si existe equilibrio entre lo que circula en el sistema y los requerimientos de la vegetación.
- Medir la tasa de reabsorción de N, P y K en el ecosistema con la finalidad de conocer la capacidad del bosque para maximizar la utilización de los nutrientes.
- Estimar la proporción de nutrientes exportados anualmente con respecto a los reservorios y las transferencias de nutrientes.
- Cuantificar la proporción de nutrientes requerido anualmente por el arbolado con respecto a las transferencias dentro del sistema.
- Estimar para cuantos años pueden mantenerse los reservorios de nutrientes del sistema bajo las condiciones actuales de manejo

2.3 Hipótesis

- Existe equilibrio entre los requerimientos del ecosistema y el regreso de nutrientes al piso forestal
- La liberación de nutrientes del piso forestal al suelo mineral es acorde a los requerimientos del ecosistema
- Los reservorios de nutrientes del sistema no se afectan de manera importante a largo plazo por la cosecha forestal
- Bajo las condiciones actuales, el aprovechamiento forestal que lleva a cabo el Ejido de Nanacamilpa es sustentable.

3. REVISIÓN DE LITERATURA

Para estudiar el ciclo de nutrientes de los ecosistemas forestales debe tenerse en cuenta que éste consta de tres componentes generales: las entradas al sistema, las transferencias internas y las salidas. Los aportes o entradas incluyen procesos tales como el intemperismo de la roca madre, la fijación biológica de nitrógeno, los aportes atmosféricos y la transferencia por biota. Las transferencias internas dadas entre las plantas y el suelo, comprenden procesos como absorción radical y foliar, retranslocación, lavado de copa, pérdidas por consumidores secundarios y descomposición; por último, las pérdidas o salidas implican procesos de lixiviación, escurrimiento superficial, emisión de gases y aerosoles, transferencia por biota u explotación de recursos (Imbert *et al.*, 2004; Figura 1).

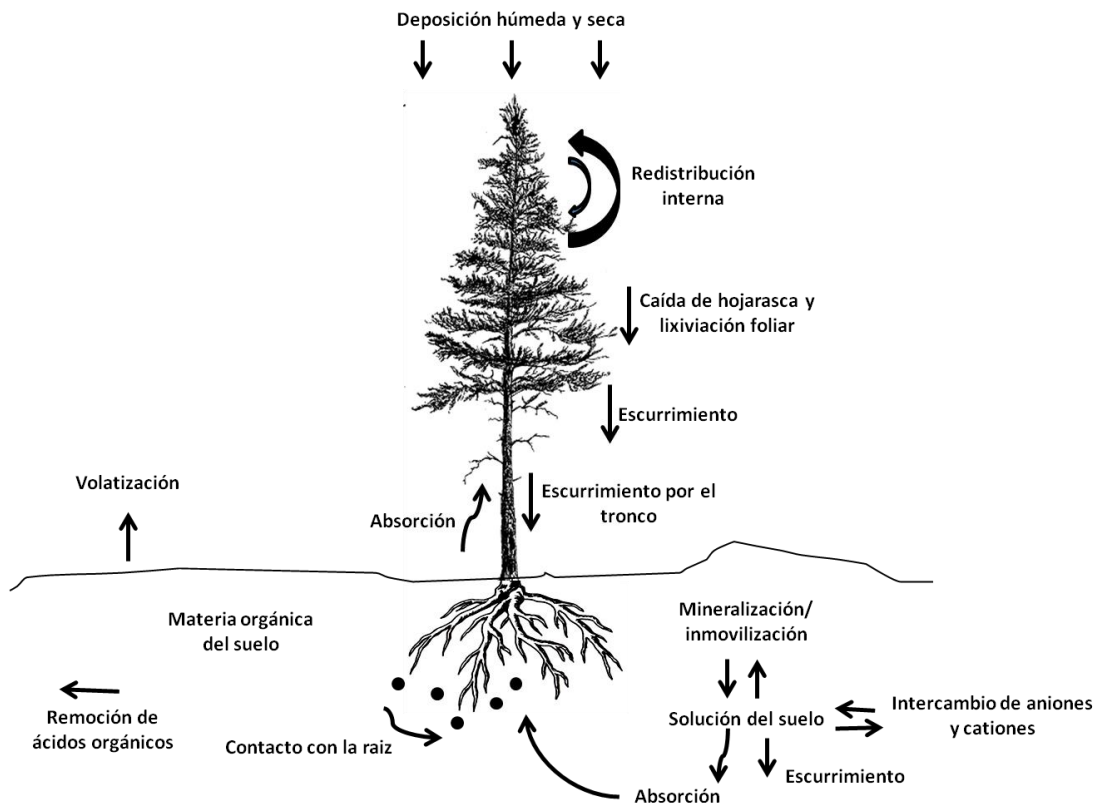


Figura 1.- Diagrama que muestra los diferentes componentes del ciclo de nutrientes de un sistema forestal. Modificado de Landsberg y Gower (1997).

Las transferencias internas, también conocidas como ciclo interno de nutrientes o ciclo biogeoquímico, se componen de los flujos de nutrientes que entrelazan a los reservorios de la biomasa aérea y el suelo mineral.

Para entender el impacto del manejo forestal sobre las cantidades absolutas y relativas de nutrientes en dichos reservorios, así como su efecto en los procesos involucrados en esos flujos, debe estudiarse el funcionamiento de dichos reservorios con sus diferentes componentes (Imbert *et al.*, 2004).

3.1 Reservorios de nutrientes

3.1.1 Biomasa aérea

La biomasa aérea está constituida por diferentes componentes, de los cuales los más representativos corresponden a: fuste, ramas y follaje. Su acumulación en un rodal está determinada por la productividad del sitio y su condición (luz, temperatura, agua y nutrientes), así como la eficiencia de las prácticas silvícolas. La mayor cantidad de biomasa neta acumulada en la parte aérea del árbol corresponde al fuste, seguido de ramas y por último follaje (Imbert *et al.*, 2004; Rodríguez y Álvarez, 2010), los componentes de hoja y raíces finas que se renuevan cada año también forman parte de la productividad.

Para algunas especies forestales tropicales, como *Eucalyptus spp*, se han calculado distribuciones de biomasa que corresponde entre 70 a 94% para fustes, de 5 a 26% para ramas y 2% para hojas (Goya *et al.*, 2003; Hopmans *et al.*, 1993; Rodríguez-Juárez *et al.*, 2014). Para especies de clima templado, como es el caso de *Pinus spp*, se han calculado porcentajes que van de 78 a 82% para fustes, de 10 a 12% para ramas y de 3 a 4% para hojas (Goya *et al.*, 2003; Merino *et al.*, 2003). En el caso particular de rodales de la localidad de San Juan Tetla, Puebla de *Pinus montezumae* se estimó una distribución de 82% en fuste, 16% en ramas y 1% en hojas (Garcidueñas, 1987).

En Argentina se encontró que en plantaciones de *Pinus taeda* la biomasa aérea acumulada en los sistemas forestales, correspondió a 388 Mg ha⁻¹, a los 20 años de edad, la cual fue considerada como una producción elevada (Goya *et al.*, 2003). En plantaciones de *P. radiata* con edades maduras, en Galicia, España, se encontró una biomasa aérea promedio total de 240 Mg ha⁻¹, un resultado menor comparada con otros estudios para la misma especie (Merino *et al.*, 2003). En el caso de *P. montezumae* en San Juan Tetla, Puebla, registró una biomasa total de 393.88 Mg ha⁻¹, en plantaciones con una edad promedio de 38.36 años (Garcidueñas, 1987).

La concentración de nutrientes también varía entre componentes y de acuerdo a su edad fisiológica; las mayores concentraciones se encuentran en las hojas, seguidas por la corteza y ramas, y por último en el fuste. En sentido radial por ejemplo, la concentración de nitrógeno aumenta del centro a la corteza (Silva *et al.*, 2015). El fuste y las ramas presentan concentraciones más bajas de nutrientes, ya que contienen mayor proporción de celulosa, hemicelulosa y lignina. En las hojas que presentan una pared celular menos lignificada y mayor contenido de carbohidratos y proteínas, su concentración de nutrientes es más alta (Rodríguez y Álvarez, 2010).

En *Pinus taeda*, en Argentina, se reportó el contenido elemental de nutrientes para diferentes componentes del árbol, en el follaje fue de 17.2, 0.91, 4.0, 2.8 y 0.6 mg g⁻¹ para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente; para ramas, en el mismo orden, correspondió a 2.7, 0.12, 1.1, 1.6 y 0.3 mg g⁻¹; mientras que para el fuste se registró 1.4, 0.03, 0.5, 0.7 y 0.15 mg g⁻¹ para N, P, K, Ca y Mg (Goya *et al.*, 2003). En el orden hoja, rama, fuste, destaca un aumento en la relación N/P que va de 18 a 46 y que nos indica las diferencias importantes entre componentes.

La masa de nutrientes por cada compartimento de la biomasa aérea, se estima con la concentración promedio de nutrientes y la masa del

componente. Con ello, es posible cuantificar la masa de nutrientes del arbolado de un sistema forestal (Rodríguez y Álvarez, 2010) y de esta manera conocer el total del reservorio. Generalmente, el fuste es el compartimento con mayores reservas de nutrientes por la elevada biomasa que representa con respecto a los demás componentes.

Así se calculó la masa de nutrientes de rodales de *Pinus montezumae* a una edad promedio de 38 años, su distribución por hectárea en cada compartimento se muestra en el Cuadro 1 (Garcidueñas, 1987). La columna indicada como total corresponde a la masa neta de cada nutriente por hectárea.

Cuadro 1.- Distribución de cada elemento en los diferentes compartimentos de *P. montezumae* en San Juan Tetla, Puebla.

Elementos	Masa mineral (kg ha⁻¹)				
	Fuste	Corteza	Ramas	Follaje	Total
N	401	126	148	62	737
P	56	9	22	10	97
K	231	2	53	17	333
Ca	362	147	154	15	679
Mg	139	29	33	8	209
Mn	45	5	32	7	89

Fuente: Modificado de Garcidueñas (1987)

Landsberg y Gower (1997) realizaron una comparación del contenido total nutrimental de nitrógeno, fósforo y potasio en el ecosistema (biomasa aérea + suelo mineral), en seis diferentes ecosistemas. Encontraron que la masa nutrimental entre los diferentes ecosistemas es variable, por tanto, es difícil realizar generalizaciones entre ellos (Cuadro 2). Dicha variabilidad es una respuesta individual de los ecosistemas a las condiciones ambientales, a los requerimientos nutrimentales del arbolado y a las prácticas silvícolas (Rodríguez y Álvarez, 2010).

Cuadro 2.- Contenido total de nutrientes de algunos ecosistemas y la distribución de nutrientes dentro de cada uno.

Ecosistema	kg ha ⁻¹	Nitrógeno (% del ecosistema)			kg ha ⁻¹	Fósforo (% del ecosistema)			kg ha ⁻¹	Potasio (% del ecosistema)		
	Total	Suelo	Madera	Follaje	Total	Suelo	Madera	Follaje	Total	Suelo	Madera	Follaje
Bosque boreal perennifolio de aciculares												
<i>Picea mariana</i>	689	75	24	1	2	92	5	3	1692	98	2	<1
<i>Pinus banksiana</i>	3729	96	3	1	6100	100			98707	99	<1	<1
Bosque boreal caducifolio de latifoliadas												
<i>Betula papyrifera</i>	2879	91	8	1	26	75	21	4	7546	97	3	<1
Bosque templado perennifolio de aciculares												
<i>Pinus taeda</i>	7650	95	4	1	960	98	2	<1	930	84	16	1
<i>Pinus resinosa</i>	4400	91	7	2	107	31	56	13	1 700	74	24	2
Bosque templado caducifolio de latifoliadas												
<i>Liriodendron tulipifera</i>	3500	95	4	1	2840	98	2	<1	8 130	93	6	<1
<i>Fagus silvatica</i>	6332	94	5	1	3150	98	2	<1	245	49	49	2
Bosque templado perennifolio de latifoliada												
<i>Eucalyptus regnans</i>	18222	97	2	< 1	3356	98	1	1	2 149	56	38	1
<i>Eucalyptus obliqua</i>	14097	96	3	<1	1743	98	2	<1	1 952	83	16	1
Bosque tropical												
Montañoso	19200	99	1	<1	16	37	63	<1	3 750	71	29	<1
Tierras bajas	5480	85	13	2	1410	97	2	<1	13720	99	<1	<1

Fuente: Modificado de Landsberg y Gower (1997)

También influye la capacidad de retranslocación de nutrientes como N y P de cada especie, lo que afecta las concentraciones en la hojarasca. Estos mismos autores también encontraron que el contenido nutrimental que presenta la biomasa aérea respecto al contenido total del ecosistema es relativamente pequeño (Cuadro 2). Cabe mencionar que el crecimiento de las plantas está en función del nutriente que más limita su crecimiento (Imbert *et al.*, 2004).

3.1.2 *Piso forestal*

El piso forestal o mantillo está compuesto principalmente por hojas, tejido leñoso de ramas y fuste, frutos y flores. Cumple una función importante en el ciclo de nutrientes, ya que es uno de los principales almacenes de nutrientes incorporados en la materia orgánica, principalmente de nitrógeno, fósforo y azufre los de los cuales se generan formas asimilables para la raíz mediante la mineralización. El piso forestal es un reservorio de carbono, el cual se incorpora al suelo a través de la descomposición, aunque este nutriente no se absorbe por la raíz es importante en el ecosistema como una forma estabilizada de carbono que contribuye a la capacidad de intercambio de cationes (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997).

En un estudio con *Pinus taeda* en Argentina, donde se cuantificó la proporción de nutrientes contenidos en el mantillo respecto al suelo mineral, hasta un metro de profundidad, se encontró que 1.6 % de N total, el 18% de P disponible, el 8% de Mn, el 4% de K, el 3% de Mg, Ca y Fe, y el 1% de S y Al presentes en el suelo mineral se encuentran en el mantillo (Goya *et al.*, 2003).

La cantidad de materia orgánica presente en el piso forestal suele ser variable en los diferentes ecosistemas. En rodales de *Pinus taeda* se cuantifico la masa del mantillo en 18 Mg ha⁻¹ (Goya *et al.*, 2003), en rodales

de *Pinus radiata* osciló entre 27 y 65 Mg ha⁻¹ (Merino *et al.*, 2003), mientras que en rodales de *Pinus montezumae* se registró en 26.1 Mg ha⁻¹ (Garcidueñas (1987). Estos datos indican que cantidad de mantillo acumulado es muy variable y depende de la velocidad de descomposición, determinada a su vez por el clima.

En el mantillo se diferencian tres subcapas, la primera es la superficial llamada L, corresponde al almacén de la materia orgánica recién incorporada al piso forestal; la segunda identificada como F, donde se inicia el proceso de transformación de la materia orgánica, en esta capa el material biológico se encuentra fragmentada y con algún grado de fermentación o descomposición; la tercera capa llamada H, la materia orgánica se encuentra en un estado de descomposición bioquímica formando sustancias húmicas y reaccionando con las partículas finas del suelo como las arcilla, dando lugar a complejos órgano-minerales (Rodríguez y Álvarez, 2010).

Se ha documentado que la acumulación de algunos elementos nutrimentales en el piso forestal o mantillo es mayor conforme la capa presenta mayor grado de descomposición. La masa nutrimental en tres capas del mantillo (L, F y H) en plantaciones de *Pinus montezumae*, fue evaluada por Garcidueñas (1987), quien encontró diferencias significativas entre las tres capas; las cantidades de N, P, K, Ca, Mg y Mn fueron mayor en la capa H. La concentración de nutrientes en dos capas del mantillo (L y F) en plantaciones de *P. taeda* fue evaluada por Goya *et al.* (2003), quienes encontraron que la cantidad de N, P, S, Fe y Mn fue mayor en la capa F.

Además de ser un reservorio importante de nutrientes, el piso forestal o mantillo posee otras propiedades, favorece la infiltración del agua; amortigua la variación térmica, reduce la fuerza erosiva de la lluvia y del escurrimiento superficial. Los daños por erosión pueden ser de hasta 70 t

ha⁻¹ de suelo y persistir hasta 15 meses después de la corta antes del establecimiento de herbáceas (García, 2008).

3.1.3 Suelo mineral

La calidad del suelo juega un papel importante en la sostenibilidad del bosque porque determina la productividad actual y futura del mismo. La calidad del suelo está determinada por sus propiedades físicas y químicas, entre las primeras pueden citarse: la profundidad, la textura, la densidad aparente, la retención de humedad; entre las propiedades químicas pueden mencionarse la materia orgánica, el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), la concentración de nutrientes, siendo éste último uno de los factores principales que mantienen la calidad del suelo. (Fox, 2000; Imbert *et al.*, 2004).

El suelo mineral es considerado el reservorio de nutrientes más importante en los bosques, ya que generalmente supera al contenido de estos en la biomasa aérea. En el suelo se encuentran la mayoría de los nutrientes que mantienen el crecimiento de la vegetación, aunque cabe mencionar que el capital de nutrientes varía ampliamente entre los diferentes ecosistemas (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997; Cuadro 2).

La condición del suelo mineral se puede afectar indirectamente por las prácticas silvícolas. Por ejemplo, la cosecha forestal y la preparación de sitio son consideradas prácticas que impactan en la materia orgánica y en las propiedades físicas y químicas del suelo, el efecto negativo incrementa con la intensidad de las prácticas (Aguilar y Arrau, 1995; Fox 2000).

La compactación del suelo por efecto de la cosecha forestal genera cambios en la textura, principalmente los de textura fina, aumentos en la densidad aparente y por consiguiente reducción de los espacios porosos. En un estudio realizado en plantaciones en el Norte de España se registraron

aumentos en la densidad aparente del suelo conforme fue incrementando la intensidad de las prácticas de cosecha, el valor de densidad aparente en la práctica más intensa incrementó hasta 1.5 g cm^{-3} (García, 2008)

Por otra parte, cuando se realiza la cosecha forestal se extraen nutrimentos como N, P, K, Ca y Mg; a medida que se incrementa la cantidad de nutrimentos extraídos por la cosecha forestal causan una disminución en los reservorios del suelo, este efecto se observa principalmente de una rotación a la siguiente. Sin embargo, para el caso particular de plantaciones de *Pinus* algunos autores han indicado que los nutrientes extraídos se aproximan a las cantidades que reponen el sistema mediante sus procesos naturales (García, 2008), principalmente en aquellos nutrimentos que son requeridos en bajas cantidades por el arbolado. Aunque el estudio de Martiarena *et al.* (2009) muestra que en las plantaciones de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina la proporción de P y K extraído por la cosecha con respecto a las reservas del suelo mineral es relativamente alta.

La extracción de los restos de la cosecha también puede ocasionar un efecto adverso sobre la humedad y temperatura del suelo. Se ha documentado que después de una corta con la extracción de residuos de cosecha puede provocarse una pérdida de más del 10% de la humedad del suelo y prolongar los periodos de sequía (García, 2008). Este es un efecto físico que se ocasiona por la eliminación del efecto de acolchado del material orgánico superficial sobre la superficie. La materia orgánica así como la diversidad de microorganismos del suelo también son unas de las propiedades afectadas debido a la cosecha forestal. La disponibilidad de agua del suelo por dos o tres semanas más en el periodo seco puede ser la diferencia para el establecimiento de la siguiente masa forestal en plantaciones forestales (Gómez *et al.*, 2002a; Gómez *et al.*, 2002b)

Por otra parte, Goya *et al.* (2003) en un estudio realizado en plantaciones de *Pinus taeda* en el norte de Misiones Argentina registró únicamente cambios

en los valores en la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y saturación de bases por efecto por la cosecha forestal. Cabe mencionar que la CIC favorece la retención de nutrientes en los suelos forestales (Rodríguez y Álvarez, 2010). La masa mineral (kg ha⁻¹) de algunos nutrientes encontrada en estas plantaciones a una profundidad de 100 cm se muestra en el Cuadro 3; los valores indican que para todos los elementos la masa mineral incremento conforme aumentó la profundidad del suelo. Sin embargo, a los 30 cm de profundidad, el suelo contiene una gran proporción de los elementos (41% del C, 39% del N y 32% del S) y a los 10 cm de profundidad contiene el 30% de P, Fe y Mn almacenado en el perfil.

Cuadro 3.- Masa mineral de nutrientes en el suelo mineral de una plantación de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina.

Profundidad	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Na	Al	Fe	Mn
cm	kg ha⁻¹										
0-10	32346	1552	12.6	82	616	65	169	20	378	672	41
10-30	37214	2678	11.1	121	878	70	571	43	997	516	31
30-100	10130	6525	25.5	347	1759	211	1589	98	2928	792	81
1											
TOTAL	17086	10775	49.	55	325	34	232	16	430	198	15
(0-100)	0	5	3	0	2	6	9	1	2	0	4

Fuente: modificado de Goya, *et al.* (2003)

Por otra parte, Merino *et al.* (2003) realizaron un estudio en plantaciones de *Pinus radiata* en Galicia, España, encontraron valores muy bajos de P en el suelo mineral, esto como consecuencia de la fuerte acidez de los suelos, debido a que los valores de pH del suelo fueron inferiores al rango óptimo de solubilidad de este elemento (5 -7).

3.2 **Transferencias de nutrientes**

Los reservorios de nutrientes presentes en los sistemas forestales se encuentran entrelazados o conectados a través de flujos o procesos que cumplen una función importante para transferir los diferentes nutrientes dentro del sistema y mantener su disponibilidad y permanencia en el bosque. La materia orgánica depositada en el piso forestal y el suelo mineral juega un rol importante en transportar los nutrientes a través del ecosistema (planta-suelo). La materia orgánica controla la entrada de nutrientes al suelo a través de la producción de hojarasca y su transformación a formas asimilables para las plantas a través de la descomposición. Por otra parte, el bosque realiza un uso eficiente de los nutrientes a través de la retranslocación, y mantener disponibilidad de un nutriente en el suelo.

3.2.1 Producción de hojarasca

La producción de materia orgánica es el proceso de caída de hojas, ramas, corteza, frutos, entre otros, procedente del dosel arbóreo. La mayor cantidad de biomasa acumulada en el piso forestal está constituida por las hojas, que puede ser entre el 60 al 75% (Imbert *et al.*, 2004), comprado con otros componentes como la medera incorporada al suelo, se ha calculado que representa aproximadamente entre el 17 y 37% del total de la producción de residuos orgánicos (Correa *et al.*, 2007; Luna y Hernández, 2009).

En un estudio realizado en Colombia, donde se evaluó la caída de residuos orgánicos en tres ecosistemas; un bosque de encino (*Quercus spp*), y plantaciones de pino (*Pinus patula*) y ciprés (*Cupressus lusitanica*), se encontró que la producción de hojas en un año representó el 60% del total (8.2 Mg ha⁻¹ año⁻¹) para el bosque de encino, 64% del total (7.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹) para la plantación de pino y 70% del total (3.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹) para la

plantación de ciprés (Correa, *et al.* 2007). En otro trabajo realizado en Durango, México, se evaluó la producción de residuos orgánicos en un bosque de *Pinus cooperi* y *P. leiophylla*, encontrándose que la acumulación anual de follaje correspondió al 73.5% de la biomasa total producida (3.9 Mg ha⁻¹ año⁻¹; Luna y Hernández, 2009).

Debido a la gran proporción que se produce de follaje al año, este componente es el que posee la mayor proporción de nutrientes y, por tanto, la producción de hojarasca es considerada la principal fuente aportadora de nutrientes al suelo mineral (Landsberg y Gower, 1997).

La mayoría de los aportes al suelo de nitrógeno, calcio, magnesio y en ciertas ocasiones de fósforo son debidos a la caída de follaje. Más del 90% del fósforo y nitrógeno que las plantas absorben en los ecosistemas forestales provienen de la producción de residuos orgánicos en años anteriores (Imbert *et al.*, 2004), lo que significa que perder el capital de nutrientes del piso forestal sería crítico para la nutrición de estos bosques.

El contenido de nitrógeno y fósforo provenientes de la caída de hojarasca difiere entre ecosistemas tropicales y templados. En una comparación entre siete ecosistemas diferentes, 1) Bosque tropical deciduo y semideciduo de latifoliadas, 2) Bosque tropical perennifolio de latifoliadas, 3) Bosque templado deciduo de latifoliadas, 4) Bosque templado perennifolio de coníferas, 5) Bosque templado perennifolio de latifoliadas, 6) Bosque boreal deciduo de latifoliadas, 7) Bosque boreal perennifolio de coníferas; se encontró que los bosques templados presentan menores contenidos de nitrógeno y fósforo. Esta variabilidad en contenido de nutrientes probablemente es causada por diferencias en la disponibilidad de agua y nutrientes y la eficiencia de uso de nutrientes de cada especie (Landsberg y Gower, 1997; Shlesinger y Bernhardt, 2013).

Una lista de gimnospermas y sus aportes nutrimentales anuales por la caída de hoja, en el sur de Europa, fue generada por Imbert *et al.* (2004), los cuales se muestran en el Cuadro 4.

Cuadro 4.- Aporte anual de nutrientes al suelo mineral por la caída de hojarasca en algunas especies gimnospermas en el sur de Europa.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
<i>Pinus sylvestris</i>	46.3	0.2	8.6	19.7	2.9
<i>Pinus sylvestris</i>	26.1	1.3	9.8	44.9	3.1
<i>Pinus halepensis</i>	28	4.2	5.7	39.5	4.7
<i>Pinus pinaster</i>	8.4	0.8	0.8	11	3.3
<i>Pinus pinaster</i>	14	1.3	7.1	20.6	5
<i>Pinus pinea</i>	14.4	2.2	3.3	14.6	4.7
<i>Pinus radiata</i>	45.7	1.7	12	15.5	3.7
<i>Abies alba</i>	21.9	2.3	15.9	37.3	3.1

Fuente: Modificado de Imbert, *et al.* (2004)

En el caso particular de *Pinus montezumae*, Garcidueñas (1987) evaluó la caída anual de residuos en la localidad de San Juan Tetla, Puebla; encontró que la masa nutrimental por hectárea anual correspondió a 33.9, 5.6, 16.4, 26.9, 5.6 y 5.2 Kg, para N, P, K, Ca, Mg y Mn, respectivamente, que de acuerdo al Cuadro 4, indican movimientos comparativamente altos en los bosques de México.

La acumulación de residuos orgánicos varía a lo largo del año, de acuerdo a las diferentes estaciones. En un estudio realizado en Durango con *Pinus cooperi* y *P. leiophylla*, se observó que en la estación invernal, específicamente en el mes de diciembre se registró la mayor acumulación con un promedio de 910 kg ha⁻¹, mientras que en primavera y verano presentaron menor aporte, siendo el mes de junio de menor acumulación con un promedio de 94.04 kg ha⁻¹ (Najera *et al.*, 2009).

3.2.2 Descomposición de la materia orgánica

La descomposición de la materia orgánica es el proceso mediante el cual los restos orgánicos generados por la caída de hojas son transformados en nutrientes inorgánicos, directamente disponibles para las plantas. La descomposición ocurre en tres procesos que corresponden a: fragmentación de la materia orgánica, lixiviado (lavado intenso) y degradación química mediante las bacterias (Landsberg y Gower, 1997).

Además, la descomposición de la materia orgánica está controlada bajo tres importantes factores (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997):

- 1) Las condiciones ambientales, como temperatura y humedad, que influyen sobre la actividad de los microorganismos
- 2) La cantidad y calidad de la hojarasca, una alta tasa de C:N se relaciona con una tasa lenta de descomposición
- 3) Las características de las comunidades de microorganismos e invertebrados

Landsberg y Gower (1997) realizaron una comparación en la biomasa de microorganismos (hongos, bacterias y microfauna), responsables de llevar a cabo el proceso de descomposición de la materia orgánica entre diferentes ecosistemas desde bosques tropicales hasta bosques boreales. Encontraron que en los bosques tropicales el número de microorganismos que están presentes es mayor que en los bosques boreales (Cuadro 5).

Cuadro 5.- Biomasa de hongos, bacterias y microfauna en distintos biomas.

Ecosistemas	kg ha⁻¹		
	Hongos	Bacteria	Microfauna
Bosque boreal y bosque templado de coníferas	836-4620	1 – 110	84 - 282
Bosque templado caducifolio	890 - 1290	1 – 265	83 – 786
Bosque tropical y bosque subtropical	4500	1100	84

Fuente: Modificado de Landsberg y Gower (1997)

Por otra parte, también se ha documentado que las tasas más altas de descomposición están dadas por el follaje y son bajas para los componentes de la madera. Asimismo, que en la biomasa de microorganismos, las tasas de descomposición tienden a incrementar de bosques boreales a bosques tropicales (Landsberg y Gower, 1997; Cuadro 6).

Cuadro 6.- Coeficientes de descomposición (*k*) para follaje, material leñoso fino y grueso para bosques deciduos y perennes en ambientes contrastantes.

Bioma	Habito de vida	Componentes		
		Follaje	Madera fina	Madera gruesa
Coefficientes de descomposición				
Boreal	Deciduo	0.39 -0.70	0.05 – 0.12	0.02 – 0.29
	Perennifolio	0.22 – 0.44		
Bosque templado	Deciduo	0.28 – 0.85	0.10 – 0.38	
	Perennifolio	0.14 – 0.69		0.01 – 0.06
Bosque subtropical	Deciduo	0.44 – 2.4		0.03 -0.27
	Perennifolio	0.16 – 0.75		0.04
Bosque tropical	Deciduo	0.62 – 4.1		
	Perennifolio	0.16 – 2.8		0.11 – 0.46

Fuente: Modificado de Landsberg y Gower (1997)

En muchos bosques, los nutrientes liberados por la descomposición de la materia orgánica constituyen la fuente para suplir los requerimientos anuales para su crecimiento. La calidad de la materia orgánica, la biomasa de microorganismos y las tasas de descomposición son factores que determinan la disponibilidad de nutrientes para el crecimiento de la vegetación (Imbert *et al.*, 2004).

En un estudio realizado en ecosistemas de alta montaña en Colombia (bosque de *Quercus boldtii* y plantaciones de *Pinus patula* y *Cupressus lusitanica*), se encontró que las tasas de descomposición anual para cada ecosistema fue de 2.1 para el cipresal, 1.4 para el bosque de encino y 0.7 para bosque de pino. Estas tasa indican que, deben pasar 0.5, 0.7 y 1.4 años para asegurar la liberación de los nutrientes en esos bosques (Correa *et al.*, 2007).

3.2.3 Retranslocación

Las especies forestales se abastecen principalmente de los nutrientes del suelo para poder crecer y desarrollarse. Sin embargo, pueden maximizar la utilización de los nutrientes ante una disponibilidad limitada en el suelo y abastecer su demanda anual de nutrientes mediante un proceso llamado retranslocación o reabsorción (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997; Rodríguez y Álvarez, 2010).

La retranslocación o reabsorción es la remoción de nutrientes de los tejidos senescentes o viejos, principalmente de hojas maduras y/o viejas, y su transferencia hacia los tejidos jóvenes y centros de crecimiento de los árboles (Rodríguez y Álvarez, 2010). La reabsorción de nutrientes de las hojas es la más estudiada, quizás porque el follaje es el recurso más importante de nutrientes de los componentes de una planta (Imbert *et al.*, 2004; Rodríguez y Álvarez, 2010).

Los nutrientes más móviles en los ecosistemas forestales y los principales elementos retranslocados son el nitrógeno, el fósforo y el potasio, los cuales son requeridos para diferentes procesos fisiológicos (Imbert *et al.*, 2004; Fife *et al.*, 2008). Se ha cuantificado que el contenido de estos nutrientes retranslocados internamente en el follaje puede variar entre 50 y 70%, el cual es dirigido principalmente hacia los brotes y una proporción menor hacia las raíces, ramas y tallos. En el caso de algunos géneros como *Larix* hasta el 90% del contenido de nutrientes puede ser reabsorbido (Landsberg y Gower, 1997; Rodríguez y Álvarez, 2010). La cantidad de nutrientes translocados depende de la fertilidad del suelo, en suelos menos fértiles las especies forestales tienden a compensarlo con la retranslocación (Powers, 1999).

La retranslocación de nutrientes en el follaje es variable y depende de factores relacionados con la fisiología, edad, condiciones de crecimiento, características medio ambientales y de las prácticas de manejo forestal. Martín, *et al.* (1996), evaluaron la retranslocación de N, P, K en bosques de *Quercus pyrenaica*, en Salamanca, España. Los resultados obtenidos indican que el porcentaje de reabsorción promedio fue de 35, 36.2 y 24.7% para N, P y K, respectivamente; los cuales corresponden a una masa mineral de 13.7, 1.6 y 3.8 kg ha⁻¹, respectivamente. Encontraron que en el caso del P, las parcelas evaluadas presentaron valores muy contrastantes, ellos consideran que eso puede estar influenciado por el tipo de material parental, ya que las parcelas asentadas sobre pizarras presentaron los valores más altos, mientras que las ubicados en material granítico presentaron los más bajos.

Por otra parte, León *et al.* (2009) evaluaron la retranslocación de N, P, K y Mg en bosques de *Quercus humboldtii* y en plantaciones de *Pinus patula* y *Cupressus lusitánica*, el porcentaje de reabsorción para *P. patula* correspondió a 37, 18.8, 77.4 y 15.1% para N, P, K y Mg respectivamente, que equivalen a una masa mineral por hectárea de 28.5, 0.6, 13.4 y 0.8 kg,

respectivamente. Concluyeron que las coníferas son menos dependientes de la retranslocación y muestran una mayor eficiencia del uso de nutrientes (cantidad de materia seca producida en la caída de hojarasca por unidad de ese nutriente contenido en él).

En otro estudio realizado en Misiones, Argentina, Pérez *et al.* (2006) encontraron que el contenido de N, P y K retranslocado en follaje de plantaciones de *Pinus taeda* fue de 40, 39 y 44% respectivamente, observaron que la reabsorción fue baja con respecto a otros estudios con *Pinus*, sin embargo, las concentraciones de nutrientes encontradas en las hojas senescentes fueron bajas.

En un estudio en rodales de *Pinus montezumae* en San Juan Tetla, Puebla, se encontró que el contenido de N y P retranslocado en el follaje fue de 32.6 y 33.3%, respectivamente (Garcidueñas, 1987).

3.3 Efecto del manejo silvícola sobre el ciclo de nutrientes

Dado que la cosecha forestal es una remoción de nutrientes, esta práctica genera efectos negativos sobre las reservas de nutrimentos en los ecosistemas, ya que el capital de nutrientes almacenado en la biomasa aérea sale directamente del ecosistema. Aun cuando las reservas de nutrientes en la biomasa aérea son más pequeñas que el total del ecosistema (principalmente la del suelo mineral), hay estudios que muestran efectos adversos sobre la disponibilidad de ciertos nutrimentos en el suelo mineral a corto y largo plazo (Goya *et al.*, 2003; Hopmans *et al.*, 1993; Martiarena *et al.*, 2009). Los efectos negativos varían dependiendo la especie, las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, tipo de nutriente, la intensidad del manejo y el tipo de biomasa extraída (Imbert *et al.*, 2004).

García (2008) menciona que en el caso de las plantaciones de *Pinus* no resulta tan desfavorable la extracción de nutrimentos por la cosecha

forestal, ya que las cantidades extraídas se aproximan a las cantidades que el sistema repone mediante sus procesos naturales. Sin embargo, Goya *et al.* (2003), en un estudio realizado en Misiones, Argentina, simularon el impacto de la cosecha de *Pinus taeda* sobre la estabilidad de nutrientes del ecosistema, bajo tres escenarios de manejo de menor a mayor intensidad: cosecha de fustes con corteza y conservación de residuos, cosecha y extracción de residuos y cosecha de fustes y quema de residuos. Los resultados encontrados indicaron que el índice de estabilidad (cociente entre los nutrientes exportados y los nutrientes disponibles del suelo hasta 100 cm de profundidad) para P y K presentó valores altos, indicando menor estabilidad nutritiva para estos minerales en los tres tipos de cosecha. En general, la cosecha más intensiva presenta mayor impacto sobre los nutrientes evaluados, lo que podría reducir las cantidades de nutrientes en el ecosistema a corto plazo, principalmente de P y K, los cuales estarían disponibles únicamente para dos rotaciones posteriores.

Asimismo, Martiarena *et al.* (2009), en un estudio realizado en plantaciones de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina, evaluaron la pérdida de N, P, K y Ca generada por la cosecha forestal. Registraron que el contenido de N extraído por la cosecha, a través de la biomasa aérea, fue de aproximadamente 3% del total del sistema, considerado un valor bajo debido a que el contenido de N en la biomasa aérea es relativamente pequeño respecto a las reservas del suelo. En el caso del P, se exportó el 48% del total presente en el sistema, el mayor contenido de P se encontraba en la biomasa aérea, hubo una reducción significativa del P en el suelo mineral después de la cosecha. El K exportado fue de 88.5 kg ha⁻¹ y el Ca experimentó una disminución de 56.4 kg ha⁻¹ después de la cosecha, los cuales no tuvieron efectos mayores con respecto a las reservas totales del ecosistema.

Por el contrario, Hopmans *et al.* (1993) evaluaron el impacto de las cortas intensivas sobre las reservas de nutrientes en el suelo (N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu y B) en un ecosistema de *Eucalyptus sp.*, bajo prácticas de

conservación e intensivas: extracción de madera y extracción de madera más quemas, respectivamente. Encontraron que la remoción de nutrientes de la biomasa aérea por la cosecha forestal representa solo un pequeño porcentaje respecto a las reservas disponibles en el suelo mineral y que no comprometen la productividad del bosque a largo plazo, una disminución significativa en la disponibilidad de los nutrientes se vería hasta una serie de rotaciones de 80 años. Dependiendo de la mineralogía del suelo, en el caso del Ca y B a través de las prácticas más intensivas podría causarse una disminución de su disponibilidad largo plazo.

Por todo lo anterior, el reto del manejo de nutrientes debe partir de las particularidades de la especie, de las condiciones del sitio y de la intensidad de las prácticas que se realicen, con la finalidad de mantener la productividad del sitio a largo plazo a través de prácticas acordes que no comprometan la sustentabilidad del bosque. Tal como lo menciona Rodríguez y Álvarez (2010) es esencial entender los procesos que regulan la entrada de nutrientes, su transformación dentro del suelo y la vegetación y la pérdida de nutrientes, para que los sistemas forestales sean manejados bajo una base sustentable.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 Ubicación del área de estudio

El área de estudio se ubica en el predio San José Nanacamilpa ($19^{\circ}29' LN$ y $98^{\circ}32' LO$; Figura 2), en la parte suroeste del Municipio de Nanacamilpa de Mariano Arista, Tlaxcala (Figura 3), considerada una de las tres principales zonas boscosas con buen estado de conservación del estado (Rodríguez-Martínez *et al.* 2007).

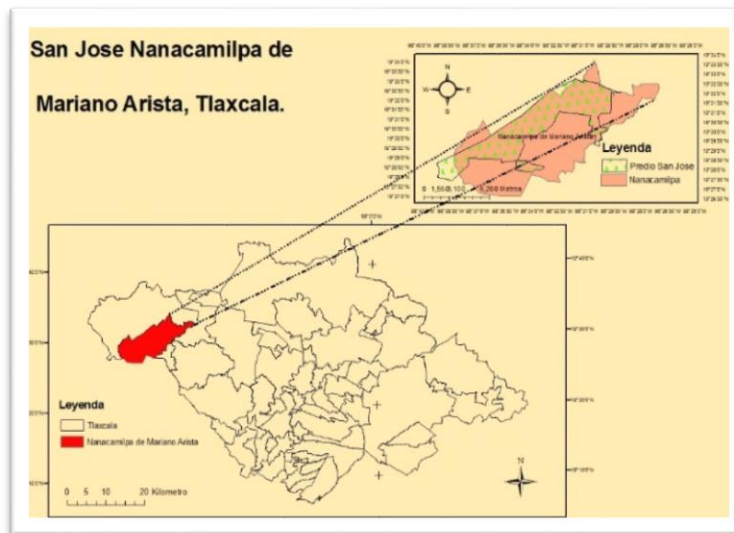


Figura 2.- Localización geográfica de Nanacamilpa de Mariano Arista y área limítrofe del predio de San José Nanacamilpa, Tlaxcala.

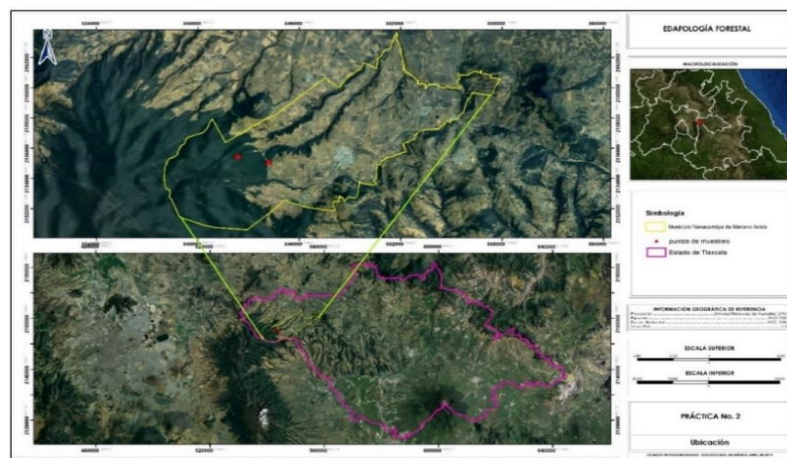


Figura 3.- Ubicación de los sitios de muestreo en Nanacamilpa de Mariano Arista, Tlaxcala.

Fisiografía

Se ubica en la provincia del Eje Neovolcánico, subprovincia lagos y volcanes de Anáhuac. Está localizada a una altitud de 2720 msnm, con una temperatura promedio anual de 22 °C y una precipitación media anual que corresponde a 700 mm (INEGI, 2009). El relieve se caracteriza por presentar laderas, con pendientes relativamente pronunciadas y con desniveles marcados en altitud, que aunado a cambios contrastantes de exposición crea una diversidad de microclimas (Quintero, 2006). Sin embargo, los sitios bajo estudio se ubican en pendientes moderadas menores al 10%.

Clima

Los climas presentes en el municipio corresponden a clima templado subhúmedo con lluvias en verano y clima semifrío subhúmedo, representado por el tipo Cw en la adaptación de Koopen (1948) para las condiciones de México. Especialmente este clima se asocia principalmente bosques templados representados por diversos grados de mezcla entre coníferas y encinos (INEGI, 2009).

De acuerdo a datos de la estación correspondiente a Nanacamilpa (029017) del Servicio Meteorológico Nacional, se elaboró la gráfica ombrotérmica, la cual permite observar una estación seca al final e inicio del año del año. En el mes de diciembre se presenta la menor precipitación con aproximadamente 6 mm. La estación húmeda abarca de mediados de mayo a septiembre, y los meses con mayor precipitación corresponden junio y julio con 139 mm. Las temperaturas mínima y máxima siguen un patrón similar a la precipitación, aunque las máximas son al inicio de la temporada de lluvias en los meses de mayo y junio (Figura 4).

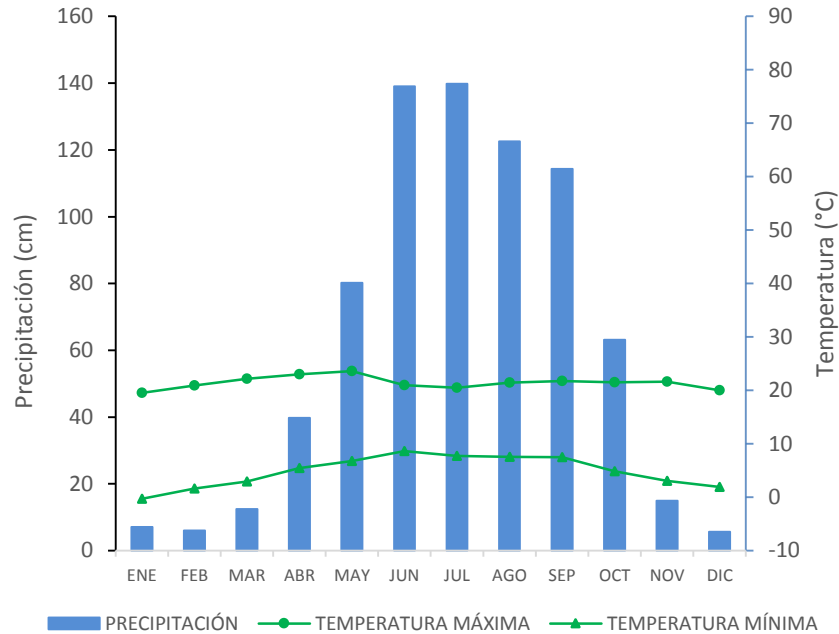


Figura 4.- Precipitación (barras), temperaturas máximas y mínimas (líneas) en la región de Nanacamilpa, Tlaxcala, promedios en el periodo (1949-1988).

Vegetación

De acuerdo a INEGI (2009) el 33% del territorio municipal de Nanacamilpa corresponde a bosque templado, constituido principalmente por los géneros *Pinus* y *Abies*. Las especies características de estos bosques son: *Pinus ayacahuite*, *P. hartwegii*, *P. leiophylla*, *P. montezumae*, *P. pseudostrobus*, *P. teocote* y *Abies religiosa*, además de otras especies como *Juniperus deppeana*, *Quercus* spp., *Symphoricarpos microphyllus*, *Ribes* spp., *Senecio* spp., *Baccharis conferta*, *Salvia* spp., *Stevia* spp., *Verbesina* spp., *Arctostaphylos arguta*, *Cestrum* spp., *Berberis* spp., *Ceanothus* spp., *Fuchsia* spp., *Rubus* spp., entre otras. En el área de estudio domina *P. montezumae*

Los suelos del área de estudio se formaron a partir de material volcánico y de acuerdo a la clasificación de FAO (1988), existen los Cambisoles que son suelos originados de sedimentos pirocláticos, con frecuencia presentan

horizontes duripan o tepetate. Estos suelos se reconocen como Inceptisoles en la clasificación Americana. Los Andosoles (Andisoles en la clasificación Americana), que corresponden con la zona de estudio, son otro grupo representativo que muestra un perfil más desarrollado que el grupo anterior, su profundidad va de media a profunda (80-110 cm) y presentan atributos característicos como baja densidad aparente, alta retención de humedad y texturas media a finas. El tercer grupo es el Regosol, identificado como Entisol en la clasificación Americana, son suelos físicamente limitados por su baja profundidad y se distribuyen en las zonas más secas.

Manejo del bosque

El bosque estudiado es manejado bajo el Sistema Mexicano para Bosques Irregulares, considerando un diámetro mínimo de corta de 40 cm, e intensidades de cortas del 20%. De acuerdo a los productores esta estrategia de intervenir el bosque asegura su sustentabilidad, sin embargo, en términos de movimientos de nutrientes se desconoce el impacto. Se tiene registrados los aprovechamientos en el Predio Nanacamilpa, Tlaxcala que se muestran en el Cuadro 7, en el cual indica que en cada década se extrae un promedio de $59.5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Con base en datos anuales esto equivale aproximadamente entre el 2.2 y 2.6% de las existencias reales totales.

Cuadro 7.- Antecedentes de los aprovechamientos en el Predio Nanacamilpa, Tlaxcala.

Anualidad	Superficie ha	Total corta m³ rta*	Extracción m³ ha⁻¹ década⁻¹
1/ 10 Total (m3 rta)	109-57-20	7184.208	65.56
2/10 Total (m3 r.t.a.)	99-34-40	6539.599	65.82
3/10 Total (m3 r.t.a.)	140-11-90	7189.712	51.31
4/10 Total (m3 r.t.a.)	125-66-00	7496.170	59.65
5/10 Total (m3 r.t.a.)	127-30-00	6900.337	54.21
6/10 Total (m3 r.t.a.)	111-72-10	6927.766	62.01
7/10 Total (m3 r.t.a.)	116-63-90	6813.077	58.41
8/10 Total (m3 r.t.a.)	88-57-20	6584.504	74.34
9/10 Total (m3 r.t.a.)	120-00-90	6573.282	54.77
10/10 Total (m3 r.t.a.)	143-80-00	7076.356	49.21
PROMEDIO			59.52

*rta= rollo total árbol

4.2 Selección de sitios de muestreo

Se seleccionaron dos rodales con la especie principal bajo explotación que es *Pinus montezumae* (Figura 3). En cada uno se colectaron muestras para evaluar los reservorios de biomasa arbórea y del suelo (biomasa aérea, piso forestal y suelo mineral) y las transferencias (producción de hojarasca, descomposición de hojarasca y reabsorción) de nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) dentro bosque (Figura 5). Para cada rodal se establecieron tres sitios circulares de 1000 m² (0.1 ha), los cuales estuvieron separados al menos 20 metros uno de otro. Al centro de uno de los sitios de 1000 m², se cavó un perfil de suelo de aproximadamente 2 x 1 m de largo y ancho, y con una

profundidad entre 80 y 100 cm, que es donde se definen los principales horizontes del suelo que interactúan con la vegetación. En los dos sitios restantes se tomaron muestras adicionales compuestas (tres puntos de muestreo) de suelo para complementar la información del perfil.

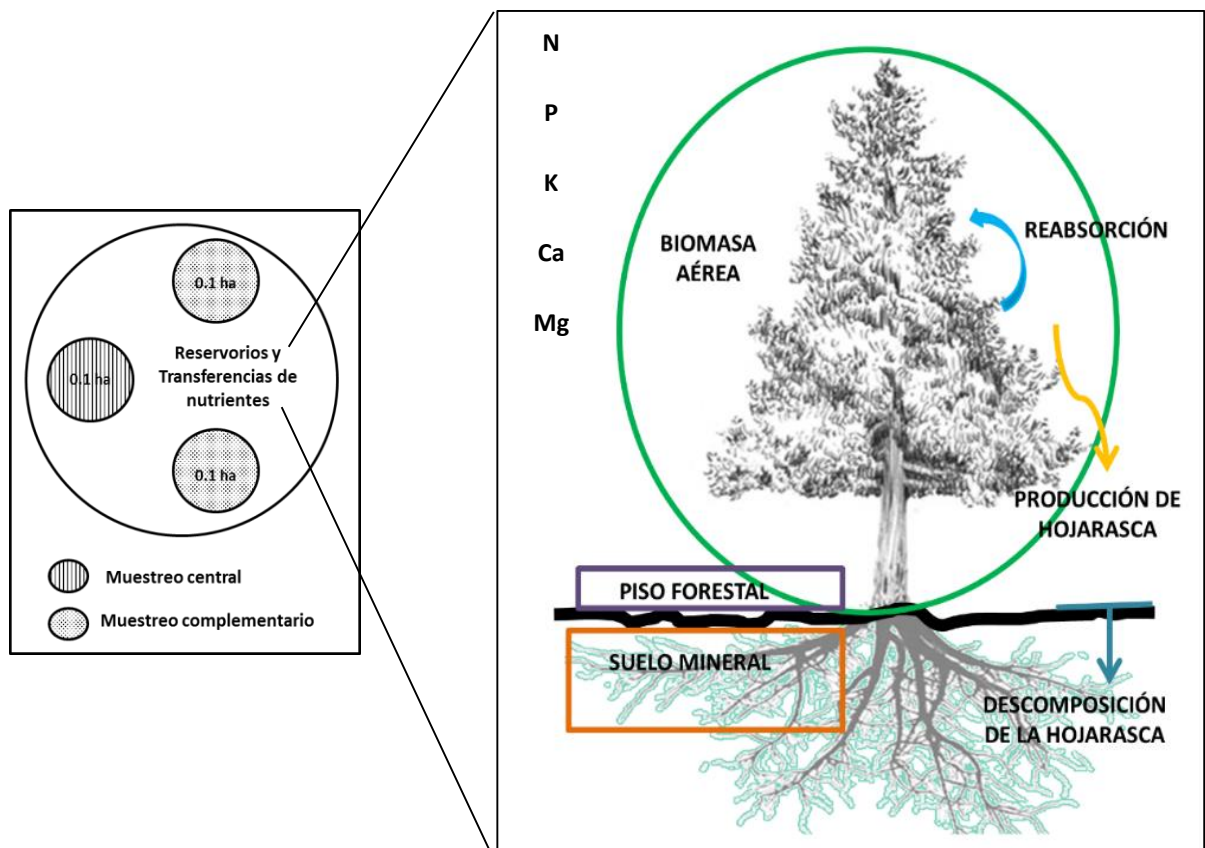


Figura 5.- Diseño del muestreo y elementos evaluados en dos rodales de *Pinus montezumae* en Nanacamilpa, Tlaxcala. Reservorios (biomasa aérea, piso forestal, suelo mineral) y transferencias (producción de hojarasca, descomposición de la hojarasca y reabsorción) de N, P, K, Ca y Mg.

4.3 Determinación de los reservorios de nutrientes

Las masas minerales de las muestras vegetales se calcularon multiplicando las concentraciones (mg kg^{-1}) promedio de cada nutrimento y la masa (kg)

de cada elemento evaluado por hectárea. Para la determinación de reservorios de suelo, se emplearon las concentraciones medias de nutrientes de cada horizonte y la densidad aparente de cada capa de suelo (Fórmula 1). Para estandarizar la masa total de nutrientes en el suelo mineral a la misma profundidad en ambos rodales, se consideró como profundidad máxima 80 cm.

Fórmula 1

$$MN = \frac{CN}{10} * D_a * P_s$$

Donde MN es la masa mineral, CN es la concentración de nutrientes en mg kg⁻¹, Da es la densidad aparente en kg m⁻³, Ps es la profundidad del suelo de cada horizonte en m y 10 es un factor de conversión de unidades.

4.3.1 Biomasa aérea del arbolado y masa de nutrientes

Para estimar la biomasa del arbolado, en el año 2011 se derribaron 10 árboles procurando una buena representatividad de las categorías diamétricas en una hectárea tipo, con diámetros normales entre 40 y 55 cm. Una vez derribados los árboles, el fuste se seccionó en trozas de 2.5 m en la base del árbol y de 1.25 m en la parte superior y se cubicaron con la fórmula de Smalian, que considera un promedio de las secciones extremas de la troza multiplicada por su longitud.

Para estimar la cantidad de materia seca por unidad de volumen verde, se colectaron tres rodajas a lo largo del fuste y se calculó la relación biomasa volumen verde, que corresponde a la densidad de la madera en campo. Estas muestras se secaron a 85 °C en laboratorio. Con el volumen en verde del fuste y la densidad de la madera en campo se obtuvo la masa total de cada fuste.

Las ramas de cada árbol se pesaron por separado y también se tomaron tres submuestras para estimar su contenido de humedad y corregir los pesos registrados en campo. El follaje se separó de manera manual y se registró su peso húmedo en campo y se tomaron tres submuestras. El peso seco de la masa foliar y de ramas se estimó con la siguiente fórmula:

Fórmula 2

$$PS_T = \frac{PH_T}{1 + FH} = \frac{PH_T}{1 + \frac{PH_M}{PS_M} - 1}$$

Donde:

PS_T= Peso seco total del componente del árbol

PH_T= peso húmedo total en campo

FH= fracción de humedad de la muestra

PH_M= peso húmedo de la muestra

PS_M= peso seco de la muestra

Después de haber obtenido la biomasa total por cada componente (fuste, ramas y follaje), se obtuvo el total de biomasa de cada árbol derribado y el porcentaje promedio de biomasa de cada componente con respecto a la masa total del árbol. Con esta información se procedió a obtener la biomasa total arbórea promedio de los tres sitios de 1000 m² de cada rodal seleccionado y la biomasa por componente del árbol.

Los datos del arbolado se tomaron en enero del 2015. Dado que el volumen que se midió directamente en los 10 árboles muestras se correlacionó significativamente (r²= 0.81; p<0.05) con el volumen estimado con la ecuación empleada por los ejidatarios, el volumen de cada sitio de 1000 m² se estimó con dicha ecuación que se describe a continuación:

Fórmula 3

$$Volumen = e^{-9.43902992+1.967884456*LN(DN)+0.79335945*LN(H)}$$

Donde:

DN= diámetro normal en cm

H= altura en m

La biomasa total de cada árbol se estimó con la densidad media de la madera de los de los diez árboles muestra (0.48 Mg/volumen verde) y el volumen estimado con la ecuación anterior (Fórmula 3).

El volumen estimado considera principalmente fuste y ramas. Por lo anterior, con la proporción de masa total y masa de follaje de los diez árboles se estimó la masa foliar en los sitios de 1000 m². La proporción en masa por componente fue 89.5 (± 0.785), 7.5 (± 0.751) y 3 (± 0.382) % para fuste, ramas y follaje.

- Masa de nutrientes por componente

Se obtuvo la composición elemental (N, P, K, Ca y Mg) de cada componente del árbol con la finalidad de calcular el reservorio de nutrientes en la biomasa aérea. Para ello, se estimó la masa neta de nutrientes, los cálculos se expresaron en kg ha⁻¹.

- Incrementos en área basal

Se seleccionaron diez árboles por cada rodal de las cuales se obtuvo una viruta de madera para procesarlas en el programa de cómputo WINDENDRO. Las virutas de incremento se utilizaron para estimar las edades, el área basal (AB) y el incremento en área basal (IAB) de los árboles. Para el cálculo del IAB se partió del ancho de los anillos y se asumieron círculos concéntricos como se explica en las siguientes ecuaciones:

Fórmula 4

$$AB = \pi r^2$$

$$IAB = AB_{\text{año anterior}} - AB_{\text{año posterior}}$$

Donde:

r= radio acumulado del anillo en mm

4.3.2 Piso forestal

El reservorio de nutrientes en el piso forestal se cuantificó mediante el muestreo de la hojarasca depositada en el mantillo en los sitios de muestreo centrales. Durante enero del 2015, se obtuvieron muestras aleatorias a través de tres parcelas circulares de 0.071 m²; cada muestra se pesó en húmedo en campo y posteriormente se seleccionó una submuestra que fue secada en laboratorio para obtener la fracción de humedad y la masa seca total. Para las estimaciones se empleó la fórmula 2 pero empleando las mediciones del piso forestal.

De cada submuestra se obtuvo la composición elemental (N, P, K, Ca y Mg) con la cual se cuantificó el reservorio de nutrientes en el piso forestal. La masa neta de nutrientes se expresó en kg ha⁻¹.

4.3.3 Suelo mineral

Para cuantificar el reservorio de nutrientes en el suelo mineral, durante enero y marzo del 2015 se obtuvieron muestras por cada horizonte de los perfiles de suelo centrales, a profundidades de 0-17, 17-40, 40-70 y 70-115 cm para sitio 1 y de 1-15, 15-32, 32-63 y 63-95 cm para el sitio 2. Asimismo, se obtuvieron muestras de los dos primeros horizontes de cada sitio complementario de 1000 m². También se tomaron muestras inalteradas de suelo tomadas con un muestreador cilíndrico de 5 cm de diámetro y 5 cm de altura, (98.17 cm³), para estimar su densidad aparente después de secar el suelo a 105 °C por 12 horas. La densidad aparente se calculó utilizando la siguiente fórmula:

Fórmula 5

$$Da = \frac{m}{v}$$

Donde:

Da=densidad aparente

m= peso seco en g

v= volumen del contenedor en cm³

De las muestras obtenidas en el sitio de muestreo central y complementario se determinaron las propiedades fisico-químicas del suelo: textura, pH, capacidad de campo, punto de marchitez permanente, lámina de agua, capacidad de intercambio catiónico, porcentaje de materia orgánica y concentraciones medias de N, P, K, Ca y Mg.

La lámina de agua expresa la cantidad de agua existente o almacenada en el suelo en altura, se obtuvo mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 6

$$L_A = H_v * P_s$$

Dónde:

L_A= lámina de agua

H_v=Humedad volumétrica, la cual se calcula multiplicando la humedad aprovechable por la densidad aparente del suelo.

P_s: profundidad de suelo en cm

- Reservorio del Suelo Mineral

Se obtuvo la composición elemental (N, P, K, Ca y Mg) de cada horizonte identificado en el perfil de suelo. La masa total de cada nutriente a una profundidad de 80 cm se expresó en kg ha⁻¹.

4.4 Cuantificación de la transferencia de nutrientes

4.4.1 Producción de hojarasca

Se colectó la caída mensual de hojas en cuatro trampas de 1 m² a nivel de suelo, durante un año, en 2011. Se estimó la masa neta de nutrientes de la hojarasca producida a partir de la concentración de sus nutrientes (N, P, K, Ca y Mg). Los cálculos de la masa neta se realizaron con base en la materia seca transferida del dosel al piso forestal acumulado estacionalmente y se expresaron en kg ha⁻¹.

Asimismo, se estimó la acumulación de hojarasca anual, la cual se cuantificó mediante la instalación de una trampa en cada sitio de muestreo central con áreas de 2.07 y 5.08 m², en los sitios I y II, respectivamente. La hojarasca producida durante un año fue colectada a finales del año 2014, cada muestra se pesó en húmedo en campo y se obtuvo una submuestra para secarla en el laboratorio y así obtener el peso en seco total de la muestra (Fórmula 2). Se estimó la masa neta de nutrientes de la caída de hojarasca anual a partir de la concentración sus nutrientes (N, P, K, Ca y Mg) y se expresó en kg ha⁻¹.

4.4.2 Descomposición de hojarasca

La descomposición de hojarasca se evaluó con la finalidad de conocer las transferencias de nutrientes del piso forestal al suelo mineral. Para ello, en cada rodal seleccionado se colocaron 25 bolsas de descomposición en un área de 0.25 ha (50 m x 50 m) a una distancia de 10 x 10 m.

Las bolsas fueron de polipropileno negro de 17 X 25 cm con apertura de 2 mm², a cada bolsa se le agregó la cantidad de 20 g de hojarasca seca. Se retiraron 4 bolsas en cinco intervalos diferentes de tiempo, 63, 126, 217, 252 y 336 días. Las muestras colectadas se trasladaron al laboratorio para secarlas (aproximadamente 48 horas a 70 °C) para obtener su masa seca.

Con los valores de masa seca se obtuvo el porcentaje de pérdida de biomasa y se estimó la tasa de descomposición (k) ajustando un modelo exponencial negativo con las mediciones.

Este modelo es un estimador de la tasa de pérdida de biomasa sobre una base anual e indica la relación de la caída de hojarasca/acumulación. Generalmente, la tasa de descomposición se estima utilizando un enfoque de regresión y el exponencial negativo de primer orden, donde la fracción del remanente del mantillo que queda después de un año está dada por la siguiente fórmula:

Fórmula 7

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

Donde

X_t/X_0 = proporción de la masa original restante en el tiempo t

K= tasa constante de descomposición.

Asumiendo condiciones de equilibrio en el ecosistema, se determinó el ritmo de descomposición de la hojarasca mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 8

$$k_0 \left(\frac{1}{\text{año}} \right) = \frac{A}{F}$$

Donde:

A= producción anual de hojarasca

F= biomasa del piso forestal

También se calculó el tiempo medio de residencia que se obtiene mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 9

$$TMR = \frac{F}{A}$$

Donde:

A= producción anual de hojarasca

F= biomasa del piso forestal

Se obtuvo la composición elemental (N, P, K, Ca y Mg) de la hojarasca residual en cada uno de los cinco diferentes momentos, con la finalidad de conocer la cantidad de nutrientes que se están transfiriendo del piso forestal al suelo mineral. La masa de nutrientes expresada en hg ha⁻¹, se calculó a través de la biomasa residual y su contenido elemental promedio de nutrientes obtenida de todos los momentos.

4.4.3 Estimación de la tasa de reabsorción

La tasa de reabsorción en el follaje se evaluó para estimar las transferencias internas de N, P y K en el arbolado, la cual se calculó con la diferencia del contenido elemental de nutrientes entre las hojas nuevas y las hojas senescentes. Éstas últimas fueron colectadas durante otoño del 2014, antes de que se deprendieran de las ramas; para ello se seleccionaron aleatoriamente árboles para la obtención de las muestras. En el caso de las hojas nuevas, se utilizó la información obtenida del follaje de los árboles derribados. Se obtuvo la masa de N, P y K reabsorbidos en el arbolado, expresada en kg ha⁻¹, a partir de la biomasa de follaje estimado para el rodal y la tasa de reabsorción.

4.5 Cuantificación de la salida de nutrientes por la cosecha forestal

Para cuantificar la pérdida de nutrientes por la cosecha forestal, se tomó en cuenta el porcentaje promedio del volumen anual que se extrae en este bosque que va del 2-3% con respecto a las existencias totales. Sin embargo, para tener un escenario realista, que considere aquellas pérdidas que son excluyentes al 3% de la cosecha anual, se tomó el límite superior un 4% de extracción como referencia y su equivalente en masa considerando 0.48 Mg m^{-3} representó la biomasa que se exporta de fustes y ramas. Con las concentraciones de nutrientes de estos componentes se estimó la salida de cada nutriente. El follaje, no se retira en el aprovechamiento, por lo que este componente no aporta a las salidas.

Después de cuantificar la biomasa, esta se multiplicó por el contenido elemental (N, P, K, Ca y Mg) de los componentes de la biomasa aérea de los árboles que fueron derribados, con la finalidad de estimar la masa neta de nutrientes expresada en kg ha^{-1} , que está saliendo del sistema por cosecha forestal.

4.6 Requerimiento de nutrientes anual por el arbolado

Considerando datos del historial de manejo para estos bosques de *Pinus montezumae*, se estimó que en promedio su tasa de crecimiento anual es del 4% en volumen. Esta fracción de crecimiento se acumula en fuste y ramas principalmente. Por lo anterior esta referencia sirvió para estimar la demanda anual de nutrientes de los componentes maderables. La masa de nutrientes se calculó para cada elemento considerado en este estudio (N, P, K, Ca y Mg) y tomando en cuenta la estructura de los rodales a partir de los sitios de 1000 m^2 , se realizaron los cálculos en kilogramo de nutriente por hectárea.

Para estimar el requerimiento neto de nutrientes del ecosistema se procedió a calcular la absorción, que es la suma de la demanda de nutrientes de los componentes maderables y los nutrientes que regresan al suelo.

Fórmula 10

$$\text{Absorción} = \text{ganancia neta anual} + \text{producción de hojarasca}$$

Posteriormente se calculó el requerimiento anual de nutrientes:

Fórmula 11

$$\text{Requerimiento} = \text{absorción} + \text{reabsorción}$$

4.7 Estimación de la sustentabilidad del ecosistema

Mediante un balance entre los reservorios (biomasa aérea, piso forestal y suelo mineral), flujos (producción de hojarasca, descomposición de la hojarasca y reabsorción) y las salidas (cosecha forestal) esquematizado se estimó la dimensión de los reservorios y el retorno de nutrientes, frente a las pérdidas por la cosecha forestal y los requerimientos del arbolado.

Se estimó el número de años que la masa mineral podría sostener el crecimiento de la vegetación mediante el índice de nutriente remanente (INR) para la rotación de la misma especie (Martiarena, *et al.* 2011).

Fórmula 12

$$\text{INR} = \frac{\text{Masa mineral en el suelo}}{\text{Masa mineral en la cosecha}}$$

4.8 Análisis químico y contenido de nutriente

Todas las muestras obtenidas en campo se secaron en una estufa eléctrica en el laboratorio del Programa en Ciencias Forestales del Colegio de

Postgraduados, Campus Montecillo, hasta alcanzar un peso constante. Las muestras de origen vegetal se secaron aproximadamente a 70°C por 72 horas y fueron molidas con molino mecánico. Las muestras de suelo se secaron aproximadamente a 105°C por 24 horas y fueron tamizadas con malla de 2 mm antes de ser analizadas químicamente.

Los análisis del contenido de nutrientes de las muestras de origen vegetal se realizaron en el laboratorio de nutrición vegetal del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Los métodos utilizados para la obtención de la composición elemental de las muestras fueron, MicroKjeldhal, Bray I, F. Flama y EDTA, para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

Los análisis químicos de las muestras de suelo se realizaron en el mismo laboratorio, y los análisis físicos se realizaron en el laboratorio de física de suelos; ubicados en el mismo campus. La textura del suelo se determinó mediante la técnica del hidrómetro de Boyoucos, el pH a través del método del potenciómetro, la capacidad de campo y punto de marchitez permanente a través de la técnica de la olla de presión. El porcentaje de materia orgánica fue calculado por el método de Walkley y Black y para obtener la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se utilizó el método de acetato de amonio. Los métodos utilizados para la obtención de la composición elemental de las muestras de suelo fueron, MicroKjeldhal, Bray I, F. Flama y EDTA, para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

5. RESULTADOS

5.1 Reservorios de nutrientes

5.1.1 *Biomasa aérea del arbolado*

La densidad del rodal I de *Pinus montezumae* es de 180 árboles por hectárea, los cuales tuvieron un diámetro promedio de 39.5 cm y una altura promedio de 25.3 m, una edad promedio de 86.3 años y un volumen por hectárea de 269.5 m³ (Cuadro 8).

Cuadro 8.- Características estructurales de los dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Características	Rodal I	EEM*	Rodal II	EEM*
Árboles/hectárea	180	1.53	125	1.44
DAP (cm)	39.53	1.71	44.18	0.32
Altura (m)	25.3	1.52	23.9	0.88
Volumen (m ³ ha ⁻¹)	269.5	21.95	223.8	24.17
Edad (años)	86.27	4.25	90.27	3.02

*EEM= Error estándar de la media

Por otra parte, el rodal II tuvo una densidad de 125 árboles por hectárea, los árboles tuvieron un DAP promedio de 44.2 cm, una altura promedio de 23.9 m, una edad promedio de 90.3 años y un volumen por hectárea de 223.8 m³ (Cuadro 8).

La densidad de biomasa arbórea total estimada de los rodales 1 y 2 fue de 120.5 y 133.4 Mg ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 9). La biomasa fue un reflejo del número de árboles, ya que el rodal I con mayor número de árboles presenta mayor biomasa, sin embargo su diámetro y edad son ligeramente menores.

En cuanto a la biomasa aérea por componentes: fuste, ramas y follaje, se encontró que el fuste representa el 89.5% de la biomasa aérea total, las ramas el 7.5% y el follaje el 3%, para ambos sitios (Cuadro 9).

Cuadro 9.- Biomasa promedio de cada compartimento de *Pinus montezumae* en dos rodales, en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Compartimento	Biomasa Mg ha⁻¹			
	Rodal I	EEM*	Rodal II	EEM*
Fuste	119.4	(±9.7)	107.9	(±15.0)
Ramas	10.0	(±.81)	9.0	(±0.72)
Follaje	4.0	(±0.33)	3.7	(±0.29)
Total	133.4		120.5	

*EEM= Error estándar de la media.

En el Cuadro 10 se muestra la concentración media de nutrientes de los diferentes componentes del árbol. Excepto para Ca y Mg la concentración de nutrientes incrementa en el orden fuste, ramas y follaje; mientras que para el Ca el aumento en concentración es en el orden: Rama, Fuste follaje. La concentración de N en el follaje supera en cinco y diez veces la de ramas y fuste, respectivamente.

Cuadro 10.- Concentración media de nutrientes en cada compartimento de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Compartimento	N	P	K	Ca	Mg
	%	mg kg⁻¹			
Fuste	0.13	37.67	61.5	1242.59	850.12
Ramas	0.29	178.48	749.48	944.87	827.33
Follaje	1.39	1513.48	3249.9	2216.18	1981.76

En el rodal I, la masa neta mineral aérea de nutrientes por hectárea fue de 241.8, 12.4, 27.9, 166.7 y 117.7 kg para N, P, K, Ca, y Mg, respectivamente; mientras que para el Rodal II fueron de 218.6, 11.2, 25.3, 150.7 y 106.4 kg, en el mismo orden (Figura 6). Aunque con las concentraciones más bajas en la mayoría de nutrientes, el fuste constituye el principal reservorio de N y P. A pesar de que el follaje y las ramas representan aproximadamente el 12%

de la biomasa total arbórea, en conjunto constituyen el 63 y 73% de P y K, respectivamente.

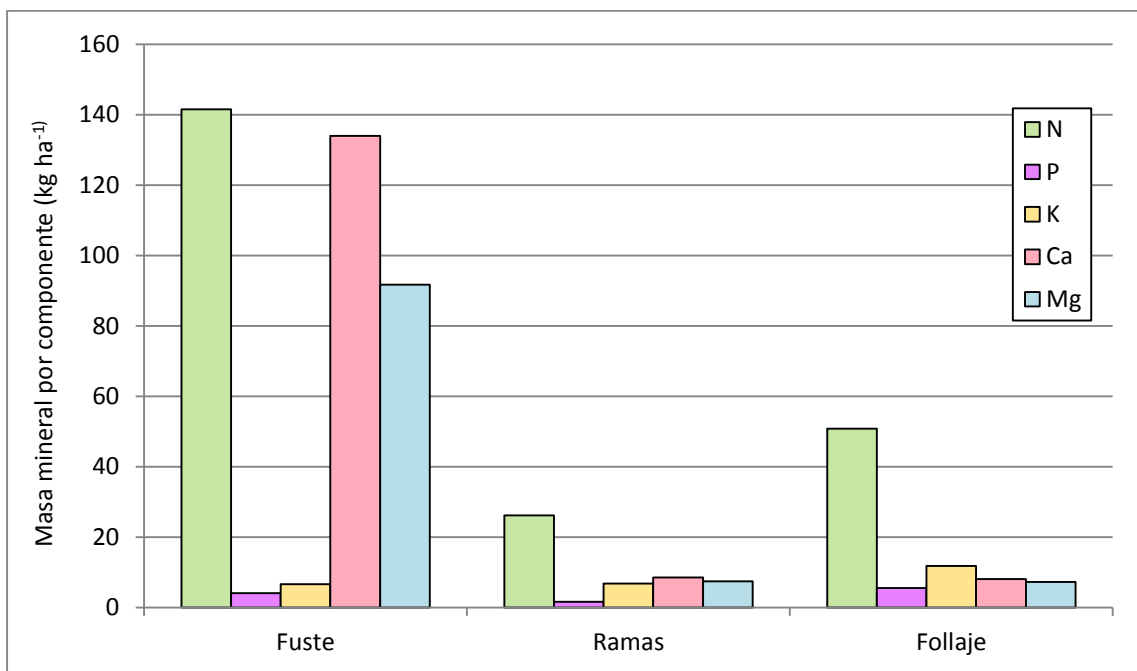
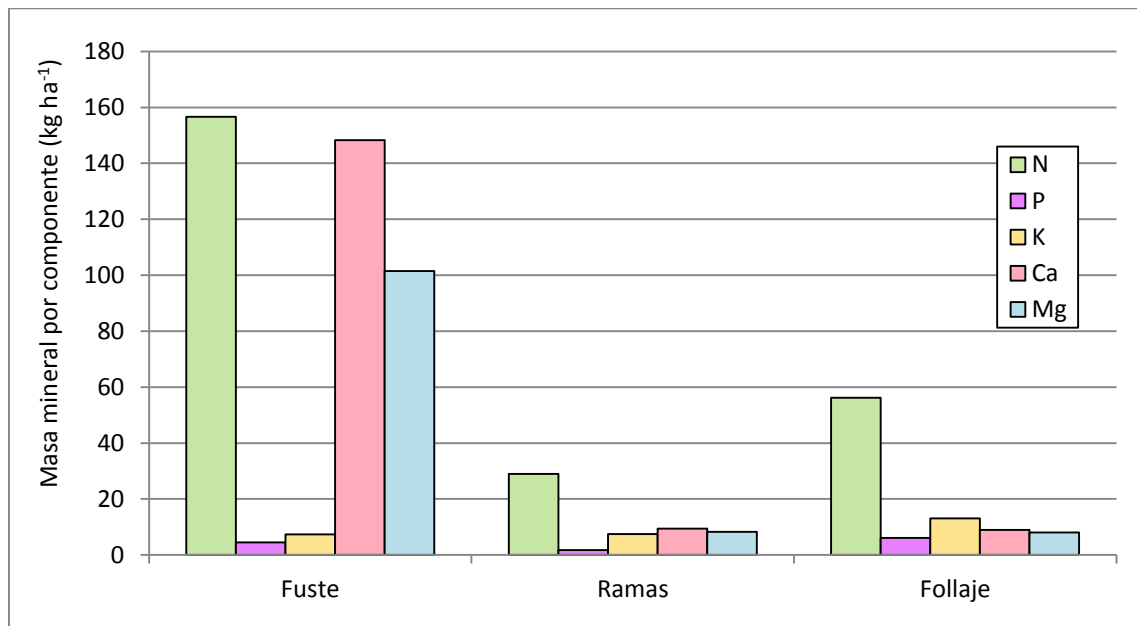


Figura 6.- Masa mineral promedio de los diferentes componentes de la biomasa, en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).

Incremento del área basal

La tendencia del crecimiento en área basal es similar en ambos sitios (Figura 7). Sin embargo, en el periodo de 1949 a 1974 el rodal 2 mostró mayor crecimiento; posterior a ese periodo ambos sitios mostraron nuevamente un crecimiento similar. Por otra parte, el incremento corriente en área basal no mostró diferencias entre los sitios (Figura 7).

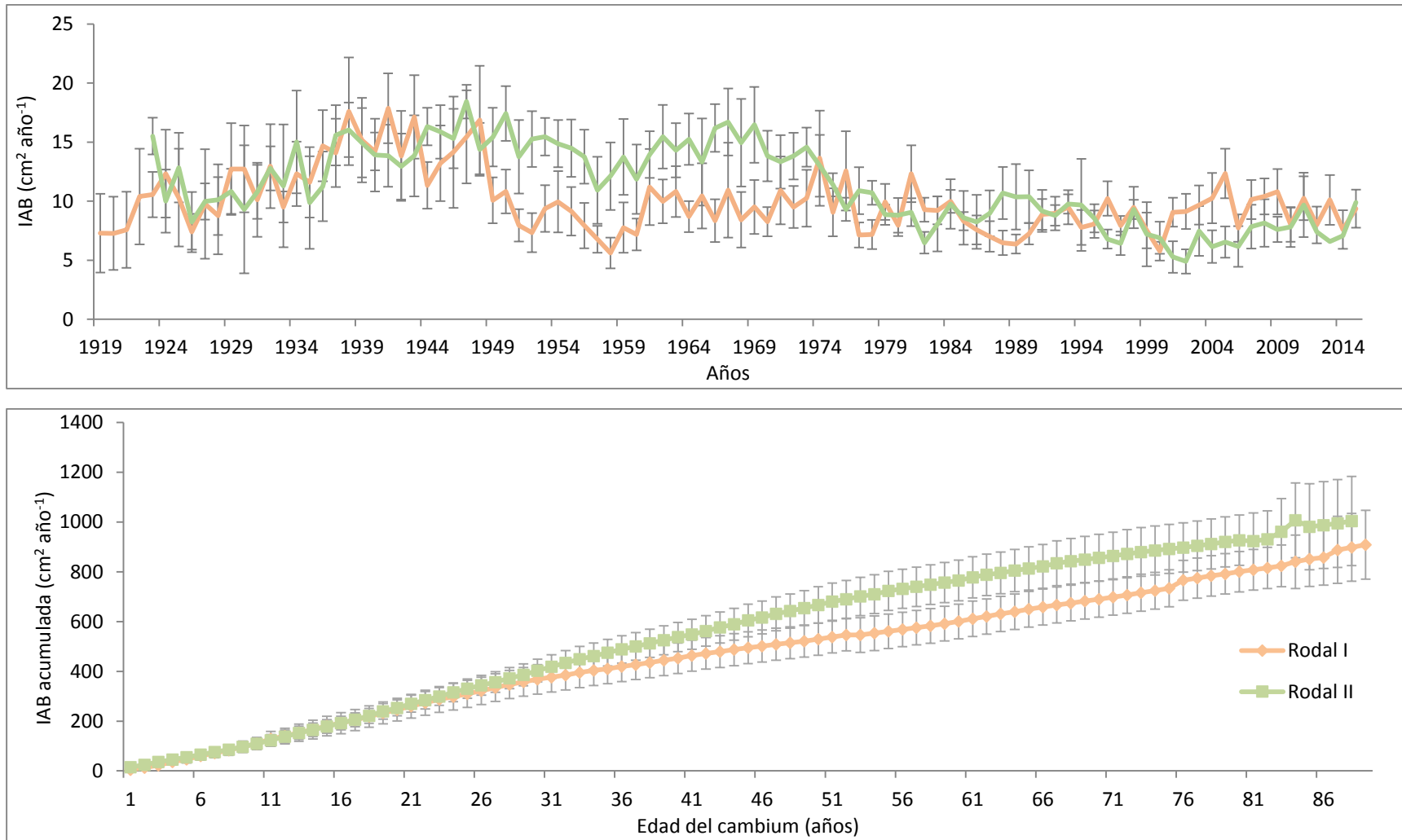


Figura 7.- Incremento en área basal (IAB) en el tiempo en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. IAB promedio \pm EEM (arriba), b) IAB acumulada promedio \pm EEM (abajo). EEM= Error estándar de la media.

5.1.2 *Piso forestal*

Los datos referentes al mantillo orgánico se muestran en la Cuadro 11. El mantillo evaluado está representado principalmente por acículas de *Pinus montezumae*. El peso de la biomasa del piso forestal fue de 22.2 y 21.5 Mg ha⁻¹ para los rodales I y II, respectivamente.

En cuanto a la concentración media de nutrientes de la biomasa del piso forestal se encontró que ambos rodales presentaron valores muy similares, aunque el rodal I presentó mayores valores en P, K y Mg, y el rodal II presentó valores más altos en N y Ca (Cuadro 11).

Cuadro 11.- Concentración media de nutrientes (mg kg⁻¹ y %) en el piso forestal de dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	Mg ha⁻¹	%	mg kg⁻¹			
I	22.2	0.70	425.3	397.6	4165.0	1701.06
II	21.5	0.79	415.8	371.1	4260.8	1572.3

La masa neta de nutrientes por hectárea en el piso forestal del rodal 1 fue de 150.2, 9.5, 7.8, 95.2 y 40.6 kg ha⁻¹, para N, P, K, Ca y Mg respectivamente. En el rodal II los valores fueron 173.6, 9.4, 8.3, 91.6 y 34.4 kg de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente (Figura 8).

Los nutrientes encontrados en el mantillo del sitio I respecto al suelo mineral a una profundidad de 40 cm, corresponde a 3.7, 59.2, 1.7, 2.2 y 5.3 % para N, P, K, Ca y Mg respectivamente. Para el sitio II representa el 5.3, 69.6, 3.1, 3.0 y 7.0 % para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

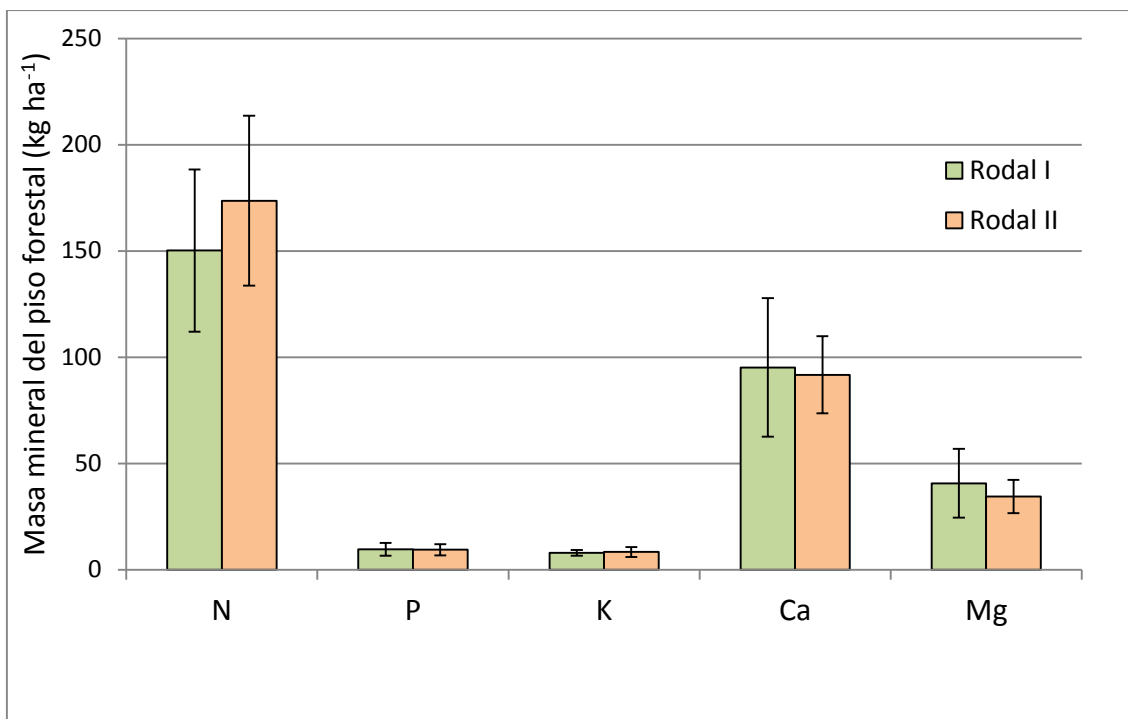


Figura 8.- Masa mineral promedio \pm EEM de la hojarasca del piso forestal en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. EEM= error estándar de la media.

5.1.3 *Suelo mineral*

En los cuadros 12 y 13 se muestran los diferentes tipos de horizontes, así como las propiedades encontradas en cada uno de los rodales evaluados. Ambos rodales mantienen un suelo del tipo Andosol (clasificación FAO, andisol, clasificación USDA) y se distinguen los mismos horizontes. Las profundidades de los suelos se aproximan a los 100 cm, sin embargo, la del rodal I es ligeramente mayor que la del rodal II.

Cuadro 12.- Características físicas y químicas del suelo mineral del rodal I de un rodal de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nancamilpa, Tlaxcala. CIC (capacidad de intercambio catiónico), PMP (punto de marchitez permanente).

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g cm⁻³)	Textura	pH 2:1	CIC (Cmol+ Kg⁻¹)	Materia orgánica (%)	Humedad aprovechable %	Lámina de agua (cm)
A	0 – 17	0.68	Franco	5.8	18.5	4.3	28.6	3.7
AB	17 – 40	0.85	Franco arcilloso	6.0	14.0	2.5	22.6	4.7
Bw	40 – 70	0.95	Franco arcilloso	6.7	10.5	0.5	13.2	3.8
Bt	70 – 115	0.89	Franco arcilloso	6.9	15.0	0.5	13.0	3.5

Cuadro 13.- Características físicas y químicas del suelo mineral del rodal II de un rodal de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. CIC (capacidad de intercambio catiónico), PMP (punto de marchitez permanente).

Horizonte	Profundidad (cm)	Densidad aparente (g cm⁻³)	Textura	pH 2:1	CIC (Cmol+ Kg⁻¹)	Materia orgánica (%)	Humedad aprovechable %	Lámina de agua (cm)
A	0 – 15	0.83	Franco	5.6	17.1	5.9	26.7	4.0
AB	15 – 32	0.70	Franco	5.7	11.7	2.9	28.8	4.7
Bw	32 – 63	1.25	Franco arcilloso	6.1	11.4	0.7	13.5	4.2
Bt	63 -95	1.07	Franco arcilloso	6.7	12.4	0.7	10.4	3.9

Las densidades aparentes (DA) son bajas en el suelo superficial con valores de 0.68 Mg m³. La DA aumenta en el suelo profundo con valores de 1.1 Mg m³, Para ambos sitios, la textura va de franco a franco-arcillosa conforme aumenta la profundidad, lo que refleja lavado de material fino. El pH de los suelos son ligeramente ácidos; este varió entre 5.6 y 6.9 siendo menores en los horizontes superficiales y mayores en los horizontes más profundos. Los valores registrados en el rodal I fueron mayores que los del rodal II. La CIC, en ambos rodales, fue mayor en los primeros horizontes y disminuyó conforme aumentó la profundidad, esto en relación a la cantidad de materia orgánica registradas, donde el porcentaje fue disminuyendo conforme la profundidad fue mayor. El porcentaje de la humedad aprovechable al igual que la CIC fue menor a profundidades mayores, en el rodal I varió entre 28.6 y 13.06%, y para el rodal II varió entre 26.7 y 10.4%.

Los niveles de N, P, K, Ca y Mg en el suelo de ambos rodales se muestran en la Cuadro 14, puede observarse que el N, Ca, K y Mg suelen disminuir al incrementarse la profundidad; sin embargo, en los dos últimos el valor aumenta considerablemente en el horizonte más profundo. La proporción de N en los dos primeros horizontes, respecto al total, equivale entre el 76 y 77%, el K equivale entre 38 y 54%, mientras que el Ca equivale entre 51 y 59%. El fósforo fue el único elemento que su valor tiende a incrementar hacia los horizontes más profundos; sus niveles en el suelo de ambos rodales evaluados son muy bajos. No obstante, los dos primeros horizontes mantienen entre 28 y 30% del total en el suelo.

Cuadro 14.- Composición elemental promedio de nutrientes del suelo en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Horizontes	N	P	K	Ca	Mg
				mg kg⁻¹		
I	A	1446.7	6.0	153.3	1553.3	239.1
	AB	1164.3	4.7	147.8	1280	249.3
	Bw	357.0	14.5	181.5	1180	297.9
	Bt	448.0	10.0	290.4	1520	449.9
II	A	1386.0	8.3	137.1	1600	231
	AB	1285.7	2.5	77.9	850	166.2
	Bw	434.0	15.5	28.2	640	182.4
	Bt	364.0	11.5	153.3	1030	407.4

Cuadro 15.- Masa neta de nutrientes en el suelo de dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Horizontes	N	P	K	Ca	Mg
				kg ha⁻¹		
I	A	1693.4	7.0	179.4	1818.3	279.9
	AB	2280.4	9.1	289.6	2506.9	488.2
	Bw	1026.5	41.7	521.9	3393.1	856.6
	Bt	398.8	8.9	258.5	1353.1	400.5
II	A	1734.4	10.4	171.6	2002.1	289.1
	AB	1549.5	3.0	93.9	1024.4	200.3
	Bw	1691.1	60.4	110.0	2493.8	710.7
	Bt	662.4	20.9	278.9	1874.5	741.3

Respecto a la masa mineral promedio de nutrientes en el suelo, se observa que el N es el único elemento que muestra valores más altos dentro de los primeros horizontes, mientras que P, K, Ca y Mg mantiene mayores cantidades en los horizontes más profundos. En general, en el suelo mineral los valores de N y Ca son los más altos, el K y Mg poseen valores medios, mientras que el P registró valores muy bajos, en el primer horizonte su valor va de 7 a 10.4 kg ha⁻¹ (Cuadro 15).

5.2 Transferencia de nutrientes.

5.2.1 Producción de hojarasca

La dinámica de la caída de hojas durante el periodo diciembre 2011-diciembre 2012 se presenta en la Figura 9. La producción de hojarasca medida mensualmente fue similar en ambos rodales 6.31 Mg ha⁻¹ año⁻¹, Se observa que la mayor producción de hojarasca se presentó en marzo (1.3 Mg ha⁻¹), en la temporada más seca. Sin embargo, para el otoño (Septiembre) se presenta un incremento en la producción de hojarasca por el término de la época de crecimiento. La producción disminuye gradualmente de septiembre del año actual a enero del siguiente año.

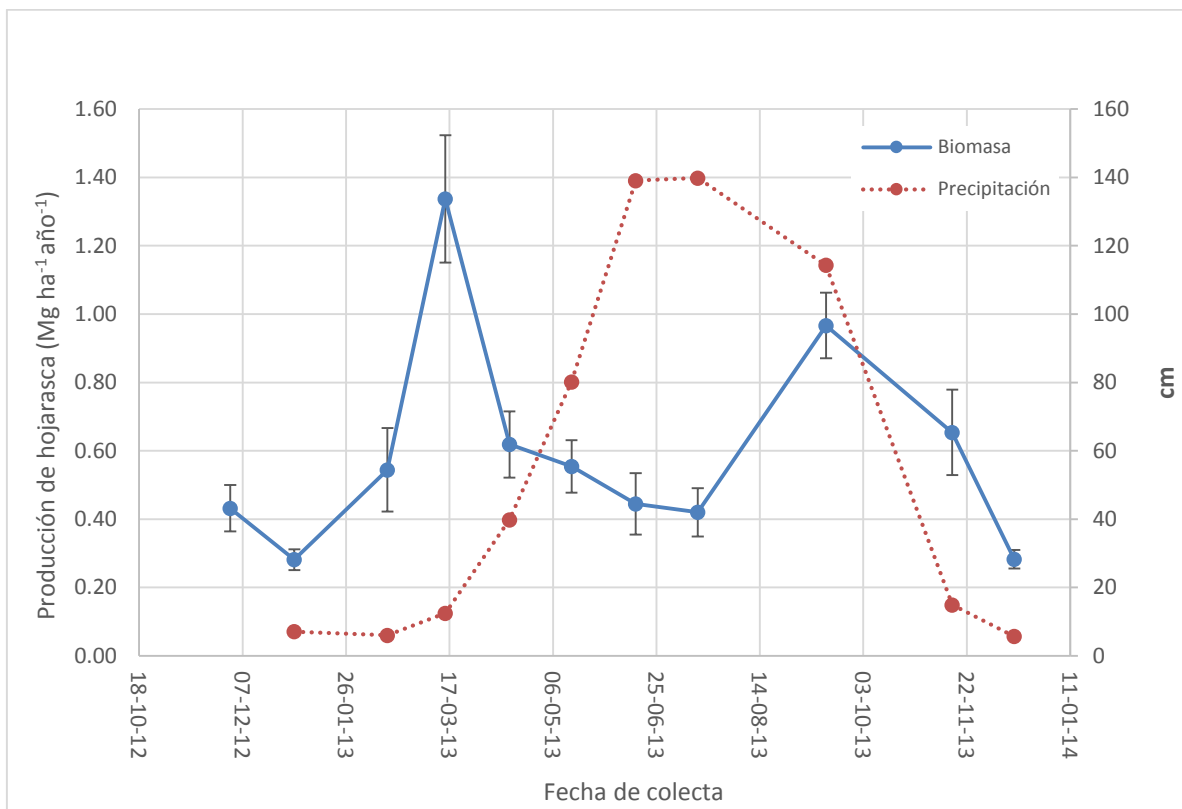


Figura 9.- Producción de hojarasca anual en el periodo diciembre 2011- diciembre 2012 en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

La concentración de nutrientes de la hojarasca por periodo estacional de ambos rodales se muestra en la Cuadro 16, se observa que en el periodo de primavera se presentó la mayor caída de hojarasca. Los elementos de N, P y K presentaron las concentraciones más altas durante el invierno (0.86%, 407.7 y 419.7 mg kg⁻¹) y primavera (0.99%, 516.5 y 402.3 mg kg⁻¹), mientras que el Ca fue mayor durante la primavera (3608.9 mg kg⁻¹) y el Mg fue más alto en la temporada de otoño (1746.4 mg kg⁻¹).

Cuadro 16.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca recolectada por periodo estacional en un rodal de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha⁻¹ año⁻¹	%	mg kg⁻¹			
Invierno	1257.8	0.86	407.7	419.7	3054.2	1447.9
Primavera	2510.0	0.99	516.5	402.3	3608.9	1093.3
Verano	864.5	0.55	362.6	161.0	3230.5	1115.7
Otoño	1620.7	0.56	324.2	340.0	3529.8	1746.4

En cuanto a la masa mineral promedio de la hojarasca por periodo estacional (Figura 10), en los dos periodos con mayor cantidad de nutrientes contenidos en la caída de hojarasca corresponden a primavera y otoño, coincidiendo con los periodos donde se estimó la mayor cantidad de hojarasca producida, asimismo, con los periodos secos del sitio. También puede observarse que los nutrientes que regresa la vegetación al piso forestal a través de la hojarasca, corresponden principalmente al nitrógeno y calcio.

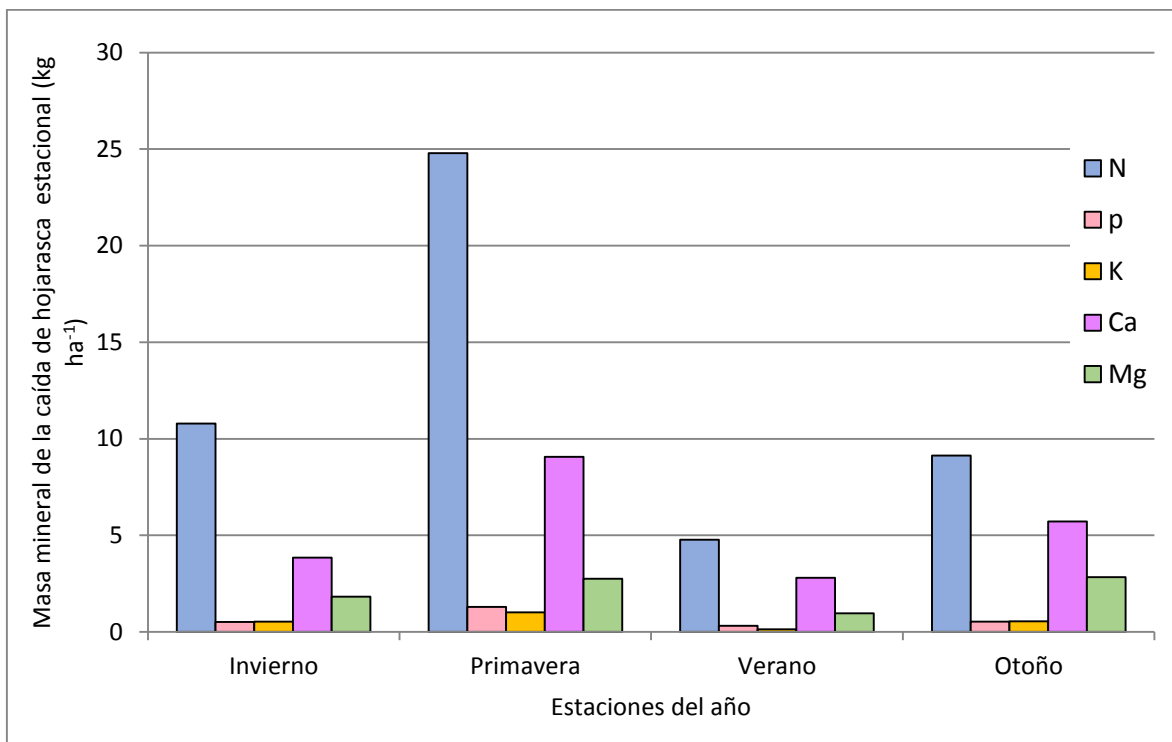


Figura 10.- Masa mineral promedio de la hojarasca colectada en cada periodo estacional en un rodal de *Pinus montezumae*, en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

En cuanto a la biomasa estimada anualmente en el 2014 se registraron valores de 5.84 y 6.16 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para el rodal I y II, respectivamente. Estos valores son similares a los encontrados en la evaluación mensual, la concentración de nutrientes es más parecida a la de la estación de otoño.

Cuadro 17.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca recolectada en el año 2014 en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodales	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	%	mg kg ⁻¹			
I	5.84	0.77	351.2	257.8	5629.5	1797.7
II	6.16	0.70	255.4	168.3	3882.2	1376.8

La concentración media de nutrientes de la hojarasca colectada en ambos rodales se muestra en la Cuadro 17, estos resultados indican valores ligeramente mayores en el rodal I. La concentración del N, Ca y Mg en la hojarasca son los más altos, mientras que el P y K representan valores bajos.

En cuanto a la masa mineral promedio de la hojarasca colectada anualmente, indica que el N es el principal elemento que retorna al piso forestal a través de la caída de las hojas, seguido del Ca y Mg. El contenido de elementos en la hojarasca caída al piso forestal es ligeramente mayor para el rodal I.

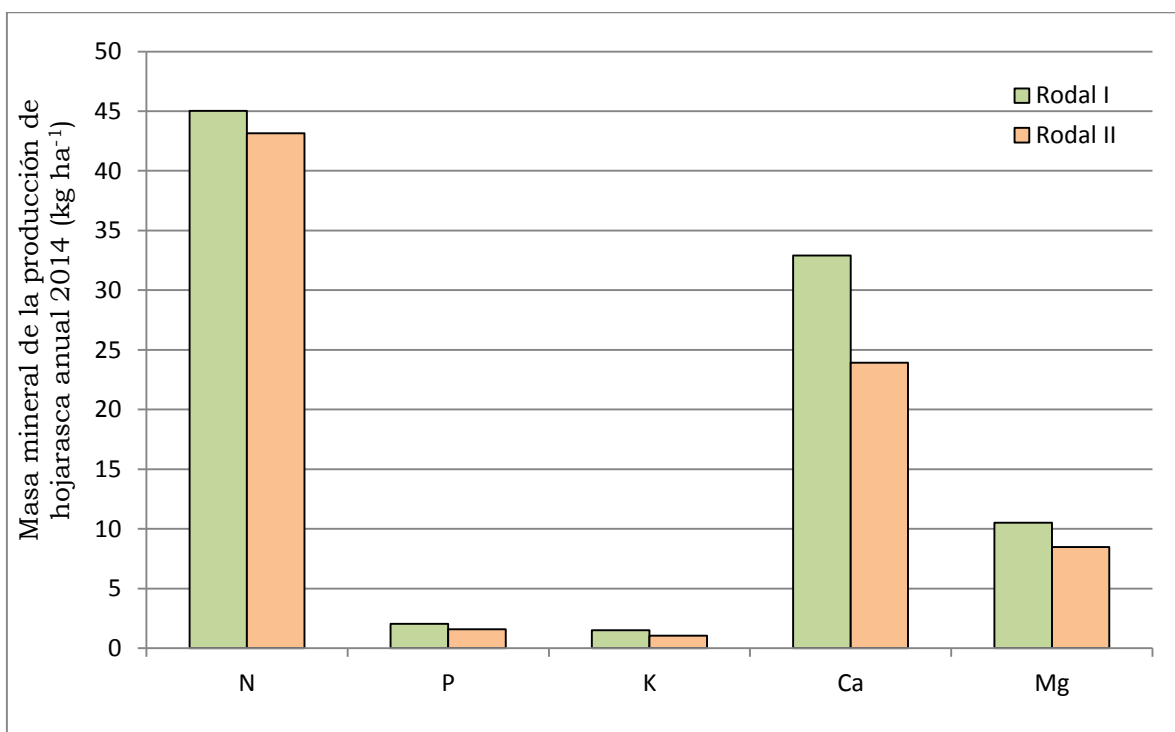


Figura 11.- Masa mineral promedio de la hojarasca recolectada en el año 2014 en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

5.2.2 Descomposición de hojarasca

Las tasas de mineralización de la hojarasca obtenidas por la incubación de las bolsas de descomposición fueron de 0.33 y 0.34 para el rodal I y II, respectivamente, las cuales son similares a las tasas de descomposición obtenidas de la división de la hojarasca anual y el contenido de la materia orgánica en el piso forestal. El Tiempo medio de residencia (TMR) de la hojarasca fue muy similar entre rodales, de 3.5 años para el rodal I y de 3.4 años para el rodal II (Cuadro 18). En promedio pasan 3.5 años para que el reservorio total del piso forestal se renueve.

Cuadro 18.- Tasas de mineralización y tiempo medio de residencia (TMR) de la hojarasca acumulada en el piso forestal en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Biomasa del mantillo Mg ha⁻¹	Producción media de hojarasca Mg ha⁻¹ año⁻¹	Tasas de mineralización <i>k</i>		TMR años
I	22.1	6.3	0.28*	0.33	3.5
II	21.4	6.3	0.29*	0.34	3.4

*Tasa de mineralización obtenida de la división de la producción de hojarasca anual y el contenido de materia orgánica del piso forestal, bajo la condición de equilibrio en el ecosistema.

En la Figura 12 se muestra la pérdida de hojarasca en las bolsas de descomposición, puede observarse que ambos sitios mantienen el mismo comportamiento, a los primeros 60 días, la pérdida de hojarasca correspondió a 7 y 4%, a los 126 días fue 12 y 13% y, a los 217 días fue de 18 y 15% para rodal I y II, respectivamente. A los 252 días fue de 19% para ambos rodales, mientras que para los 336 días la pérdida de hojarasca fue de 26% para el rodal I y 27% para el rodal II. Asimismo, se muestra la pérdida de la hojarasca extrapolada a 830 días, que corresponde un poco más del 50%.

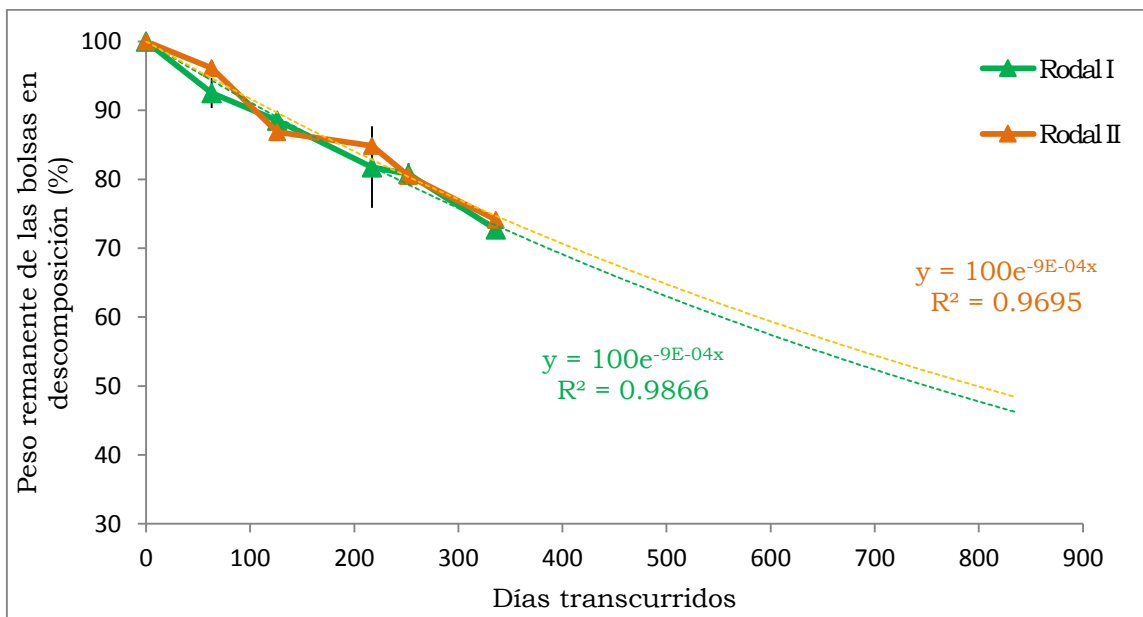


Figura 12.- Porcentaje de peso remanente (líneas lisas: promedio \pm EEM; líneas punteadas: extrapolación a 830 días) en bolsas en descomposición de hojarasca y ecuaciones de la tasa de descomposición, en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. EEM= Error estándar de la media.

En cuanto a la composición elemental de nutrientes en la hojarasca en descomposición, presentada en las figuras 13 y 14, se muestra que para ambos rodales el P, K y Mg mantienen un mismo comportamiento, los valores disminuyen conforme transcurren los días de descomposición. Mientras que el N y Ca no presentan un comportamiento definido. Los porcentajes de las cantidades de nutrientes transferidos de la hojarasca descompuesta a los 336 días en el rodal I fue de 20, 21.4, 67.4, 0.28 y 55.6 % de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. Mientras que en el rodal II fue de 17.7, 21.6, 52 y 44.5 % para N, P, K, Ca y Mg, respectivamente.

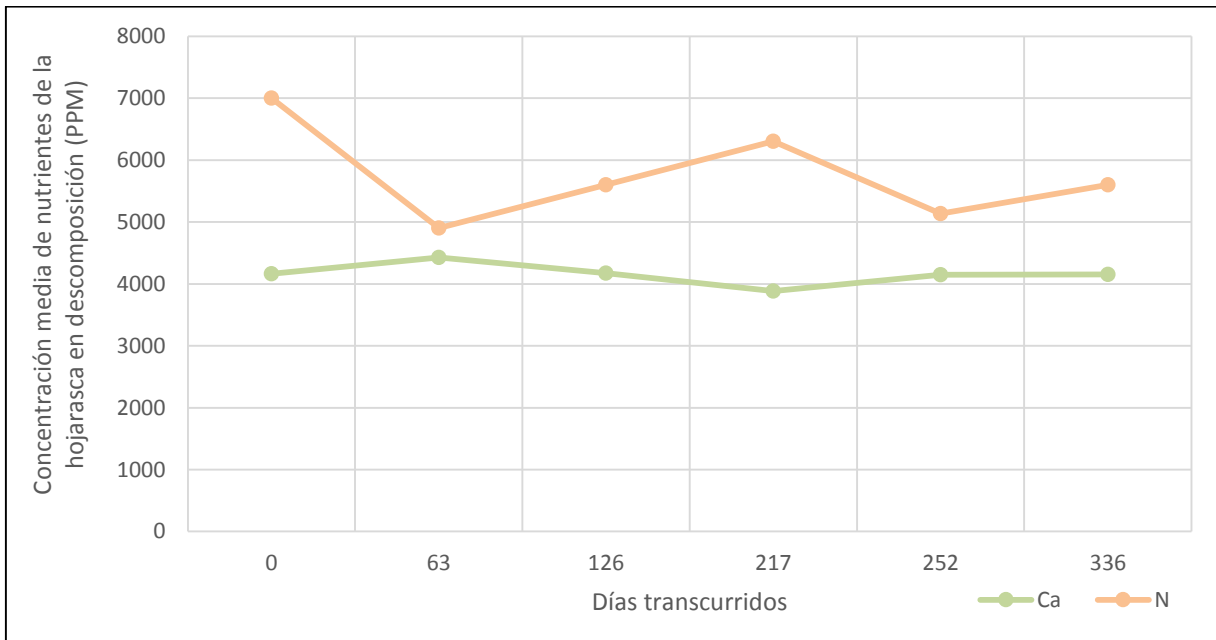
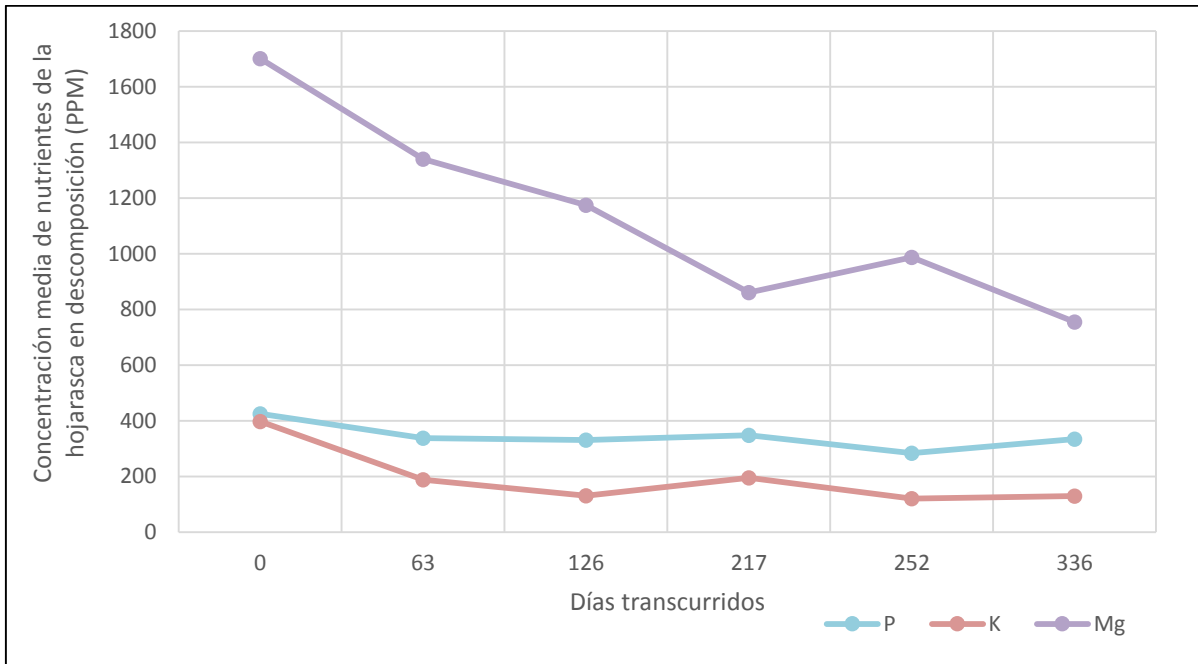


Figura 13.- Concentración media de nutrientes de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos (0, 63, 126, 217, 252 y 336 días) del rodal I en el Ejido de Nanacamilla, Tlaxcala. P, K y Mg (arriba), Ca y N (abajo). PPM= Partes por millón.

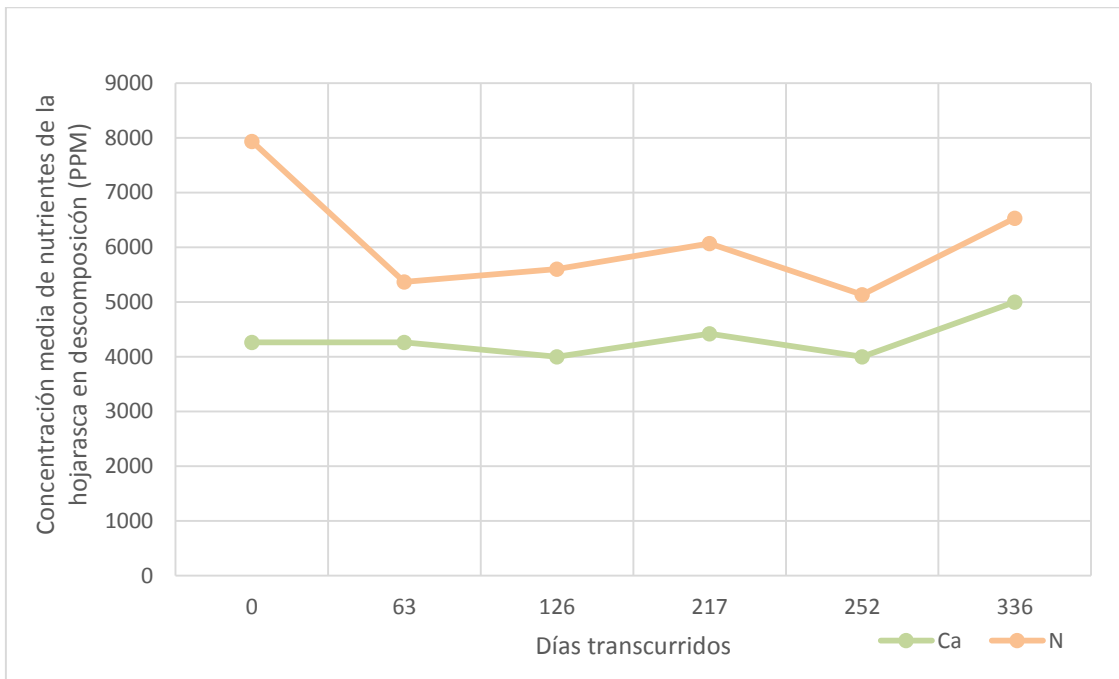
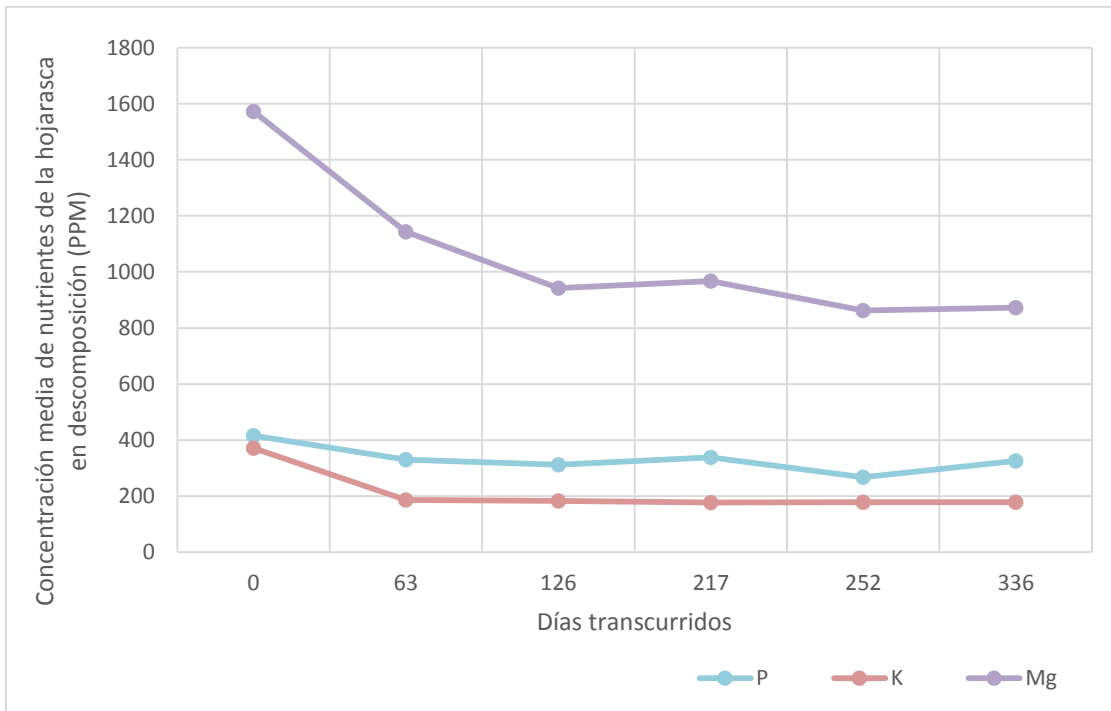


Figura 14.- Concentración media de nutrientes (PPM) de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos (0, 63, 126, 217, 252 y 336 días) del rodal II en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. P, K y Mg (arriba), Ca y N (abajo). PPM= Partes por millón.

En cuanto a las relaciones C/N, C/P, C/K, C/Ca y C/Mg de la hojarasca en descomposición, se encontró que únicamente las relaciones C/P y C/Mg mostraron una disminución conforme transcurrió el tiempo, contrario a la relación C/K que aumentó conforme transcurren los días, la relación C/Ca se mantienen estables conforme aumentan los días, mientras que la relación C/N no muestra un comportamiento definido (Cuadro 19).

Cuadro 19.- Relación C/N, C/P, C/K, C/Ca y C/Mg de la hojarasca en descomposición en diferentes momentos de incubación, en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Días de colecta	C/N	C/P	C/K	C/Ca	C/Mg
I	0	68.5	204.1	12.1	1.2	2.8
	63	97.9	162.0	25.4	1.1	3.6
	126	85.7	159.2	36.7	1.1	4.1
	217	76.2	167.3	24.6	1.2	5.6
	252	93.5	136.5	39.6	1.2	4.9
	336	85.7	160.5	36.9	1.2	6.4
II	0	60.5	199.6	12.9	1.1	3.1
	63	89.4	158.8	25.6	1.1	4.2
	126	85.7	150.0	26.2	1.2	5.1
	217	79.1	162.6	26.9	1.1	4.9
	252	93.5	128.6	26.8	1.2	5.6
	336	73.5	156.5	26.9	0.96	5.5

5.2.3 Reabsorción

El porcentaje de nitrógeno reabsorbido para el rodal I fue de 39 % y 30 % para el rodal II, para el fósforo correspondió a 36 y 40 % para rodal I y II, respectivamente, y el porcentaje de potasio registrado fue de 51 para el rodal I y de 53% para el rodal II (Cuadro 20). En cuanto a la masa de N y P retranslocado por hectárea se registró que para el rodal I fue de 21.9, 2.2 y 6.7 kg ha⁻¹ año⁻¹, y para el rodal II fue de 15.2, 2.2 y 6.2 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Cuadro 20.- Porcentajes de reabsorción y masa de N y P reabsorbido ($\text{kg ha}^{-1} \text{año}^{-1}$), en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Reabsorción		Masa mineral	
	N	P	N	P
I	39	36.4	21.9	2.2
II	30	40.9	15.2	2.2

5.3 Cosecha forestal

La masa mineral promedio debido a la extracción de la cosecha forestal se muestra en las figura 15. La biomasa que se extrae del bosque por la cosecha forestal corresponde a $5.17 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el rodal I y $4.29 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el rodal II. El total de N extraído anualmente en una hectárea para el rodal 1 es de 7.3 kg, 0.26, 0.64, 6.3 y 4.4 kg de P, K, Ca y Mg, respectivamente. La masa mineral extraída anualmente en una hectárea en el rodal 2 fue de 6.2, 0.22, 0.53, 5.2 y 3.6 kg de N, P, K, Ca y Mg, respectivamente. La masa mineral de la biomasa aérea se distribuye en los diferentes componentes, siendo el fuste el que mayores cantidades de nutrimentos reserva (Figura 15).

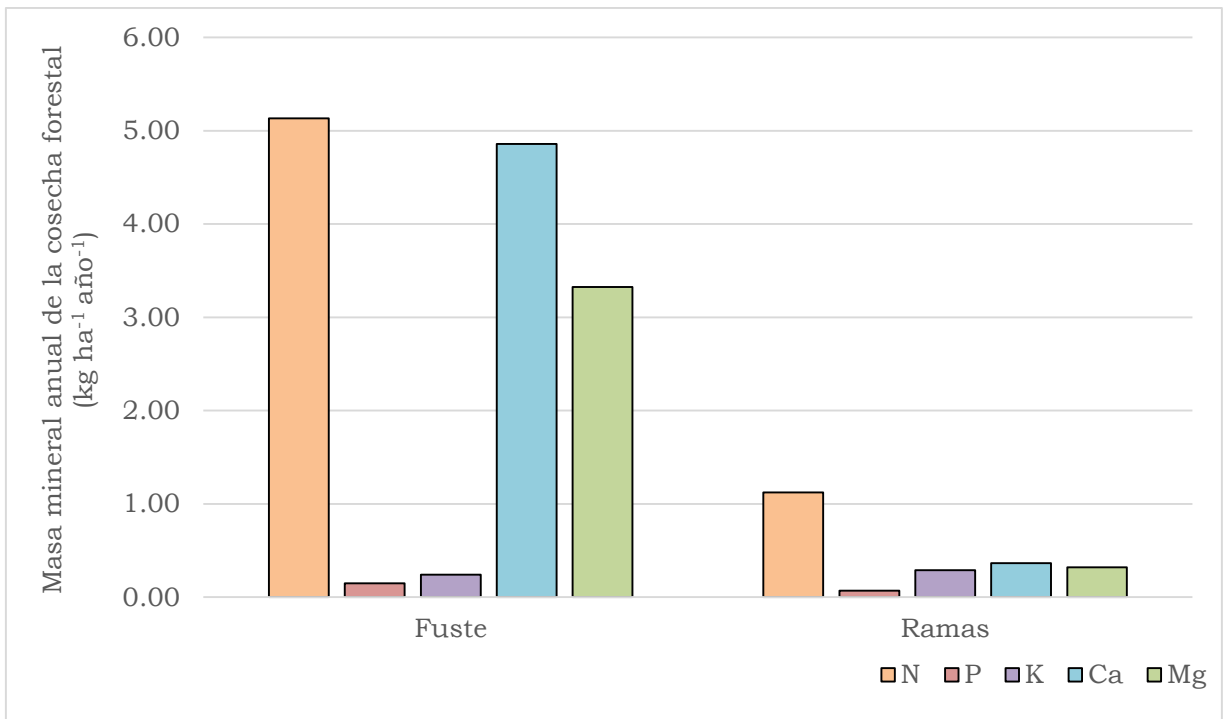
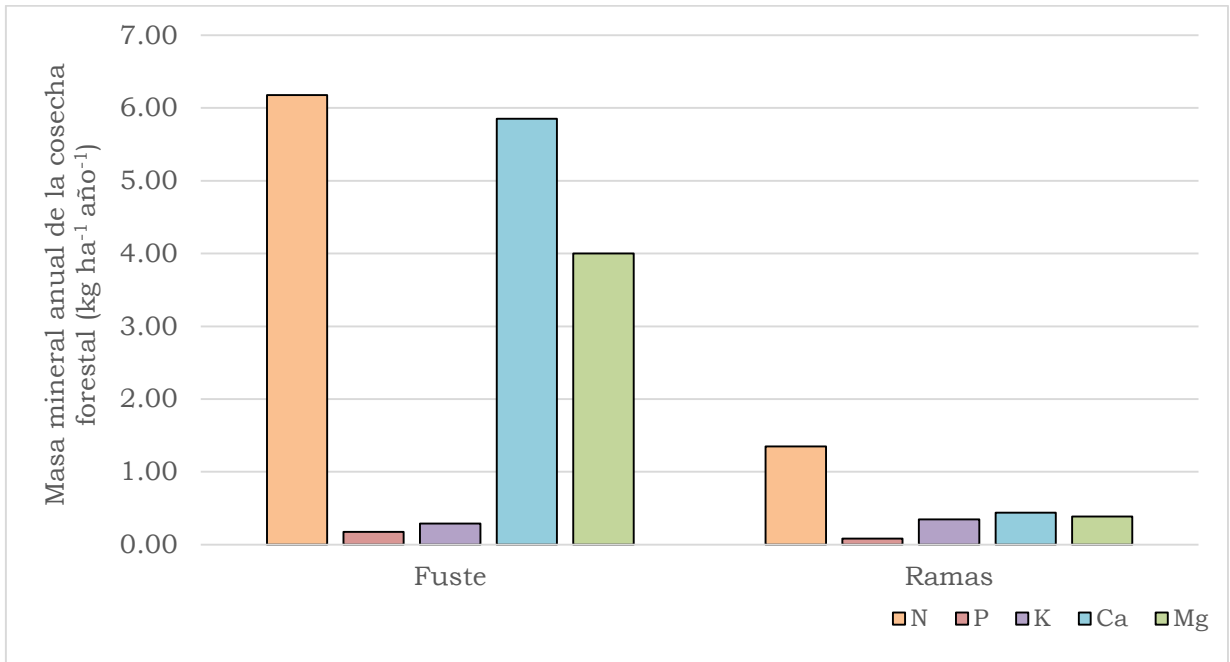


Figura 15.- Masa mineral promedio que se exporta por la cosecha forestal en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).

5.4 Requerimiento anual de nutrientes por el arbolado

La estimación de la ganancia neta anual de nutrientes del arbolado se muestra en la Figura 16. El crecimiento promedio anual de la biomasa se estimó entre 5.3 y 4.8 Mg ha⁻¹, para el rodal I y II, respectivamente. El total de N requerido anualmente por el arbolado para la ganancia de madera se estimó en 9.7 y 8.7 kg ha⁻¹ y entre 0.5 y 0.45 kg ha⁻¹ de P. Los datos para el resto de nutrientes se muestran en el Cuadro 21.

El requerimiento anual de la masa arbolada, que considera la retranslocación y el regreso de nutrientes al suelo, fue similar en ambos rodales, el requerimiento anual de N fue de 73.5 a 181.1 kg ha⁻¹ y el requerimiento anual por hectárea de P fue de 5.2 a 5.3 kg, el requerimiento de los demás nutrientes se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 21.- Absorción y requerimiento anual de nutrientes, en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala.

Rodal	Ganancia neta anual	Retorno al piso forestal	kg ha ⁻¹ año ⁻¹			
			Absorción	Reabsorción	Requerimiento	
I	N	9.7	49.5	59.2	21.9	81.1
	P	0.5	2.6	3.1	2.2	5.3
	K	1.1	2.2	3.3	6.7	10.0
	Ca	6.7	21.4	28.1	0	28.1
	Mg	4.7	8.4	13.1	0	13.1
II	N	8.7	49.5	58.2	15.3	73.5
	P	0.4	2.6	3	2.2	5.2
	K	1.01	2.2	3.2	6.2	9.4
	Ca	6.0	21.4	27.4	0	27.4
	Mg	4.3	8.4	12.7	0	12.7

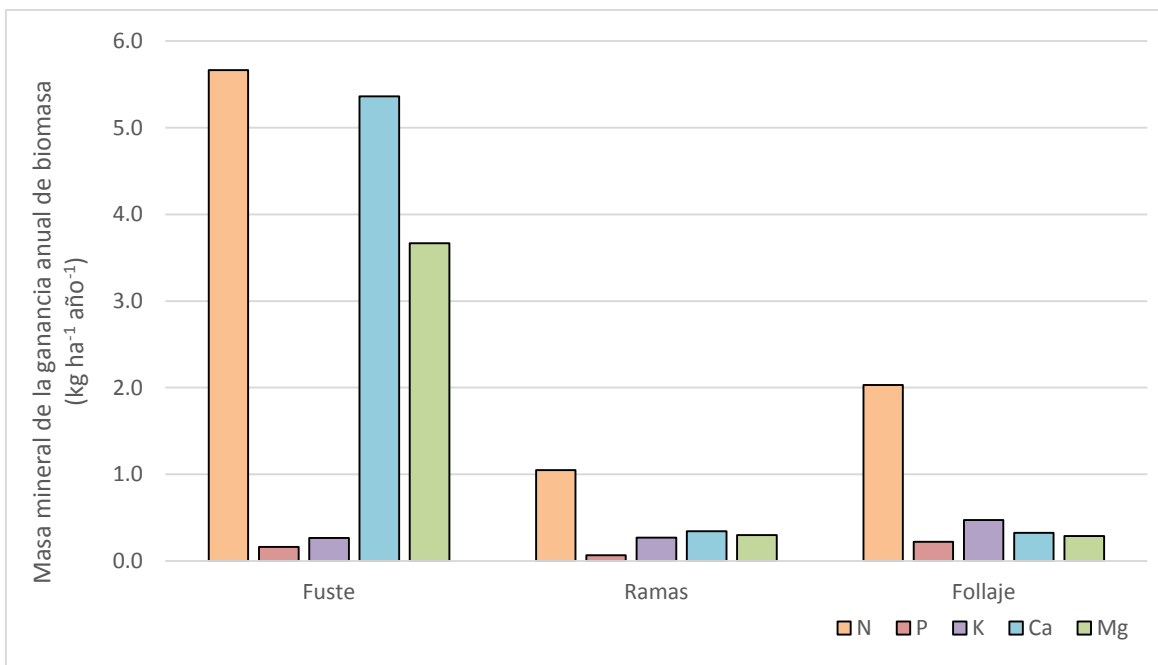
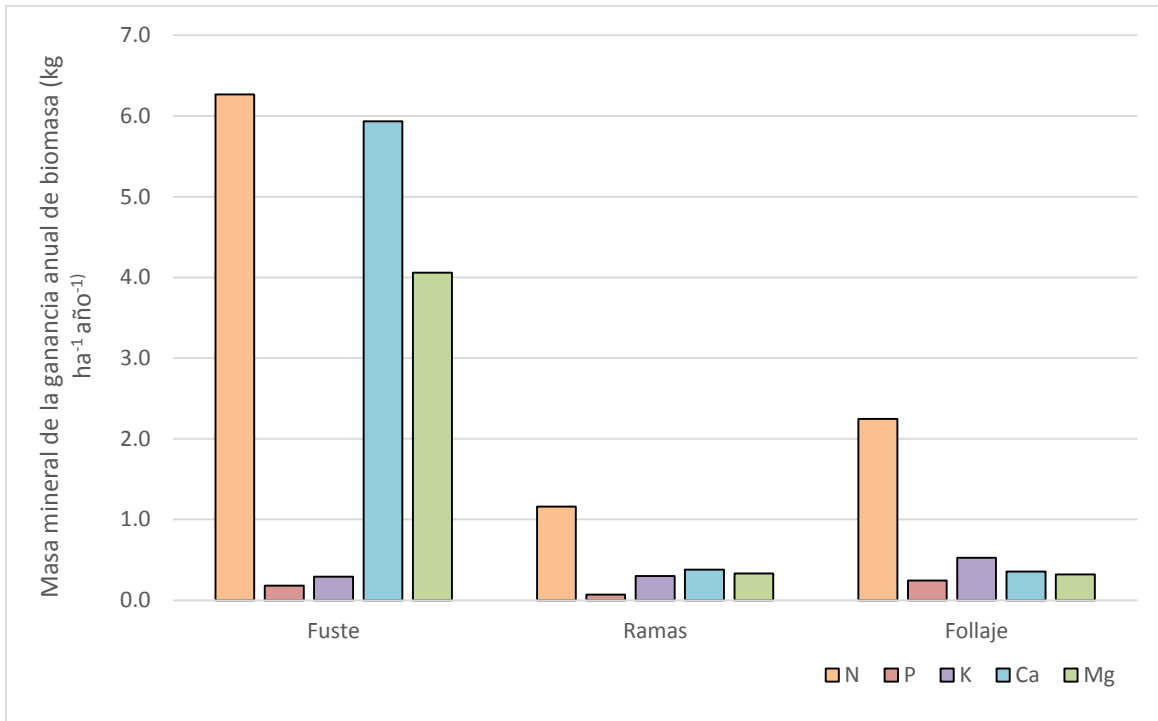


Figura 16.- Masa mineral promedio de la ganancia neta anual de la biomasa aérea en los diferentes componentes del arbolado, en dos rodales de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (arriba), Rodal II (abajo).

5.5 Sustentabilidad del ecosistema

La masa mineral presente en los reservorios (biomasa aérea, piso forestal y suelo mineral) y sus transferencias mediante los flujos (producción de hojarasca, reabsorción y descomposición de hojarasca) se muestran en la Figura 17. La masa de nutrientes que se pierde por la cosecha forestal es pequeña comparado con los reservorios de la biomasa aérea, suelo mineral y piso forestal. Respecto al suelo mineral, el porcentaje de nutrientes que se pierde es de aproximadamente 0.13% de N, 0.3% del P, 0.08% de K, 0.07 % del Ca, y 0.21% del Mg.

Por otra parte, la masa mineral que se extrae por la cosecha forestal representa el 12 y 15% del N, entre 8.4 y 10% del P, entre 24 y 29% del K y Ca y, entre 42 y 52% del Mg de la producción de hojarasca. Lo que resalta la importancia de retener el follaje como residuo de cosecha en el sitio, especialmente para P.

La masa mineral que necesita anualmente la vegetación para crecer corresponde a menos del 50% del N, P y Ca del total de la masa mineral que se produce anualmente por la hojarasca y entre el 45 y 56% del K y Mg. No obstante, las transferencias del piso forestal al suelo mineral son lentas. Cabe mencionar que el fósforo es el elemento que se encuentra en menor cantidad en los reservorios y que se trasfiere a través de los flujos, a excepción de la reabsorción que alcanzó un valor mayor a $2.2 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

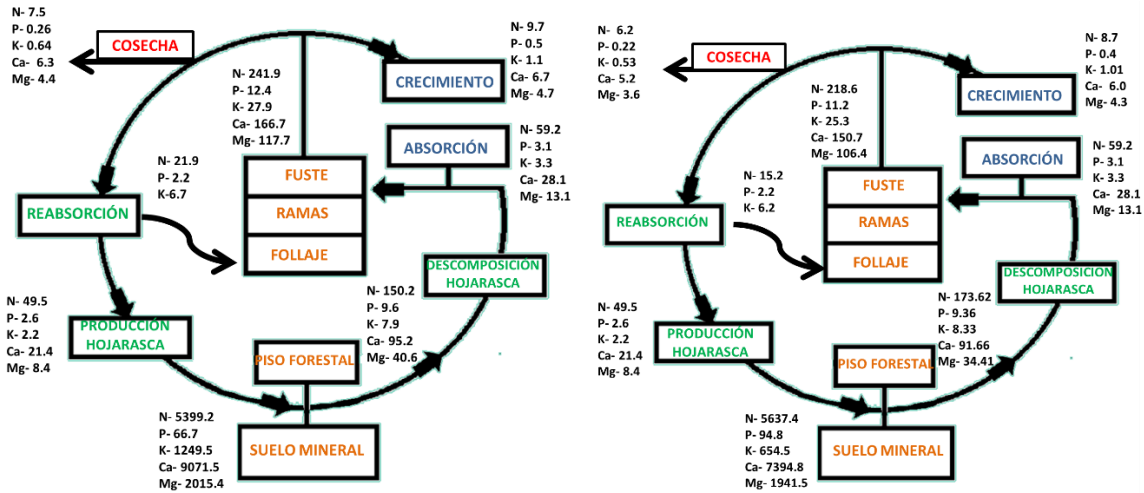


Figura 17.- Balance entre los reservorios (letras anaranjadas kg ha⁻¹), transferencias (letras verdes kg ha⁻¹ año⁻¹), salidas (letras rojas kg ha⁻¹ año⁻¹) y requerimiento (letras azules kg ha⁻¹ año⁻¹) de nutrientes de un bosque de *Pinus montezumae* en el Ejido de Nanacamilpa, Tlaxcala. Rodal I (izquierda), Rodal II (derecha).

Bajo las condiciones actuales el tiempo que el capital de nutrientes del suelo podría sostener el crecimiento del arbolado varía entre 256 y 1952 años. El K es el nutrimento que mayor tiempo podría mantenerse en el sistema entre 1234 a 1952, seguido de Ca entre 1422 a 1439 años, el N estaría presente en el ecosistema entre 706 a 909 años, el Mg presentan valores entre 458 a 539 años. Mientras que el P presenta los valores más bajos entre 256 a 430 años.

6. DISCUSIÓN

6.1 Reservorios de nutrientes en el bosque bajo manejo

La biomasa aérea total encontrada en este estudio es menor a la encontrada para otras especies de *Pinus*. En Misiones Argentina, Goya *et al.* (2003) reportan una biomasa aérea tres veces mayor a la reportada en este estudio para una plantación de *Pinus taeda* de 20 años de edad. Merino *et al.* (2003) reportan una biomasa promedio 1.3 veces mayor a la reportada en el presente estudio para plantaciones de *P. radiata* con un promedio de 21.1 años de edad, en Galicia, España. Por su parte, Garcidueñas (1987) reporta una biomasa tres veces superior a la reportada aquí para una plantación de la misma especie, con edad promedio de 38.4 años, en San Juan Tetla, Puebla.

Estas diferencias en la biomasa total aérea pueden estar relacionadas a diversos factores: las diferencias en las densidades de árboles, a las regiones de los estudios citados, al hecho de que algunas comparaciones fueron con resultados de plantaciones, en donde se mantiene un mayor control del espaciamiento y por ende, de la densidad. En esos estudios se registraron densidades de árboles muy superiores (entre seis y ocho veces) con respecto a las de este estudio presente. No obstante, el incremento anual en biomasa que reporta Garcidueñas (1987) para *Pinus montezumae* ($7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) es un valor muy cercano al reportado en este estudio, indicando que en ambos sitios, se mantienen un ritmo de crecimiento anual similar.

La biomasa aérea por componentes para plantaciones de *Pinus montezumae* reportada por Garcidueñas (1987) en San Juan Tetla, Puebla, fue ligeramente diferente a la reportado en este estudio. La fracción de ramas (16%) fue mayor, mientras que las fracciones del fuste (82%) y del follaje (1%) fueron menores. Las tasas de acumulación de biomasa dependen de las características genéticas de las especies, la condiciones ambientales del sitio y prácticas de manejo (Rodríguez y Álvarez, 2010), por tanto, la biomasa

aérea y su distribución están influenciadas por las diferentes condiciones que los sitios presentan. No obstante, ambos estudios reportaron que la mayor cantidad de biomasa acumulada en la parte aérea del árbol corresponde al fuste, seguido de ramas y por último follaje, patrón común reportado para los bosques (Imbert *et al.*, 2004 y Rodríguez y Álvarez, 2010).

Relativo a la concentración de nutrientes en los diferentes componentes de la biomasa aérea reportada por Gracidueñas (1987) para *Pinus montezumae*, esta presenta concentraciones de N similares en los tres componentes (fuste, ramas y follaje; cuadro 22). Las concentraciones de P reportadas fueron cinco veces más grandes en fuste, el doble en ramas y 1.5 veces en follaje a lo reportado en este estudio (Cuadro 10). Asimismo, la concentración de K fue más grande en el fuste (13.5 veces), ramas (1.28 veces) y follaje (1.22 veces). Las concentraciones de Ca en ramas y follaje fueron mayores (2.9 y 1.5 veces) mientras que para el fuste fue similar.

Estas diferencias en la concentración de nutrientes pueden ser atribuidas a la diferencias en edad de los árboles en ambos rodales, el estudio de Gracidueñas (1967) se realizó en rodales mucho más jóvenes (2.3 veces menor), con edad promedio de 38.4 años. Rodríguez y Álvarez, (2010) señalan que la concentración de nutrientes en el fuste y ramas disminuye durante el desarrollo del bosque, cabe mencionar que la mayor diferencia entre estos estudios se encontró en el fuste. La disminución de nutrientes conforme el bosque crece se debe a la acumulación de tejido leñoso a través del tiempo, que se encuentra constituido en gran proporción por células muertas. Por otra parte, la hojas también muestran una disminución en la concentración de nutrientes conforme avanza la edad de los árboles que se asocia a una distribución interna de nutrientes diferentes debido a que los árboles adultos mantienen hojas de diferentes edades (Rodríguez y Álvarez, 2010).

Cuadro 22.- Comparación de la concentración de nutrientes en los diferentes componentes de la biomasa aérea reportado para rodales de *Pinus montezumae*.

	N %	P	K	Ca	Mg
			mg kg⁻¹		
Garcidueñas (1987)					
Fuste	0.14	200.9	829.0	1299.2	498.8
Ramas	0.27	400.5	964.9	2803.8	600.8
Follaje	1.5	2344.7	3985.9	3517	1875.7
Presente Estudio					
Fuste	0.13	37.7	61.5	1242.6	850.1
Ramas	0.29	178.5	749.5	944.8	827.3
Follaje	1.4	1513.5	3249.9	2216.2	1981.8

No obstante, en este estudio la concentración de Mg en todos los componentes fue mayor a la reportada por Garcidueñas (1987), 1.7, 1,3 y 1.05 veces más grande en fuste, ramas y follaje, respectivamente.

Como se esperaba, la concentración más alta de N y P se encontró en el follaje, los que se podría explicase porque en este componente se lleva a cabo la fotosíntesis y la generación de energía (Imbert, *et al.*, 2004; Rodríguez y Álvarez, 2010). La mayor concentración de Ca en fuste comparado con otros componentes está relacionada con la pared celular (Imbert *et al.*, 2004). Las células de la madera están formada sólo de paredes celulares y el Ca es una parte esencial de ellas.

La mayor masa nutrimental en la biomasa aérea está dada por el fuste, seguido de ramas, corteza y por último follaje, que es el patrón esperado en especies de *Pinus* (Garcidueñas, 1987; Goya et al., 2003; Merino et al., 2003). Es resultado se debe a que la cantidad de biomasa del fuste es demasiado grande con respecto a los demás componentes. La masa de nutrientes reportado por Garcidueñas (1987) es mucho mayor al reportado en este estudio, ya que la biomasa encontrada en el estudio citado es tres veces superior a la reportada aquí.

Cuadro 23.- Comparación de la biomasa aérea en sus diferentes componentes, reportadas para rodales de *Pinus montezumae*

		Masa mineral (kg ha⁻¹)				
		N	P	K	Ca	Mg
Garcidueñas (1987)						
Fuste		401	56	231	362	139
Ramas		148	22	53	154	33
Follaje		62	10	17	15	8
Presente estudio						
Fuste	Rodal I	156	4.5	7.3	148	101
	Rodal II	142	4	6.6	134	92
Ramas	Rodal I	29	1.7	7.5	9.4	8.2
	Rodal II	26	1.6	6.7	8.5	7.5
Follaje	Rodal I	56	6	13	9	8
	Rodal II	51	5.5	12	8	7

La biomasa del mantillo reportada para *Pinus radiata* por Merino *et al.* (2003) fue entre 1.2 y 3 veces mayor, y la reportada por Garcidueñas (1987) para *Pinus montezumae* fue mayor 1.2 veces. Esta diferencia puede ser atribuida a la edad de los rodales, los estudios citados corresponden a rodales jóvenes; la longevidad de las hojas son menores en esta etapa y mayores en las etapas adultas (Rodríguez y Álvarez, 2010).

La masa neta de nutrientes en el piso es baja comparada con los valores reportados por Garcidueñas (1987) para la misma especie en una plantación en San Juan Tetla, Puebla. Este autor reporta una masa por hectárea de N que fue 19 veces mayor respecto al presente estudio, 7.3 veces mayor en P, 16 veces mayor en K y Ca, y 13 veces mayor en Mg, aun cuando no se registró gran diferencia en la acumulación de mantillo (cuadro 24), por tanto, la concentración de nutrientes en el estudio reportado por Garcidueñas (1987) fue mayor.

No obstante, se ha reportado que rodales más jóvenes tienden a presentar menor concentración de nutrientes en la hojarasca que se almacena en el mantillo (Rodríguez y Álvarez, 2010). Sin embargo, Dames *et al.* (2002), registraron que el principal reservorio de nutrientes correspondió al piso

forestal, la mayor cantidad de raíces se presentó en la capa más profunda del mantillo como una respuesta a la baja mineralización de la hojarasca, alta inmovilización de nutrientes en el suelo y a las mejores condiciones de humedad en el piso forestal, en un estudio con plantaciones de *Pinus patula* de 42 años de edad. En parte, la diferencia en la masa de nutrientes del presente estudio con Garcidueñas (1987) podría deberse a la velocidad de descomposición de la hojarasca, la cual depende en gran medida a las condiciones ambientales. Aunque la precipitación media anual en el área del estudio citado es mayor (> 1000 mm) la temperatura resultó ser menor (6- 16 °C), temperaturas muy frías pueden influir en tasas de descomposición lentas (Landsberg y Gower, 1997), la tasa de descomposición de la hojarasca del estudio de Garcidueñas (1987) se encuentra en el límite inferior del intervalo reportado para bosques templados (Landsberg y Gower, 1997). Por otra parte, puede deberse a la alta concentración de nutrientes almacenada en la biomasa aérea y principalmente en el follaje, superior a la reportada en este estudio, tal como se mencionó anteriormente, aun cuando la tasa de reabsorción de N y P fueron altas (66 y 67%), las hojas posiblemente conservan una gran cantidad de nutrientes al caer al piso forestal.

Cuadro 24.- Comparación de la biomasa y concentración de nutrientes del piso forestal reportado para rodales de *Pinus montezumae*

	Biomasa	N	P	K	Ca	Mg
	Mg ha⁻¹					
					kg ha⁻¹	
Garcidueñas (1987)	26.1	2940	70.15	135.16	1565	524
Presente estudio						
Rodal I	22.2	150.2	9.6	7.8	95.2	40.6
Rodal II	21.5	173.6	9.4	8.3	91.6	34.4

La importancia del piso forestal recae en la acumulación de nutrientes que mediante el proceso de mineralización generan formas asimilables para los árboles (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997). Es por ello, que gran porcentaje (más del 50%) del P acumulado en el piso forestal representa la cantidad de este elemento en el suelo mineral a 50 cm de profundidad.

Los efectos del aprovechamiento forestal en el suelo son variables y su intensidad depende del tiempo transcurrido después de la cosecha (García (2008). En los rodales de estudio no se encontraron evidencias de daños serios al suelo, lo que indica que los suelos estudiados aquí no muestran cambios intensos por la cosecha forestal. Además, la intervención en los rodales estudiados fue al menos cuatro años anteriores al estudio. Cabe mencionar que los estudios mencionados por García (2008) corresponden a prácticas más intensas que la reportada en el presente estudio y es probable que esto explique las diferencias.

La concentración y la masa de nutrientes reportadas por Goya *et al.* (2003) mostraron que estas aumentaron a medida que incrementó la profundidad, mismo patrón reportado en este estudio, aunque las cantidades registradas por Goya *et al.* (2003) fueron mayores (Cuadro 24). Comparado con Garcidueñas (1987), este autor encontró una mayor cantidad de K, Ca y Mg conforme incrementó la profundidad, mientras que el N y P disminuyeron con la profundidad (cuadro 24), la masa mineral reportada por este autor es mucho mayor a la reportada en este estudio (cuadro 25). La diferencia en el contenido de nutrientes de los estudios citados respecto al presente puede ser atribuible a las diferencias en las propiedades físicas y químicas del suelo, y en parte al material parental del que derivan, que pueden influir en su contenido de nutrientes.

En el presente estudio se registró una proporción de P que va de 11% a 60% para N en los dos primeros horizontes. Goya *et al.* (2003) encontraron una gran proporción de elementos a los 30 cm de profundidad (41% del C, 39%

del N y 32% del S) y a los 10 cm de profundidad el 30% de P, Fe y Mn almacenado en el perfil. Esto indica que el suelo mineral posee buena disponibilidad de nutrientes en la zona donde se lleva a cabo la mayor absorción de nutrientes por las raíces de las plantas.

Cuadro 25.-Comparación de la masa nutrimental del suelo mineral reportadas para *Pinus taeda* y *P. montezumae*

Horizontes	N	P	K	Ca	Mg
	kg ha⁻¹				
Goya et al. (2003)					
<i>Pinus taeda</i>					
0-10 cm	1552	12.6	82	616	65
10-30 cm	2678	11.1	121	878	70
30-100 cm	6525	25.5	347	1759	211
Garcidueñas (1987)					
<i>Pinus montezumae</i>					
1	5494-16368	23-92	79-483	4371-17042	383-4033
2	3560-6969	29-106	154-362	7954-21389	35-700
3	2970-4140	10-25	103-186	5009-12375	1139-2374
4	718-9108	10-42	150-134	65075-33203	73-2595
5	580-3588	8-14	140-181	6646-9113	444-1661

La distribución de la masa mineral total (suelo mineral + biomasa aérea) del bosque de *Pinus montezumae* en el Ejido Nanacamilpa presentada en el cuadro 26. Puede observarse que una gran proporción de los nutrientes (N, P, K) está contenida en el suelo mineral, entre 80 y 90% del N, P, K, seguido de la madera y por último follaje, no obstante este último posee una alta concentración de nutrientes, mayor al componente madera, lo que realza su importancia de la entrada de nutrientes al suelo mineral a través de la caída de hojarasca. Aunque las cantidades de nutrientes son muy diferentes en los bosques tropicales y ligeramente diferente a los reportados para bosques templados de aciculares (*Pinus taeda* y *P. resinosa*), las proporciones en los diferentes compartimentos son similares.

Cuadro 26.- Comparación del contenido total de nutrientes (kg ha⁻¹) de algunos ecosistemas y la distribución de nutrientes dentro de cada uno.

Ecosistema	Nitrógeno (% del ecosistema)				Fósforo (% del ecosistema)				Potasio (% del ecosistema)			
	Total	Suelo	Madera	Follaje	Total	Suelo	Madera	Follaje	Total	Suelo	Madera	Follaje
Bosque boreal perennifolio de aciculares												
<i>Picea mariana</i>	689	75	24	1	2	92	5	3	1 692	98	2	<1
<i>Pinus banksiana</i>	3 729	96	3	1	6100	100			98 707	99	<1	<1
Bosque boreal caducifolio de latifoliadas												
<i>Betula papyrifera</i>	2 879	91	8	1	26	75	21	4	7 546	97	3	<1
Bosque templado perennifolio de aciculares												
<i>Pinus taeda</i>	7 650	95	4	1	960	98	2	<1	930	84	16	1
<i>Pinus resinosa</i>	4 400	91	7	2	107	31	56	13	1 700	74	24	2
Bosque templado caducifolio de latifoliadas												
<i>Liriodendron tulipifera</i>	3 500	95	4	1	2840	98	2	<1	8 130	93	6	<1
<i>Fagus silvatica</i>	6 332	94	5	1	3150	98	2	<1	245	49	49	2
Bosque templado perennifolio de latifoliada												
<i>Eucalyptus regnans</i>	18 222	97	2	<1	3356	98	1	1	2 149	56	38	1
<i>Eucalyptus obliqua</i>	14 097	96	3	<1	1743	98	2	<1	1 952	83	16	1
Bosque tropical												
Montañoso	19 200	99	1	<1	16	37	63	<1	3 750	71	29	<1
Tierras bajas	5480	85	13	2	1410	97	2	<1	13 720	99	<1	<1
Bosque templado de <i>Pinus montezumae</i>												
Rodal I	5 641	96	3	< 1	79	84	8	7	1277	98	1	1
Rodal II	5 856	96	3	< 1	106	89	6	6	680	96	2	2

Estos resultados indican la importancia del suelo mineral como principal reservorio de nutrientes de los sistemas forestales. Aunque su reserva puede ser mayor al requerido por la vegetación, como puede observarse en el cuadro xx que representa < del 4% (madera + follaje), a excepción del fósforo que alcanza hasta el 15%, en particular para este estudio, existen algunos procesos que controlan la disponibilidad de dichos nutrientes para que las plantas puedan absorberlos (Grigal, 2000; Landsberg y Gower, 1997), por tanto, su mantenimiento es un factor clave en el manejo forestal.

6.2 Transferencias de nutrientes en el bosque bajo manejo

Los resultados de la producción de hojarasca medida mensual y anualmente se encuentra en el límite superior del rango reportado para otras especies de *Pinus* que va de 3.9 a 7.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (Correa *et al.*, 2007; León *et al.*, 2011; Luna y Hernández, 2009), y es un valor mayor comparado al que reporta Garcidueñas (1987) para la misma especie de este estudio (1.8 veces). Por su parte, Martínez (2014) reporta un valor similar al encontrado en este estudio para un bosque de *Pinus patula* sin manejo. La producción alta de hojarasca reportada en este estudio comparada con Garcidueñas (1987) puede atribuirse a una respuesta al estrés hídrico de los árboles.

Rodríguez y Álvarez (2010) mencionan que el factor más común que determina la abscisión de las hojas es la respuesta de los árboles a este estrés en las temporadas de sequía. Cabe mencionar que la precipitación media anual del área de este estudio es menor (700 mm) que la de los otros estudios (> 1000 mm), y presenta temperaturas más elevadas, estas características ambientales hacen del sitio de estudio un lugar seco y propenso a presentar condiciones de estrés hídrico. Es por ello, que la mayor producción se presentó en el periodo cuando los niveles de precipitación fueron menores y en la transición de invierno-primavera. Además las bajas temperaturas de la época invernal pueden provocar heladas que inciden en la pérdida de hojas; la mayor producción de hojas se

observó en el periodo cuando los niveles de precipitación fueron menores y en la transición de invierno-primavera.

La caída de hojarasca también puede ser ocasionada por otros factores climáticos como los vientos fuertes o el impacto de la lluvia sobre las hojas (Correa *et al.*, 2007; Rodríguez y Álvarez, 2010), factores que pudieron influir en la elevada caída de hojarasca durante el otoño, cuando la precipitación es aún alta en el sitio.

Las concentraciones de minerales presentaron una variación en las diferentes estaciones del año, las más altas se presentaron en invierno y primavera y la más baja en el verano. Rodríguez y Álvarez (2010) reportan que las concentraciones más altas en los bosques se presentan en primavera, mientras que las más bajas a finales de verano, este suceso puede explicarse a través de lo que Hubert *et al.* (1998; citado por Rodríguez y Álvarez 2010) sugiere, que las hojas que se mantienen después de la mayor caída de hojarasca sostienen la retranslocación de los nutrientes para el crecimiento de los árboles durante el periodo que permanecen en ellos, y por ello presentan menor contenido de nutrientes cuando caen en los periodos posteriores.

La masa mineral obtenida para N, P y Mg en el estudio se encuentran por encima de los valores reportados para otras especies de coníferas, mientras que el Ca se encuentra en los valores medios y el K en el límite inferior (Cuadro 27). Comparado de manera particular con otro estudio (Garcidueñas, 1987) donde se evaluó a la misma especie, se observa una ligera diferencia entre los valores; el P, K y Ca son ligeramente mayores, mientras que el N y Mg presentaron valores menores, indicando que la concentración de nutrientes en la hojarasca del estudio citado fue mayor, ya que Garcidueñas (1987) reporta una masa de hojarasca de aproximadamente la mitad de lo reportado en este estudio.

Cuadro 27.- Comparación de la masa mineral de la producción de hojarasca reportada para algunas especies gimnospermas.

Especie	N	P	K	Ca	Mg
kg ha⁻¹ año⁻¹					
Imbert et al. (2004)					
<i>Pinus sylvestris</i>	46.3	0.2	8.6	19.7	2.9
<i>Pinus sylvestris</i>	26.1	1.3	9.8	44.9	3.1
<i>Pinus halepensis</i>	28	4.2	5.7	39.5	4.7
<i>Pinus pinaster</i>	8.4	0.8	0.8	11	3.3
<i>Pinus pinaster</i>	14	1.3	7.1	20.6	5
<i>Pinus pinea</i>	14.4	2.2	3.3	14.6	4.7
<i>Pinus radiata</i>	45.7	1.7	12	15.5	3.7
<i>Abies alba</i>	21.9	2.3	15.9	37.3	3.1
Garcidueñas (1987)					
<i>Pinus montezumae</i>	33.9	5.6	16.4	26.9	5.6
Presente estudio					
<i>Pinus montezumae</i>	49.5	2.6	2.2	21.4	8.4

Tal como se mencionó anteriormente, el autor citado reporta una concentración alta de nutrimentos en la biomasa aérea, principalmente en el follaje, que aunque se reabsorbe más del 60% de N y P, las hojas posiblemente al caer al piso forestal conservan aun una alta concentración de nutrimentos.

Las tasas de descomposición de hojarasca registradas en este trabajo se encuentran dentro del rango que registrado para bosques templados (0.14 – 0.69; Landsberg y Gower, 1997). Sin embargo, el tiempo del proceso de descomposición de la hojarasca (tiempo medio de residencia) fue grande. No obstante, Garcidueñas (1987) reporta un tiempo medio de residencia (TMR) de 7 años, esto como resultado de una elevada cantidad de masa en el mantillo siete veces mayor a la producción anual de hojarasca. Por su parte, León *et al.* (2011) registraron un valor de TMR de 1.4 años para *Pinus patula* y una tasa de

descomposición de 0.5, indicando valores de la masa del mantillo dos veces mayor a la hoja producida anualmente. La descomposición lenta de la hojarasca puede estar asociada a las condiciones ambientales del sitio, como temperatura, precipitación y humedad, que influyen sobre la actividad de los microorganismos y en consecuencia sobre la velocidad de descomposición (Imbert *et al.*, 2004; Landsberg y Gower, 1997).

El sitio estudiado por León *et al.* (2011) presenta una precipitación media anual de aproximadamente 2000 mm, el doble de lo reportado por Garcidueñas (1987), y aproximadamente el triple de la de este estudio. Mientras que la temperatura reportada por ambos estudios citados fue de 15 °C, en este estudio se reporta una temperatura media anual de 22 °C. Se ha señalado que la precipitación puede influenciar fuertemente a la descomposición de hojarasca, porque el agua puede arrastrar parte de la materia orgánica al momento de infiltrarse en el suelo forestal, la cual es descompuesta por los microorganismos en los horizontes más profundos (Van der Drift, 1963 citado en Thaiutsa y Granger, 1979). Cabe mencionar que Martínez (2014) evaluó la tasa de descomposición de *Pinus patula* en Hidalgo, y no encontró una relación entre la masa remanente al final y la temperatura promedio del suelo.

Las diferencias en las precipitaciones puede ser una explicación de la diferencia entre las tasas de descomposición en los diferentes sitios. Aunado a los cambios climáticos, la descomposición lenta de la hojarasca puede estar asociada a las relaciones altas de C/N y C/P. Una relación de C/N menor a 25 favorece la descomposición, valores mayores indican baja liberación de nutrientes (Martínez, 2013). Una relación de C/P mayor a 600 indica mala calidad de la hojarasca en descomposición (De las Salas, 1987). Las relaciones de C/P fueron menores a 600, mientras que las tasas de C/N en diferentes momentos de la incubación de las bolsas de descomposición fueron altas indicando bajas tasas de mineralización y por consiguiente menor disponibilidad de N para las plantas. Se ha documentado que los bosques templados mineralizan aproximadamente

el 40% del total de N que entra anualmente por la caída de hojarasca (Dames et al., 2002).

El Mg disminuyó considerablemente en la hojarasca remanente conforme transcurrieron los días, la tasa de liberación de este nutrimento, junto con el Ca, está relacionada con la pérdida de la masa de la hojarasca, ya que forma parte de las estructuras celulares (Rodríguez y Álvarez, 2010). No obstante, a diferencia del Mg, el Ca es un mineral inmóvil y su proceso de transferencia es más lento que el de los minerales móviles, es por ello, que se observó una acumulación de este mineral a través del tiempo.

El remanente de hojarasca presentó una fuerte disminución de K en el tiempo, aproximadamente la mitad de su concentración a los 336 días de la incubación de las bolsas, este nutrimento se libera rápidamente de la hojarasca mediante el proceso de lixiviación por la precipitación (Rodríguez y Álvarez, 2010).

La concentración de P en los remanentes de hojarasca a través del tiempo, fue ligeramente en decremento, lo cual podría deberse a que su liberación en la hojarasca es más lenta que la pérdida de la masa de la hojarasca. Asimismo, la concentración de N presentó ligeros decrementos; sin embargo, a los 336 días se observó una tendencia hacia un incremento en su concentración, este mineral al igual que el P presenta una liberación lenta y puede llegar a acumularse conforme avanza la descomposición (Cornejo *et al.*, 1994 citado por Álvarez-Sánchez, 2001), debido a que los microorganismos importan el P y N de fuentes externas.

Los porcentajes de reabsorción de N, P y K (cuadro 28) que se registraron en este estudio son similares a lo reportado para otras especies de *Pinus* (León *et al.*, 2009; Martín *et al.*, 1996; Pérez et al., 2006), y a lo reportado por Garcidueñas (1987) para la misma especie. Este último, es resultado de la diferencia en las edades de los rodales, Garcidueñas (1987) realizó el estudio en rodales con edades de aproximadamente la mitad que los reportados para este estudio, la retranslocación de N y P en rodales jóvenes son mayores como resultado de los

requerimientos del arbolado en crecimiento y disminuye conforme avanza la edad del rodal.

Tal como lo mencionan León *et al.* (2009), las coníferas son menos dependientes de la reabsorción, aunque es importante observar que la tasa de P es alta, quizás como respuesta de la bajo contenido de este nutriente en el suelo mineral y a su baja transferencia del piso forestal al suelo mineral, la disponibilidad de este elemento depende de la velocidad de mineralización de la hojarasca más que de la magnitud del reservorio en el suelo mineral (Landsberg y Gower, 1997). La alta reabsorción de K puede estar asociado parcialmente al bajo contenido de este elemento en el suelo mineral o bien por algún otro proceso. Martín *et al.* (1996) indica que el bajo contenido de potasio en el suelo mineral no es un factor determinante que influya en la reabsorción del mineral, la lixiviación del K en el follaje puede alterar las mediciones de las tasas de reabsorción.

Cuadro 28.-Comparación de los porcentajes de reabsorción reportadas para algunas especies de *Pinus* y *Quercus*

		N (%)	P (%)	K (%)
Pérez <i>et al.</i> (2006) (<i>Pinus taeda</i>)		40	39	44
Martín <i>et al.</i> (1996) (<i>Quercus pirenaica</i>)		35	36	24
León <i>et al.</i> 2009 (<i>Pinus patula</i>)		37	18.8	77
Garcidueñas (1987) (<i>Pinus montezumae</i>)		32.6	33.3	--
El presente estudio	Rodal I	39	36.4	51
	Rodal II	30	40.9	53

6.3 Pérdidas de nutrientes por la cosecha forestal

La exportación de nutrientes por la cosecha forestal es menor a la reportada para plantaciones de *Pinus taeda* de 20 años de edad, bajo una práctica conservadora: cosecha de fustes con corteza y conservación de residuos (Goya *et al.*, 2003; Martiarena *et al.*, 2009). El porcentaje de la masa mineral que se extrae de la cosecha, con respecto a la que se encuentra en los reservorios de nutrientes (biomasa aérea, piso forestal y suelo mineral) es considerablemente baja y no sobrepasa el 11%, y respecto a la transferencia del dosel al piso forestal, a través de la producción de biomasa no sobrepasa el 50%, esto indica que el reciclaje de nutrientes anual del sistema es mayor al que sale por la cosecha forestal. No obstante, el problema de la conservación de la productividad del bosque radica en la baja mineralización del material orgánico a través de la descomposición, sobre todo en el reciclaje del P.

6.4 Requerimiento anual de nutrientes del arbolado

La masa que acumula anualmente en el arbolado es ligeramente menor a lo reportado por Garcidueñas (1987) para la misma especie; el autor reporta un crecimiento anual en biomasa 1.2 veces mayor, quizás porque el estudio citado, fue realizado en una plantación, donde las prácticas silvícolas son más controladas y se influye en el crecimiento más rápido del árbol.

La cantidad de masa mineral que el arbolado requiere para crecer es menor, aproximadamente, la mitad de lo que se produce anualmente por la hojarasca, sugiriendo que el sistema se encuentra en equilibrio, las cantidades de nutrimentos que el arbolado absorbe del suelo mineral es menor al que el arbolado regresa al piso forestal. No obstante, la tasa de mineralización de la hojarasca es baja y el problema de la circulación de nutrientes en el ecosistema radica en la velocidad en que estos minerales circulan del piso al suelo mineral, aproximadamente 3.5 años tarda para que la hojarasca se descomponga completamente, lo cual puede acelerarse a través de algunas prácticas de acondicionamiento del sitio.

6.5 Sustentabilidad del bosque bajo manejo

Tal como lo mencionan Rodríguez y Álvarez (2010) es esencial entender los procesos que regulan la entrada de nutrientes, la transformación dentro del suelo y en la vegetación y la pérdida de nutrientes, si los sistemas forestales van a ser manejados bajo una base sustentable. Patzek y Pimentel (2005), indican que ningún sistema podría perdurar por mucho tiempo, ya que dichos sistemas están sujetos al cambio. No obstante, podría considerarse un sistema sustentable si perdura al menos el tiempo del desarrollo industrial del hombre, es decir, un periodo de 160 años. De acuerdo a los resultados obtenidos, el bosque bajo las condiciones actuales de aprovechamiento podría considerarse como sustentable, ya que los nutrientes evaluados podrían mantener el crecimiento de la vegetación por más de 250 años, tiempo superior al indicado por Patzek y Pimentel (2005).

Sin embargo, el fósforo y nitrógeno resultan ser los minerales más limitantes en el ecosistema. El capital de P mantendría el crecimiento de la vegetación por un periodo menor de años (256 años) y la reserva de N por un periodo aproximado a 350 años. Lo anterior se debe que a pesar que en el suelo mineral las reservas de N total son muy elevadas, se estima que sólo el 50% conforman los reservorios lábiles y de mediano plazo que potencialmente podrían aprovechar las plantas (Schlesinger y Bernhardt, 2013). Las cantidades de P que regresa al suelo por medio de la hojarasca y el del suelo mineral son bajas comparadas con los otros nutrientes. Por lo tanto, es importante considerar el efecto de la cosecha sobre el ciclo del P y N. Cabe mencionar que en el escenario anterior se asume que las condiciones ambientales del bosque y los métodos de aprovechamiento no cambian en el tiempo. Por lo anterior, cualquier cambio que no se haya considerado como reposición de nutrientes con fertilización, depósito húmedo y seco en exceso, degradación del bosque o incremento en la intensidad de corta, modificarían los tiempos estimados.

7. CONCLUSIONES

La producción de biomasa aérea varió entre 120.5 y 133.4 Mg ha⁻¹, en el fuste se encuentra el 89.5%, en las ramas el 7.5% y en el follaje 3%. Las ramas y follaje acumulan cantidades importantes de nutrientes, principalmente de P y K, por tanto, debe considerarse su permanencia en el bosque después de la cosecha forestal.

La biomasa del mantillo varió entre 22.2 y 21.5 Mg ha⁻¹, respecto al suelo mineral a una profundidad de 40 cm, corresponde a 3.7, 59.2, 1.7, 2.2 y 5.3 % para N, P, K, Ca y Mg respectivamente.

Las propiedades físicas y químicas del suelo mineral están lejos de presentar alteraciones importantes por las prácticas de manejo. Los dos primeros horizontes representan una buena proporción de la masa mineral presente en el perfil (entre 28 y 30%). El P resulta ser el elemento menos abundante en el suelo mineral.

La producción de hojarasca anual fue de 6.3 Mg ha⁻¹ año⁻¹, la mayor producción coincidió con los niveles de precipitación más bajos. Las mayores concentraciones de nutrientes se presentaron en invierno y primavera y las más bajas en verano.

Las tasas de descomposición fueron de 0.29 y 0.32, el tiempo que tarda la hojarasca en completar el proceso de descomposición es de 3.4 a 3.5 años. Las relaciones C:N y C:P fueron elevadas indicando baja liberación de nutrientes al suelo mineral, por tanto, la descomposición de hojarasca es una de las principales limitantes en la recirculación de nutrientes en el sistema.

Las tasas de reabsorción de N y P fueron menores al 40% lo que indica que el suelo mineral sustenta las demandas anuales de N y P del arbolado.

La biomasa extraída anualmente por la cosecha forestal equivale entre 4.29 y 5.17 Mg ha⁻¹ y representa entre 2 y 3 % de la masa mineral aérea total. La mayor cantidad de P es exportado por el follaje. La masa mineral extraída es mucho

menor comparado con los reservorios del suelo mineral y se repone mediante la producción del follaje, sin embargo, el problema radica en la transferencia del piso forestal al suelo mineral. Es importante considerar la permanencia del follaje de la cosecha en el bosque para permitir el reciclaje de P.

Los árboles crecen anualmente entre 5.3 y 4.8 Mg ha⁻¹ y requieren entre 9.7 y 8.7 Kg de N, entre 0.5 y 0.4 Kg de P, entre 1.1 y 1.0 Kg de K, entre 6.7 y 6.0 Kg de Ca y entre 4.7 y 4.2 Kg de Mg. Aunque el follaje es de menor biomasa acumula grandes cantidades de nutrientes. La masa mineral requerida por el arbolado es menor a la masa mineral producida por la caída de hojarasca.

El suelo mineral resulta ser el principal reservorio de nutrientes en los rodales de *Pinus montezumae* en el ejido de Nancamilpa, Tlaxcala. Estos bosques mantienen un equilibrio entre los requerimientos del ecosistema y el regreso de nutrientes al piso forestal, la masa nutrimental que entra anualmente a través de la caída de hojarasca es mayor al requerido por la masa arbórea. Sin embargo, la lenta mineralización de nutrientes del piso forestal al suelo mineral resulta ser la principal limitante de la recirculación de nutrientes en el sistema. La pérdida de la masa mineral de la cosecha forestal no pone en riesgo la disminución de los reservorios de nutrientes a corto plazo, el manejo actual de aprovechamiento que realiza el ejido no compromete la permanencia de estos bosques, los cuales podrían ser considerados como sustentable. No obstante, es importante considerar los efectos de la cosecha sobre el ciclo del N y P.

Este tipo de estudios son importantes para conocer el tamaño de los reservorios de nutrientes, cómo se transfieren esos nutrientes dentro de los reservorios del bosque manejado y la cantidad de nutrientes que están exportándose por la cosecha forestal. Ayuda a estimar si los reservorios y flujos de nutrientes pueden sostener el crecimiento del arbolado y su aprovechamiento a largo plazo. Asimismo, permiten implementar prácticas silvícolas más adecuadas que

aseguren la permanencia del bosque por más tiempo. Información básica escasa para muchos bosques de México.

8. LITERATURA CITADA

- Aguilar, J. G. and A. I. Arrau. 1995. Impacto del manejo de plantaciones sobre el ambiente físico. *Bosque (Valdivia)* 16: 3-12.
- Álvarez, J. 2001. Descomposición y ciclo de nutrientes, en ecosistemas terrestres de México. *Acta Zoológica Mexicana (nueva serie) Núm. Es-1*: 11-27.
- Correa, J. A. R., C. M. Z. Duque, J. D. L. Peláez and M. I. G. Hernández. 2007. Caída de hojarasca y retorno de nutrientes en bosques montanos andinos de Piedras Blancas, Antioquia, Colombia. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* 32: 303-311.
- De las Salas, G. 1987. Suelos y ecosistemas forestales: con énfasis en América Tropical. IICA.
- FAO, F. 1988. UNESCO soil map of the world, revised legend. *World Resources Report* 60: 138.
- Fife, D., E. Nambiar and E. Saur. 2008. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree physiology* 28: 187-196.
- Fox, T. R. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138: 187-202.
- García, A. M. 2008. Extracción de biomasa en los suelos forestales, principales variables a tener en cuenta para evitar la degradación del suelo. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*.
- Garcidueñas Martínez, A. R., R. Keyes, M. M. Michael, R. Mario, Z. Lara, P. Guillermo, C. M. Colegio de Postgraduados and P. Forestal. 1987. Producción de biomasa y acumulación de nutrientes en un rodal de *Pinus montezumae* Lamb. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados, Montecillos, México.
- Gomez, A., R. Powers, M. Singer and W. Horwath. 2002a. Soil compaction effects on growth of young ponderosa pine following litter removal in California's Sierra Nevada. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1334-1343.

- Gomez, A. G., R. F. Powers, M. J. Singer and W. R. Horwath. 2002b. N uptake and N status in ponderosa pine as affected by soil compaction and forest floor removal. *Plant and Soil* 242: 263-275.
- Goya J.F., C.Pérez, J. Frangi and R. Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13: 139-150.
- Grigal, D. F. 2000. Effects of extensive forest management on soil productivity. *Forest Ecology and Management* 138: 167-185.
- Hopmans, P., H. Stewart and D. Flinn. 1993. Impacts of harvesting on nutrients in a eucalypt ecosystem in southeastern Australia. *Forest Ecology and Management* 59: 29-51.
- INEGI. 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Nanacamilpa de Mariano Arista, Tlaxcala. En línea: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/datos-geograficos/29/29021.pdf>. (Febrero de 2012).
- Imbert, J. B., J. A. Blanco and F. J. Castillo. 2004. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*: 479-508.
- Landsberg, J. J. and S. T. Gower. 1997. Applications of physiological ecology to forest management. Academic Press.
- León, J. D., M. I. González and J. F. Gallardo. 2011. Ciclos biogeoquímicos en bosques naturales y plantaciones de coníferas en ecosistemas de alta montaña de Colombia. *Revista Biología Tropical* 59: 1883-1894.
- León Peláez, J. D., M. I. González Hernández and J. F. Gallardo. 2009. Retranslocación y eficiencia en el uso de nutrientes en bosques del centro de Antioquia.
- Luna, J. A. N. and E. H. Hernández. 2009. Acumulación de biomasa aérea en un bosque coetáneo de la región de El Salto, Durango. *Ra Ximhai* 5: 225-230.

- Martiarena, R., A. Von Wallis and O. Knebel. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina. *Revista Forestal Venezolana* 53: 165-173.
- Martín, A., I. Santa Regina and J. F. Gallardo. 1996. Eficiencia, retraslocación y balance de nutrientes en bosques de *Quercus pyrenaica* bajo diferente pluviometría en la Sierra de Gata (Centro-Oeste Español). *Ecología* 10: 79-93.
- Martínez Atencia, J. D. C. Producción y descomposición de hojarasca en sistemas silvopastoriles de estratos múltiples y su efecto sobre propiedades bioorgánicas del suelo en el valle medio del Río Sinú. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- Martínez Castillo, B. E. 2014. Descomposición de la fracción foliar de *Pinus patula* Schltdl. & Cham. y dinámica de la producción de hojarasca en un bosque manejado, en el estado de Hidalgo.
- Merino, A., C. Rey, J. Brañas and R. Rodríguez-Soalleiro. 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For* 12: 85-98.
- Patzek, T. W. and D. Pimentel. 2005. Thermodynamics of energy production from biomass. *BPTS* 24: 327-364.
- Pérez, C. A., J. F. Goya, F. Bianchini, J. L. Frangi and R. Fernández. 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia: Revista de ciencia y tecnología de América* 31: 794-801.
- Powers, R. F. 1999. On the sustainable productivity of planted forests. *Planted Forests: Contributions to the Quest for Sustainable Societies*. Springer. pp. 263-306.
- Quintero Sánchez, A., D. Rodríguez Trejo, E. Guízar Nolasco and R. Bonilla Beas. 2008. Propagación vegetativa de la vara de perlilla (*Symphoricarpos microphyllus* HBK). *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 14: 21-26.

- Rodríguez J y M. Álvarez. 2010. Nutrición y fertilización de plantaciones forestales. José Rodríguez S. Santiago de Chile. 521 p.
- Rodríguez-Juárez, M. I., A. Velázquez-Martínez, A. Gómez-Guerrero, A. Aldrete and M. Domínguez-Domínguez. 2014. Fertilización con boro en plantaciones de *Eucalyptus urophylla* ST Blake en Tabasco. *Revista Chapingo. Serie ciencias forestales y del ambiente* 20: 203-213.
- Rodríguez-Martínez, L., J. Vázquez and A. Bautista. 2007. Primer registro del gato montés (*Lynx rufus*) en el Parque Nacional La Malinche, Tlaxcala, México. *REVISTA MEXICANA DE MASTOZOLOGÍA (Nueva Época)* 11: 80-84.
- Schlesinger, W. H. and E. S. Bernhardt. 2013. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. 3rd ed. Academic Press. San Diego, California. 672 p.
- Silva, L. C., A. Gomez-Guerrero, T. A. Doane and W. R. Horwath. 2015. Isotopic and nutritional evidence for species-and site-specific responses to N deposition and elevated CO₂ in temperate forests. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH-BIOGEOSCIENCES* 120: 1110-1123.
- Thaiutsa, B. and O. Granger. 1979. El clima y la descomposición de la hojarasca en el bosque tropical. *Unasyuva* 31: 121-129.