

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE MISIONES
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES**

**CUANTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE
FÓSFORO EXPORTADO EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda*
CONDUcido CON DIFERENTES INTENSIDADES DE RALEO
Y ALTERNATIVOS SISTEMAS DE COSECHA**

Rodolfo Andrés Martiarena

Tesis presentada a la Universidad Nacional de Misiones
como exigencia parcial de la Maestría en Ciencias Forestales,
Orientación Silvicultura y Manejo Forestal.

Director

Dr. Jorge Frangi

Co directores

Ing. Ms. Roberto Fernández

Ing. Ms. Martín Pinazo

2008

Dedico esta tesis

A mi hijo Nahuel

AGRADECIMIENTOS

Al señor Otto Knebel por la colaboración en todo el proceso de los trabajos de campo y laboratorio. A los Ingenieros Forestales Martín Pinazo y Alejandra Von Wallis por la colaboración en los trabajos de campo, laboratorio y gabinete. A los Ingenieros Forestales Aldo Keller, Roxana Ferruchi, Norberto Pahr, Lucía Romero y Doris Bischoff por colaborar en los trabajos de campo. Al señor Juan Keller por su colaboración en los trabajos de campo. A la Estación Experimental Montecarlo del INTA por facilitar personal, vehículo, infraestructura y cubrir los costos de análisis de muestras. A la Empresa Lipsia SA que facilitó el sitio donde realizar los trabajos y puso a disposición durante todo el período que duró el trabajo un motosierrista especializado. Al Ingeniero Forestal Héctor Keller por el reconocimiento de especies vegetales. Al Ingeniero Forestal Ernesto Crechi por facilitar los datos históricos de la plantación.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó en un predio de la empresa Lipsia SA en el norte de la provincia de Misiones y evalúa el contenido de fósforo (P) en el sistema forestal de una plantación de *Pinus taeda* de 20 años de edad, manejada con 3 intensidades de raleo a lo largo del turno de rotación. Las intensidades de raleo fueron aplicadas a los 8, 12 y 16 años de edad con 0% (Testigo), 33% y 66% de raleo del área basal remanente y tala rasa a los 20 años. A los efectos comparativos los cálculos de exportación de P por cosecha fueron realizados simulando la extracción de fuste entero (FE) y árbol entero (AE). Los trabajos se efectuaron previos a la tala rasa del rodal y se muestrearon los compartimentos arbóreos, sotobosque arbustivo y herbáceo, piso forestal y suelo. El contenido de P en el tratamiento testigo totalizó 56,8 Kg.ha⁻¹ distribuidos con 70,6; 0,3; 3,0; 14,1 y 12% respectivamente en el estrato arbóreo, sotobosque arbustivo, sotobosque herbáceo, piso forestal y suelo. En el mismo orden y totalizando 38,6 Kg.ha⁻¹ en el tratamiento 66% de raleo se distribuyó con 54,9; 11,8; 4,5; 14 y 14,8%. El total de P exportado por cosecha al final del turno se diferenció significativamente entre tratamientos con menor impacto negativo para el sitio del tratamiento 66% de raleo. El índice de estabilidad de P en las plantaciones forestales mostró que la variante mas conservadora se da con la cosecha de FE, con el tratamiento 66% de raleo y cuando se consideran como parte del suelo al piso forestal y los residuos de cosecha, lo cuál manifiesta la importancia de conservación de los mismos con posterioridad a la cosecha.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE FIGURAS	x
1. INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivos	5
Hipótesis.....	5
Predicciones	6
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	7
Caracterización del sitio.....	7
Caracterización del rodal.....	7
Muestreo del estrato arbóreo. Selección de los árboles.....	10
Compartimentos arbóreos. Definición	10
Determinación de la biomasa y contenido de P en los individuos arbóreos.....	11
Determinación de la biomasa arbórea y contenido de P de las plantaciones.....	12
Determinación de la biomasa extraída durante la cosecha final y los raleos.....	13
Determinación de la biomasa y contenido de P del sotobosque	13
Estrato arbustivo.....	15
Estrato herbáceo.....	15
Determinación de la necromasa y contenido de P del piso forestal	15
Determinación de P en muestras vegetales	16
Muestreo del suelo y determinación del contenido de P	17
Cálculo de índices	18
Cálculos estadísticos	19
3. DESARROLLO.....	20
RESULTADOS.....	20
Estrato arbóreo	20
Densidad de la madera	20
Ecuaciones de biomasa y necromasa arbórea por individuo	20
Biomasa aérea a nivel de árbol individual en función del raleo	21
Distribución relativa de la biomasa en los individuos arbóreos en relación al raleo	23
Concentración de P en individuos arbóreos en relación al raleo	24
Contenido de P de individuos arbóreos en relación al raleo.....	24
Contenido relativo de P de individuos arbóreos en relación al raleo.....	25
Ecuaciones de mineralomasa arbórea por individuo	26

Biomasa aérea a nivel de rodal en función del raleo	27
Distribución porcentual de la biomasa aérea a nivel de rodal en relación al raleo.....	29
Contenido de P en la biomasa arbórea a nivel de rodal en relación al raleo	30
Sotobosque	32
Biomasa del estrato arbustivo	32
Concentración de P en el sotobosque arbustivo	33
Contenido de P en el estrato arbustivo	33
Biomasa y concentración de P del estrato herbáceo.....	34
Contenido de P en el estrato herbáceo.....	35
Piso Forestal	35
Contenido de Necromasa	35
Concentración de P	36
Contenido de P	38
Suelo	39
Densidad aparente	41
Concentración de P en el suelo	41
Contenido de P en el suelo	42
Contenido total de P en el sistema.....	43
Estimación de la exportación de P	44
Exportación por cosecha final	44
Exportación por raleos	44
Exportación total en dos escenarios de cosecha	45
Efecto de las pérdidas de P debido a distintas intensidades de raleo sobre el contenido y la estabilidad del P en las plantaciones de Pinus taeda.....	46
Índice de exportación de P (IEP).....	46
Costo nutritivo de cosecha	46
Índice de estabilidad del P en las plantaciones forestales a corta final.....	47
Índice de P remanente para la rotación de la misma especie.....	48
DISCUSIÓN	50
Biomasa arbórea a nivel de árbol individual	50
Biomasa arbórea a nivel de rodal	52
Concentración de P en la biomasa aérea de Pinus taeda	54
Contenido de P en la biomasa arbórea aérea.....	55
Exportación de P del sitio.....	57
Biomasa y contenido de P en el sotobosque.....	58
Necromasa y contenido de P en el piso forestal	59
Densidad aparente y contenido de P en el suelo.....	62
Efecto de las prácticas sobre contenido de P en el sitio	63
CONCLUSIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTA DE TABLAS

CONTENIDO

Tabla 2.1: Variación de los parámetros dasométricos en cada uno de los raleos (T1 y T2) y testigo (T0) efectuados a lo largo del ciclo de rotación de <i>Pinus taeda</i> en el Norte de Misiones.....	9
Tabla 3.1: Parámetros de las ecuaciones de biomasa ($\ln B = a + b * \ln DAP$; DAP en cm) de cada uno de los compartimentos y la biomasa aérea en <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad (n=45) manejado bajo diferentes intensidades de raleo.....	20
Tabla 3.2: Concentración promedio de P (mg.g^{-1}) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimientos arbóreos de los árboles de clase diamétrica mas frecuente en relación al raleo.....	24
Tabla 3.3: Concentración promedio de P (mg.g^{-1}) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimientos arbóreos de los árboles de clase diamétrica más frecuente para todos los tratamientos.....	24
Tabla 3.4: Contenido promedio de P (g/compartimiento) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimientos arbóreos del árbol individual en relación al raleo.....	25
Tabla 3.5: Parámetros de las ecuaciones del contenido de P de cada uno de los compartimentos a nivel de árbol individual (n=45) de <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad, en plantaciones testigo y raleadas.....	27
Tabla 3.6: Contenido promedio de P (kg.ha^{-1}) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimientos arbóreos del rodal en relación al raleo, estimado por ambos métodos.....	30

Tabla 3.7: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) en el compartimento piso forestal en relación al raleo de <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad.....	37
Tabla 3.8: Densidad aparente del suelo ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.....	41
Tabla 3.9: Concentración promedio de P (ppm) y desvío estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.....	41
Tabla 3.10: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.....	42
Tabla 3.11: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y participación porcentual del compartimiento en el total del sistema (entre paréntesis), en relación a las intensidades de raleo.....	43
Tabla 3.12: Contenido de P exportado y remanente ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el sistema luego de la cosecha final bajo las modalidades de fuste entero (FE) y árbol entero (AE) en relación a la intensidad de raleo.....	44
Tabla 3.13: Volumen y peso seco de madera extraídos por raleo a los 8, 12 y 16 años en cada uno de los tratamientos de raleo.....	44
Tabla 3.14: Fósforo exportado en cada una de las intervenciones en cada uno de los tratamientos de intensidad de raleo de <i>Pinus taeda</i>	45
Tabla 3.15: Contenido total de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) extraído del sistema en cada uno de los tratamientos de raleo a lo largo del turno de rotación, considerando el escenario de fuste entero (FE) y árbol entero (AE) en corta final.....	45

Tabla 3.16: Índice de exportación de P para <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad en dos escenarios de cosecha (fuste entero y árbol entero). Incluye raleos y corta final.....	46
Tabla 3.17: Costo nutritivo en P para el <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (fuste entero y árbol entero). Incluye raleos y corta final.....	47
Tabla 3.18: Índice de estabilidad (IE) del P para <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (FE y AE), considerando las variantes 1 y 4.....	48
Tabla 3.19: Índice de P remanente (IPR) para la rotación de la misma especie en la plantación de <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (FE y AE), incluido los raleos, en los diferentes tratamientos.....	49

LISTA DE FIGURAS

CONTENIDO

Figura 2.1: Esquema general de las parcelas de muestreo de los diferentes estratos. a) Croquis del ensayo de raleo instalado en el año 1993, b) cada una de las parcelas del croquis antes mencionado con las 10 parcelas de muestreo de los estratos inferiores y piso y, c) parcela de muestreo del estrato arbustivo, estrato herbáceo y piso forestal	14
Figura 3.1: Peso seco de los compartimientos arbóreos a nivel de árbol individual en relación al raleo.....	22
Figura 3.2: Distribución porcentual de la biomasa y necromasa en pie a nivel de árbol individual del <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad bajo diferentes tratamientos de raleo.....	23
Figura 3.3: Distribución porcentual del contenido de P a nivel de árbol individual del <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad en relación a la intensidad de raleo.....	26
Figura 3.4: Peso seco de los compartimientos arbóreos a nivel rodal en relación al raleo.....	28
Figura 3.5: Distribución porcentual de la biomasa en el rodal del <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad bajo diferentes tratamientos de raleo.....	29
Figura 3.6: Biomasa de los compartimientos hojas y material leñoso del sotobosque arbustivo en función de la intensidad de raleo.....	32
Figura 3.7: Contenido de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el estrato arbustivo en relación al raleo.....	34

Figura 3.8: Peso seco de la biomasa ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y concentración de P ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) del sotobosque herbáceo.....	34
Figura 3.9: Contenido de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el estrato herbáceo en relación al raleo.....	35
Figura 3.10: Contenido de necromasa del piso forestal en relación al tratamiento de raleo.....	36
Figura 3.11: Concentración de P ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$) en los subcompartimientos del piso forestal en los diferentes tratamientos de raleo.....	37
Figura 3.12: Contenido de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el compartimento piso forestal en los diferentes tratamientos de raleo de <i>Pinus taeda</i> de 20 años de edad.....	38

1. INTRODUCCIÓN

Según datos del inventario forestal nacional la República Argentina posee 642.395 ha de bosques de cultivo, de las cuáles el 30,5% se halla en la provincia de Misiones (SAGPyA, 2001[1]), ocupando el género *Pinus* en esta provincia el 92% del total plantado.

Pinus taeda es la especie de mayor importancia forestal en la provincia y el país, de aquí el interés en profundizar el conocimiento biológico, ecológico y silvicultural local en especies de este género. En ese sentido, y con la finalidad de mejorar la producción de esta especie, en la región se han efectuado numerosas contribuciones científicas en líneas como conducción y manejo forestal (Fassola et al., 2002b [2]; Crechi et al., 2004) [3], sistemas silvopastoriles (Fassola et al., 2002a [4]), mejoramiento genético (Gauchat et al., 2003 [5]), protección forestal (Eskiviski et al., 2004 [6]), preparación del terreno y manejo de residuos (Lupi et al., 2004 [7]), e impacto de las diferentes prácticas forestales sobre el crecimiento de *Pinus taeda* (Fernández et al., 2002 [8]). Sin embargo, existe un único trabajo acerca de la acumulación de biomasa y ciclado de nutrientes en esta especie (Goya et al., 2003 [9]) en el cuál analizan la biomasa y mineralomasa en una plantación de *Pinus taeda* al final del turno de rotación.

El manejo silvícola con fines de producción de madera implica una mayor movilidad de los nutrientes y su salida del sistema con las cosechas. El mencionado estudio realizado por Goya et al. (2003) [9] indican que las estimaciones de exportación de nutrientes por cosecha generan valores de índice de estabilidad de plantaciones que predicen que la disponibilidad de fósforo manifestaría déficit luego de 1,2 rotaciones, elemento éste que según varios investigadores es de baja disponibilidad natural en los suelos de la región (Vázquez y Galmarini, 1985 [10]; Pettri y Acuña, 1993 [11]; Pettri et al., 1996 [12]; Vázquez y Morales, 2000 [13]). Éste mismo elemento junto con el potasio fueron identificados cómo de baja estabilidad nutritiva en los suelos rojos profundos de Misiones y NE de Corrientes (Fernández et al., 1999a [14]; Pahr et al., 2000 [15]). A estos estudios se le suma un indicador como la respuesta a la fertilización con fósforo. Si bien una respuesta de

crecimiento positiva ante el agregado de fósforo no siempre indica carencia de dicho nutriente en el suelo, ello fue detectado para ésta región en las principales especies forestales como *Eucaliptus grandis* (Lupi et al., 2000 [16]), *Paulownia* spp. (Fernández et al., 1997[17]), *Pinus* spp. (Fernández et al., 1999b [18]), *Pinus taeda* (Fernández et al., 2000a [19]; Aparicio et al., 1999 [20]) y *Araucaria angustifolia* (Martiarena et al.2002a [21] y Martiarena et al.2002b [22]).

Una de las claves de la producción constante del sitio a través del tiempo es el mantenimiento o mejoramiento de la fertilidad del suelo, para ello, se debe estudiar y conservar los nutrientes presentes en el sistema. La pérdida de nutrientes varía con las prácticas de manejo y puede tener un efecto dramático en el crecimiento de las rotaciones siguientes (Tiarks et al., 1998 [23]).

Los pinos se adaptan a suelos infértiles, en parte porque requieren menores cantidades de nutrientes respecto de otras plantas y por otra debido a sus mecanismos para minimizar pérdidas de nutrientes del sistema (Jorgensen y Wells, 1986 [24]). Las técnicas de manejo en cada etapa de cultivo y luego de la tala rasa, deben propender a mantener el nivel de nutrientes adecuado, sea cual sea el cultivo, y ello incluye poner énfasis en la minimización de pérdidas.

Tres etapas fundamentales comprenden el ciclo de los nutrientes: entrada, circulación en el interior del ecosistema y salida. Las entradas básicamente comprenden las precipitaciones, la meteorización de la roca madre, fijación biológica a partir de la atmósfera en el caso del N y aportes por fertilización. La circulación en el interior del ecosistema se da por el movimiento de los nutrientes entre la biomasa, la necromasa y el suelo, mientras que las pérdidas se centran básicamente en volatilización, lixiviación y la extracción en cosechas (Binkley, 1993 [25]; Miller, 1984 [26]).

Este trabajo se centra en la cuantificación del contenido de fósforo de los componentes del sistema y las pérdidas de este elemento generadas en los raleos y la cosecha. Al fósforo se lo encuentra tanto en materiales orgánicos como inorgánicos, pero su disponibilidad en el suelo se ve afectada, dado que al ser suelos de regiones

tropicales poseen alta capacidad de fijación, formación de compuestos insolubles (fosfatos de hierro, fosfatos ocluidos) y relativamente elevada capacidad buffer, por ello poseen baja concentración de P extractable (Piccolo, 2002 [27]).

El estudio de la circulación de nutrientes en los árboles tiene una historia que se remonta al siglo XIX. Según Pritchett (1986 [28]), Ebermayer en 1876 fue capaz de demostrar que los árboles no solamente absorben nutrientes de los suelos, sino que anualmente devuelven nutrientes a aquel con la caída de detritos orgánicos (*litter-fall*) que pasan a formar parte del mantillo grueso (detritos leñosos gruesos - *coarse woody debris*- como ramas y troncos caídos) y fino (*fine debris*, constituido por hojas -*leaf-litter*-, flores y frutos, fracciones leñosas finas, etc.). Los restos acumulados en el piso forestal son una importante fuente de nutrientes y materia orgánica en las plantaciones y tiene un fuerte impacto en el ciclo de los nutrientes, especialmente en forestaciones de rotación corta (Tiarks et al., 1998 [23]).

Determinar la acumulación de los nutrientes es un arte impreciso y la medición del contenido de nutrientes y el flujo de los mismos requiere un gran número de suposiciones, aproximaciones y simplificaciones, pero básicamente hay 5 pasos para la determinación (Pritchett 1986 [28]):

1. Establecer un grupo de parcelas representativas
2. Determinar la biomasa por componente
3. Tomar muestras representativas de cada tipo de tejido y analizarlas para determinar su concentración de nutrientes
4. Multiplicar la biomasa medida por la concentración obtenida para determinar el contenido de la parcela
5. Obtener los promedios de las parcelas y extrapolar a una superficie de referencia.

La extracción de fósforo por la cosecha aumenta el riesgo de carencia de dicho elemento en el sistema, siendo el manejo de la densidad una alternativa para minimizar esta pérdida, ya que el raleo tiene potencial influencia en el suministro de nutrientes para los árboles remanentes, debido a que: (1) Incrementa la

disponibilidad de nutrientes por individuo porque disminuye el número de árboles por unidad de área, (2) Cambia el ritmo de mineralización e influencia en la actividad microbiana como consecuencia de la alteración de la humedad y temperatura, (3) Incrementa el almacenaje de nutrientes mineralizables por el aporte de residuos al suelo, (4) Incrementa la inmovilización de nutrientes durante la descomposición, por la alta relación de C:Nutrientes en los residuos frescos, y (5) Incrementa la pérdida por lixiviación (Carlyle 1995 [29]). Una combinación de estos interactúa simultáneamente para influenciar la disponibilidad de nutrientes en suelos de áreas raleadas. Se puede proponer que la alteración de la disponibilidad de nutrientes depende también de la intensidad del raleo.

El Noroeste de la provincia de Misiones es la principal zona de plantaciones de pino. Allí, debido a la cercanía existente entre los sitios plantados y las fábricas papeleras, parte de la biomasa raleada (el fuste y la corteza), constituye la materia prima aprovechada por las empresas celulósicas, mientras que los restos de ramas, hojas y frutos son dejados sobre la superficie del terreno, devolviendo al sitio parte de los nutrientes extraídos por la plantación.

El raleo tiene efecto sobre la densidad de plantación, siendo esta quien regula la disponibilidad y uso de la luz, nutrientes y agua (Burkes et al. 2003 [30]), por ello hay diferencias en las proporciones de materia seca de los distintos compartimentos vegetales, entre plantaciones de distinta densidad.

La cobertura arbórea, dependiente entre otros factores de la densidad del rodal (Fassola et al., 2005 [31]), afecta la biomasa de los estratos inferiores y su mineralomasa de P, ya que los porcentajes de sombra observados debajo del dosel cambian de 37% cuando la densidad es de 137 plantas por hectárea a 97% cuando la densidad asciende a 1311 plantas en la misma superficie (Fassola et al., 2005 [31]).

La vegetación del sotobosque está conformada por helechos, gramíneas y pequeñas dicotiledóneas en general. Esta vegetación representa una pequeña proporción de la biomasa total de la plantación y es dependiente del área basal de

ésta (Herrera et al., 2001 [32]), pero no debe despreciarse ya que actúa como reservorio de nutrientes en el sistema.

La superficie forestada en nuestro país crece (SAGPyA, 2001 [1]) y muchos de los sitios están soportando la segunda rotación, habiéndose plantado los mismos sin aplicación de fertilizante y utilizando material genético de alto valor. El empleo de materiales genéticamente mejores conduce al acortamiento del ciclo de rotación, con lo cuál hay una mayor extracción de nutrientes en un plazo más corto. Esto se genera porque se extraen árboles más jóvenes, con mayor concentración de nutrientes en los compartimentos de menor tamaño y con una mayor proporción de éstos en la biomasa tal como lo muestra la mayor relación copa/fuste. Las pérdidas de nutrientes dependerán así de la duración del ciclo de rotación, y del tipo de cosecha y tratamiento de los residuos. A partir de estos conceptos la búsqueda permanente para minimizar la extracción de nutrientes del sistema será la obligación de todos los técnicos forestales, por ello los objetivos planteados en la presente tesis de maestría son los siguientes:

Objetivos

Determinar como influyen las distintas intensidades de raleo efectuadas en un rodal de igual densidad inicial sobre el contenido total de fósforo en el sistema al final del turno de corta de *Pinus taeda* de 20 años de edad.

Evaluar la exportación de fósforo bajo diferentes sistemas de cosecha para cada una de las intensidades de raleo.

Hipótesis

Las diferentes intensidades de raleo generan diferencias en los contenidos de fósforo en el conjunto de compartimentos del sistema, entendiéndose como tal, el suelo, piso forestal, sotobosque herbáceo, sotobosque arbustivo y estrato arbóreo.

Predicciones

Una baja o nula intensidad de raleo a lo largo del turno de rotación deja un alto número de árboles de pequeño diámetro que da como resultado menor contenido de biomasa en el árbol individual y mayor contenido de biomasa a nivel de rodal. La cosecha del rodal raleado a baja intensidad impactará al sitio más fuertemente con respecto a la cantidad de fósforo exportado.

El sotobosque arbustivo es favorecido por la apertura del dosel dado el ingreso de luz, con lo cuál incrementa la biomasa sobre el terreno y por ende el contenido de fósforo cuando esto sucede. El crecimiento de este compartimento se reduce a un mínimo cuando las copas de los árboles llegan a su máxima cobertura.

El contenido de fósforo en el sotobosque herbáceo no varía significativamente con el manejo de la densidad arbórea, ya que su biomasa y concentración de fósforo no se incrementan ante la apertura del dosel que permite el crecimiento de la biomasa del estrato arbustivo que compite con el anterior por la luz adicional.

En la plantación de 20 años de edad de *Pinus taeda* manejada con diferentes intensidades de raleo a lo largo del turno de rotación, el contenido de fósforo del piso forestal no se ve afectado por la intensidad de raleo.

El contenido de fósforo disponible en el suelo no se ve afectado por las diferentes intensidades de raleo aplicadas a lo largo del turno de rotación de la plantación debido a que las pérdidas de P disponible en cada uno de los tratamientos, si bien no son iguales, son compensadas por las ganancias.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del sitio

El ensayo se encuentra ubicado en un predio de la Empresa LIPSIA SA denominado Campo Elena, cercano a la localidad de Wanda, Departamento Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. Geográficamente se ubica a los 25° 59' S y 54° 24' O.

El suelo se clasifica como “Kandiudult”, según Soil Survey Staff (1975) [33]. Se caracteriza por un desarrollo en profundidad mayor a los 2 m con secuencia de horizontes y capas A-Bt-C, rojo, libre de pedregosidad y fragmentos gruesos, permeabilidad moderada, bien drenado y relativamente insaturado.

El clima de la región se caracteriza por una temperatura media anual de 21 °C y precipitaciones de alrededor de 2000 mm anuales, con régimen isohigro (INTA, 1990 [34]).

Caracterización del rodal

La plantación fue realizada por la empresa en el año 1985 con *Pinus taeda* de origen geográfico Marion, con una densidad inicial de 1644 pl.ha⁻¹. En 1991 se efectuó un raleo que dejó al rodal con 894 pl.ha⁻¹ y 19,3 m².ha⁻¹ de área basal.

En el año 1993 se realizó en dicho rodal un ensayo de intensidad de raleo mediante un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones. Se aplicaron 3 tratamientos, con las siguientes intensidades: Testigo (0%), Intensidad de raleo intermedia (33%) e Intensidad de raleo fuerte (66%) del área basal del testigo.

A partir de allí se aplicó el mismo tratamiento de raleo cada 4 años efectuándose a los 8 (1993), 12 (1997) y 16 (2001) años de edad. El tamaño de cada una de las 9 parcelas realizadas fue de 806 m², donde el raleo en cada una de sus

intervenciones se efectuó por lo bajo, cuyo sotobosque fue eliminado parcialmente en cada una de ellas. En la Tabla 2.1 se muestra la evolución del rodal a lo largo del período de rotación en cada uno de los tratamientos de raleo.

TABLA 2.1: Variación de los parámetros dasométricos en cada uno de los raleos (T1 y T2) y testigo (T0) efectuados a lo largo del ciclo de rotación del *Pinus taeda* en el Norte de Misiones.

Edad (años) Antes/Después raleo	6		8		12		16		20
	Ar	Dr	Ar	Dr	Ar	Dr	Ar	Dr	Ar
N(árboles.ha ⁻¹)									
T0	1644	894	878	878	865	865	797	797	711
T1	1644	894	893	536	530	439	427	390	364
T2	1644	894	862	211	210	157	153	122	122
DAP (cm)									
T0	14,8	16,4	20,3	20,3	24,1	24,1	26,8	26,8	28,7
T1	14,8	16,4	20,3	21,8	27,1	27,6	31,0	31,4	34,8
T2	14,8	16,4	20,3	23,6	32,7	33,4	39,4	39,9	45,9
Dg (cm)									
T0	15,1	16,6	20,6	20,6	24,5	24,5	27,3	27,3	29,1
T1	15,1	16,6	20,6	21,9	27,3	27,8	31,2	31,7	34,9
T2	15,1	16,6	20,8	23,7	32,8	33,6	39,7	40,3	46,3
AB (m ² .ha ⁻¹)									
T0	29,2	19,3	29,1	29,2	40,8	40,8	46,6	46,6	47,2
T1	29,2	19,3	29,7	20,2	30,9	26,7	32,7	30,7	34,7
T2	29,2	19,3	29,3	9,3	17,7	13,9	18,8	15,5	20,8
Ht (m)									
T0	10,2	11,1	13,3	13,3	18,1	18,1	24,9	24,9	27,9
T1	10,2	11,1	13,3	13,6	18,7	18,8	25,0	25,1	27,8
T2	10,2	11,1	13,4	13,8	19,5	19,6	23,9	23,9	26,5
Hdom (m)									
T0	12,4	12,4	14,1	14,1	19,5	19,5	25,1	25,1	nc
T1	12,4	12,4	14,2	14,1	19,5	19,5	25,9	25,9	nc
T2	12,4	12,4	14,1	14,0	19,8	19,8	25,6	25,6	nc
V (m ³ .ha ⁻¹)									
T0	155,6	107,5	190,9	190,9	355,7	355,7	542,5	542,5	658,8
T1	155,6	107,5	194,9	134,0	274,9	238,4	379,0	355,2	483,6
T2	155,6	107,5	192,1	62,5	163,6	128,9	209,0	166,7	276,0

N: Número de árboles por hectárea; DAP: Diámetro a la altura de pecho (cm); Dg: Diámetro cuadrático medio (cm); AB: Área basal (m²); Ht: Altura total (m); Hdom: Altura dominante (m); V: Volumen del fuste con corteza (m³); nc: no calculado. Fuente: Crechi et al. (2001) [35]

Muestreo del estrato arbóreo. Selección de los árboles

Se apearon 45 árboles en total, de los cuáles 15 se obtuvieron de cada uno de los tratamientos y a su vez 5 de cada repetición. La elección de los mismos se efectuó estableciendo 5 clases diamétricas de las cuáles en la clase inferior se tomó el árbol extremo de menor diámetro y en la clase superior el árbol extremo de mayor diámetro. En las tres clases diamétricas intermedias correspondientes a los árboles más frecuentes se eligieron los árboles promedio de la clase.

Compartimentos arbóreos. Definición

El material fue separado en 7 compartimentos diferentes a saber:

- Fuste sin corteza: el fuste del árbol, excluyendo la corteza, desde la base del mismo hasta los 5 cm de diámetro. En caso de producirse una bifurcación por debajo de este diámetro se consideraron ambos fustes hasta el diámetro mencionado.
- Corteza del fuste: toda la corteza de las secciones consideradas como fuste.
- Ramas menores a 5 cm de diámetro en sus extremos: las ramas vivas, cuyo diámetro en ambos extremos es menor a 5 cm.
- Ramas mayores a 5 cm de diámetro: las ramas vivas, cuyos diámetros en ambos extremos es mayor a 5 cm.
- Ramas secas: las ramas muertas adheridas al árbol.
- Hojas: las hojas en el árbol.
- Frutos: los conos que se encuentran en el árbol al momento del apeo.

Determinación de la biomasa y contenido de P en los individuos arbóreos

El peso de los árboles se obtuvo por medio de técnicas de análisis dimensional (Whittaker y Woodwell 1968 [36]). Cada compartimento recibió el siguiente tratamiento:

Fuste sin corteza: El mismo fue seccionado en número variable de trozas en función de los requerimientos de la empresa propietaria del sitio donde se desarrollaron los trabajos. Cada troza fue medida y cubicada por medio de la fórmula de Smalian (Mackay 1968 [37]) por la cuál se obtuvo el volumen definitivo de la misma. Luego se extrajeron secciones transversales a diferentes alturas y se llevaron a laboratorio. Allí se determinó la densidad básica de la madera. Ésta multiplicada por el volumen dio como resultado el peso de cada una de las trozas y por sumatoria el peso total del fuste. Alícuotas de las secciones llevadas a laboratorio fueron objeto de la determinación de la concentración de fósforo, cuyas muestras fueron compuestas por material extraído desde la médula hacia el exterior.

La determinación de la densidad básica de la madera se realizó por medio de probetas de tamaño variable, donde dos de las caras poseían 2 cm de arista, según indican las normas IRAM 9544 (1965) [38], pero el grosor de la probeta dependió del grosor de la muestra de fuste (sección transversal) que se trajo del campo. De cada una de las secciones del fuste llevadas a laboratorio se tomó un listón que atravesaba de lado a lado en forma tangencial a la médula obteniendo un número variable de probetas. En cada árbol se extrajeron en promedio alrededor de 60 probetas, totalizando 2700 probetas. El valor final se obtuvo promediando los valores obtenidos en cada uno de los extremos de cada troza, luego promediando ambos extremos y aplicándose a la troza correspondiente. Después de ello se calculó el promedio de todas las trozas obteniendo así la densidad básica promedio del árbol.

Corteza del fuste: De las secciones transversales de fuste llevadas a laboratorio la mitad que no fue empleada para la determinación de densidad básica de la madera fue colocada en estufa a 70 °C. La corteza correspondiente también fue

sometida a estufa hasta obtener peso constante. Obtenido el peso seco de ambos se calculó el porcentaje de corteza correspondiente al fuste con corteza. Con este porcentaje y obtenido el peso seco del fuste se pudo determinar el peso seco total de la corteza de cada uno de los árboles. Alícuotas de este material fueron extraídas para la determinación de la concentración de fósforo.

Copa: La copa de cada árbol fue subdividido completo en los compartimentos hojas, frutos, ramas secas, ramas >5 cm y ramas <5 cm; el material fue separado y pesado húmedo en el campo con una balanza electrónica de 300 kg cuyo error es de 0,02%. De la muestra total de cada compartimento, fueron extraídas alícuotas compuestas conformadas con material de todo el árbol, para determinar el peso seco final de cada uno. Las mismas se pesaron en húmedo y se llevaron a estufa a 70° C hasta obtener peso constante seco. Se calculó el coeficiente para la estimación del peso seco de cada uno de los compartimentos de cada árbol, el cuál se aplicó respectivamente a la totalidad del material pesado en el campo de cada uno de los compartimentos. De las muestras secas se extrajeron alícuotas para obtener la concentración de fósforo de cada uno de los compartimentos por árbol individual.

Determinación de la biomasa arbórea y contenido de P de las plantaciones

La biomasa arbórea de las plantaciones fue estimada empleando el inventario de cada una de las 9 parcelas realizado previamente a la tala rasa en el mes de enero de 2005 y las relaciones alométricas obtenidas mediante el análisis de regresión de los 45 árboles cosechados. Se calculó la biomasa por compartimento para cada árbol inventariado en cada parcela y mediante la sumatoria de los valores de todos los árboles se obtuvo la biomasa por compartimento y total del estrato arbóreo para cada parcela. El contenido de P o mineralomasa arbórea de P se obtuvo multiplicando la biomasa de cada compartimento por su promedio de concentración de P de los árboles de la parcela, y mediante la sumatoria de las mineralomasas de los compartimentos se estimó la mineralomasa arbórea total. Los valores de biomasa y mineralomasa fueron expresados por hectárea.

La biomasa y mineralomasa extraída a la corta final se estimó a partir de los datos de biomasa y mineralomasa a los 20 años.

Determinación de la biomasa extraída durante la cosecha final y los raleos

Para estimar las exportaciones de P durante la cosecha final se usaron los valores de biomasa y mineralomasa de P en los compartimentos involucrados en las dos modalidades de cosecha: 1- fuste entero (FE): suma de contenidos en el fuste + corteza; 2-árbol entero (AE): suma de contenidos en todos los compartimentos aéreos considerados en el estrato arbóreo.

Para la determinación de la biomasa extraída en los raleos efectuados a los 8, 12 y 16 años se utilizaron valores de referencia de densidad básica de la madera (Pereyra y Gelid, 2002 [39]). Se empleó una densidad promedio de 0,364, 0,401 y 0,428 g.cm⁻³ respectivamente para 8, 12 y 16 años de edad. Se asumió que el porcentaje de corteza en los raleos fue el mismo que se obtuvo a los 20 años en cada uno de los tratamientos siendo los mismos 5,3% del peso del fuste en el tratamiento de 33% de raleo y 4,6% el de 66% de raleo. También para obtener el contenido de fósforo extraído en cada uno de los raleos se utilizaron valores de referencia de la bibliografía de concentración de dicho elemento (Goya et al., 2004 [40]). Los valores de concentración de P (mg.g⁻¹) usados fueron: 1- fuste: 0,05, 0,06 y 0,08 para 8, 12 y 16 años de edad respectivamente; 2-corteza: 0,21, 0,32 y 0,26 para 8, 12 y 16 años de edad respectivamente. La modalidad de cosecha en los raleos fue de FE.

Determinación de la biomasa y contenido de P del sotobosque

En cada una de las 9 parcelas del estrato arbóreo se realizó el muestreo del estrato herbáceo y arbustivo en subparcelas contenidas en ellas según se describe en la Figura 2.1:

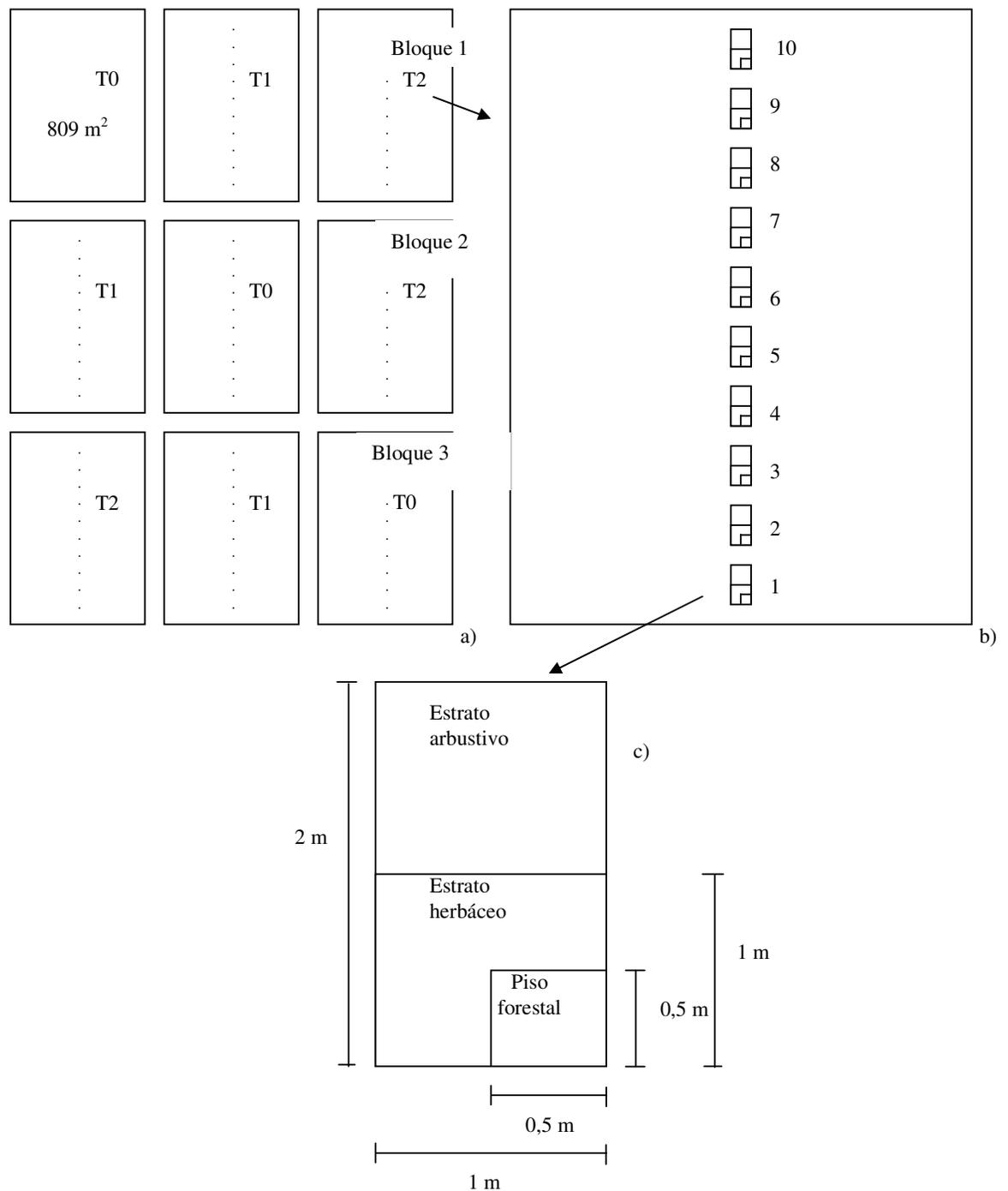


Figura 2.1: Esquema general de las parcelas de muestreo de los diferentes estratos
 a) Croquis del ensayo de raleo instalado en el año 1993, b) cada una de las parcelas del croquis antes mencionado con las 10 parcelas de muestreo de los estratos inferiores y piso y, c) parcela de muestreo del estrato arbustivo, estrato herbáceo y piso forestal.

Estrato arbustivo

El desarrollo de este estrato al igual que el herbáceo no tuvo alteración al menos durante los 4 años previos a la realización de los trabajos.

Se cosecharon 10 subparcelas rectangulares de 2x1m en dicho estrato, distribuidas sistemáticamente dentro de cada una de las 9 parcelas arbóreas del ensayo, con un n=90 (Figura 2.1). En total se cosecharon 90 subparcelas. En ellas se extrajeron todas las plantas arbustivas o arbóreas que poseían material leñoso al momento del muestreo y que no pertenecían al estrato arbóreo en estudio. El material vegetal en cada subparcela se dividió en dos compartimentos, uno con las hojas y frutos y, otro incluyendo todo el material leñoso.

El material recolectado fue pesado en el campo y se extrajeron alícuotas que se volvieron a pesar en húmedo y se colocaron en estufa y secaron a 70 °C hasta peso seco constante. Con el peso fresco total obtenido en el campo y el coeficiente de peso seco obtenido a partir de las alícuotas en laboratorio se determinó la cantidad de biomasa presente en cada uno de los compartimentos arbustivos. La concentración de fósforo se determinó a partir de alícuotas secas

Estrato herbáceo

Se cosecharon en total 90 subparcelas de 1x1m distribuidas sistemáticamente 10 en cada una de las 9 parcelas (Figura 2.1). Se pesó todo el material en el campo y se obtuvo una alícuota de cada una de ellas para colocar en estufa a 70 °C hasta obtener peso constante. Alícuotas de este material fueron retiradas para determinar la concentración de fósforo.

Determinación de la necromasa y contenido de P del piso forestal

El material del piso forestal se colectó en 90 subparcelas de 0,25 m² cada una (Figura 2.1). Las mismas estuvieron distribuidas 30 en cada uno de los tratamientos y

a su vez 10 en cada una de las 9 parcelas arbóreas. El material de cada subparcela fue subdividido en 3 compartimentos según se describe a continuación.

El material mayormente foliar fue separado en dos capas, L y F+H. La capa L consta de restos vegetales muertos no alterados y la unión de las capas F y H se debe a que la rápida transformación de la materia orgánica produce un gradiente de estado del material que hace compleja la separación de ambas capas. Esta mezcla consiste de materia orgánica fragmentada y parcialmente desintegrada pero que aún permite la identificación de su origen correspondiente a la capa F y materia orgánica amorfa ya desintegrada que es parte de la capa H (Hesselman 1926 citado por Pritchett, 1986 [28]).

El tercer compartimento lo constituyó el material leñoso que se encontraba en el piso, proveniente de ramas y fustes.

Todas las muestras de los distintos compartimentos fueron pesadas y colocadas en estufa a 70 °C para obtener el peso seco. Se extrajeron alícuotas de estas muestras para analizar las concentraciones de fósforo.

Determinación de P en muestras vegetales

Para determinar la concentración de fósforo en los tejidos vegetales las muestras fueron sometidas a digestión ácida con una mezcla de Acido Nítrico-Perclórico para la liberación del fósforo inorgánico y orgánico. Luego el fósforo fue determinado por Espectrometría de Emisión por Plasma Inducido, ICP-AES." (Johnson y Ulrich, 1959 [41])

Muestreo del suelo y determinación del contenido de P

Con la finalidad de conocer el tipo de suelo dominante del lugar y establecer las características específicas del muestreo del suelo con fines de analizar su concentración y contenido de P, se ubicó un sitio fuera de las parcelas donde se realizó una única calicata de 150 cm de profundidad para la descripción del perfil y la identificación del espesor de cada uno de los horizontes, que se asume representativa de todo el ensayo. Para la descripción del perfil se utilizaron las “Normas de reconocimiento de suelos” (Etchevehere P. 1976 [42]).

En cada una de las 9 parcelas arbóreas y con la finalidad de obtener muestras para la determinación de la concentración de fósforo disponible, se realizó un muestreo compuesto con barreno de cada horizonte situado hasta los 60 cm de profundidad, sobre dos diagonales cruzadas que atravesaban la parcela. En los horizontes comprendidos hasta los 30 cm se extrajeron 8 muestras simples por parcela y, a partir de esta profundidad y hasta los 60 cm se extrajeron 5 muestras simples en cada una de ellas (Fernández et al., 2000b [43]). En todos los casos mencionados las muestras simples luego pasaron a conformar una única muestra compuesta para cada una de las 9 parcelas arbóreas, respectivamente para cada horizonte.

Cada una de las muestras compuestas fue acondicionada y enviada a laboratorio para la determinación de la concentración de fósforo disponible, llevándose a cabo esta determinación por el método de Bray y Kurtz (1945) [44].

La densidad aparente se realizó por medio del método del cilindro. Se tomaron muestras de suelo no perturbado en condiciones de campo con un cilindro de volumen conocido ($92,37 \text{ cm}^3$). En los horizontes comprendidos hasta los 30 cm de profundidad se extrajeron 8 muestras por horizonte en cada una de las 9 parcelas arbóreas, mientras que para el espesor 30-60 cm se extrajeron 5 muestras (Fernández et al., 2001b [45]). Las muestras se llevaron al laboratorio y se secaron a 105° C hasta peso constante. La densidad aparente se calculó como el cociente peso seco/volumen.

El contenido de fósforo disponible en el suelo hasta 60 cm se obtuvo como la sumatoria de los productos de la densidad aparente y la concentración de fósforo de cada uno de los horizontes por unidad de área.

Cálculo de índices

Con los contenidos de fósforo de los compartimentos del sistema se calcularon los siguientes índices:

Índice de exportación de P: cociente entre la biomasa cosechada y contenido de P en dicha biomasa. Con este índice se puede estimar la biomasa removida por unidad de P exportado (Santana et al., 2002 [46]; Fernández, 2003 [47]).

Costo nutritivo en P de la cosecha: Contenido de P en la biomasa cosechada / biomasa cosechada. Este índice es la inversa del anterior y permite considerar la eficiencia de uso del fósforo. Ante la disminución del mismo aumenta la eficiencia de uso del fósforo (Raison y Crane, 1981 [48]).

Índice de estabilidad del P en las plantaciones (IEP): (contenido de P exportado) / (contenido de fósforo en el suelo). Este índice informa sobre la estabilidad de la oferta nutritiva a largo plazo de un sitio. En la medida que este índice aumenta, disminuye la estabilidad nutricional del sistema (Fölster y Khanna, 1997 [49]). Se consideraron dos escenarios de cosecha, fuste entero (FE) y árbol entero (AE). Se calcularon cuatro variantes de éste índice considerando distintos almacenajes de P de pronta disponibilidad las plantas en el suelo forestal: 1- P disponible en el suelo mineral, 2- P disponible en el suelo mineral y P en el piso forestal, 3- P disponible en el suelo mineral, P en el piso forestal y en los residuos de la cosecha (partes no cosechadas) y 4- El P de la variante 3 más el contenido en la biomasa del sotobosque.

Índice de P remanente para la rotación de la misma especie (Propuesto): (contenido de P disponible en el suelo (mineral + orgánico) / (contenido de P

extraído del sitio mediante la cosecha (final e intermedias). Es la inversa del IEP. Permite estimar el número de rotaciones que soportaría el fósforo actualmente disponible en el sitio, con el tipo de cosecha empleado.

Cálculos estadísticos

Los datos de biomasa, y concentración y contenido de fósforo en la biomasa arbórea fueron analizados para los valores promedio de la parcela en sus variantes árbol individual y rodal. La comparación de tratamientos se hizo mediante ANOVA y test de Tukey (Steel y Torrie, 1980 [50]).

La biomasa y, concentración y contenido de fósforo del sotobosque arbustivo fue tratado bajo el mismo análisis estadístico que para los compartimentos material leñoso y material verde en cada una de las 9 parcelas, al igual que el sotobosque herbáceo que fue tratado en su único compartimento.

El mismo tratamiento estadístico recibió el piso forestal para las divisiones L, H+F y material leñoso.

El análisis de la concentración y contenido de fósforo en el suelo fue realizado a nivel de tratamiento con sus respectivas réplicas para cada uno de sus horizontes.

En todos los casos el nivel de significancia utilizado fue de 95%, tanto para el análisis de varianza como para el test de comparación de medias.

Con los datos de biomasa arbórea y contenido de fósforo en cada uno de los compartimentos se ajustaron ecuaciones para *Pinus taeda* de 20 años de edad en el norte de la provincia de Misiones. El mejor valor de R^2 fue utilizado como criterio de selección de las ecuaciones.

3. DESARROLLO

RESULTADOS

Estrato arbóreo

Densidad de la madera

La densidad básica de la madera obtenida indica que el aumento de la intensidad de raleo se asoció con un incremento no significativo de la densidad, habiéndose obtenido los siguientes registros en cada uno de los tratamientos: 0% de raleo $0,407 \text{ g.cm}^{-3}$, 33% de raleo $0,416 \text{ g.cm}^{-3}$ y, 66% de raleo $0,424 \text{ g.cm}^{-3}$.

Ecuaciones de biomasa y necromasa arbórea por individuo

A los efectos de determinar la biomasa de individuos de *P. taeda* por métodos no destructivos y empleando mediciones de fácil obtención y frecuente disponibilidad de los ejemplares, se realizó un ajuste de ecuaciones a partir de los datos de biomasa de los 45 árboles para cada uno de los compartimentos, siendo seleccionado el modelo exponencial o doble logarítmico ($\ln B = a + b * \ln \text{DAP}$) con variable predictora DAP. Debido a la transformación de los datos, cuando se aplica un modelo como el citado, se originan estimaciones erróneas de los valores de biomasa, es por ello que se aplicó el coeficiente de corrección sugerido por Baskerville (1972 [51]) (Tabla 3.1)

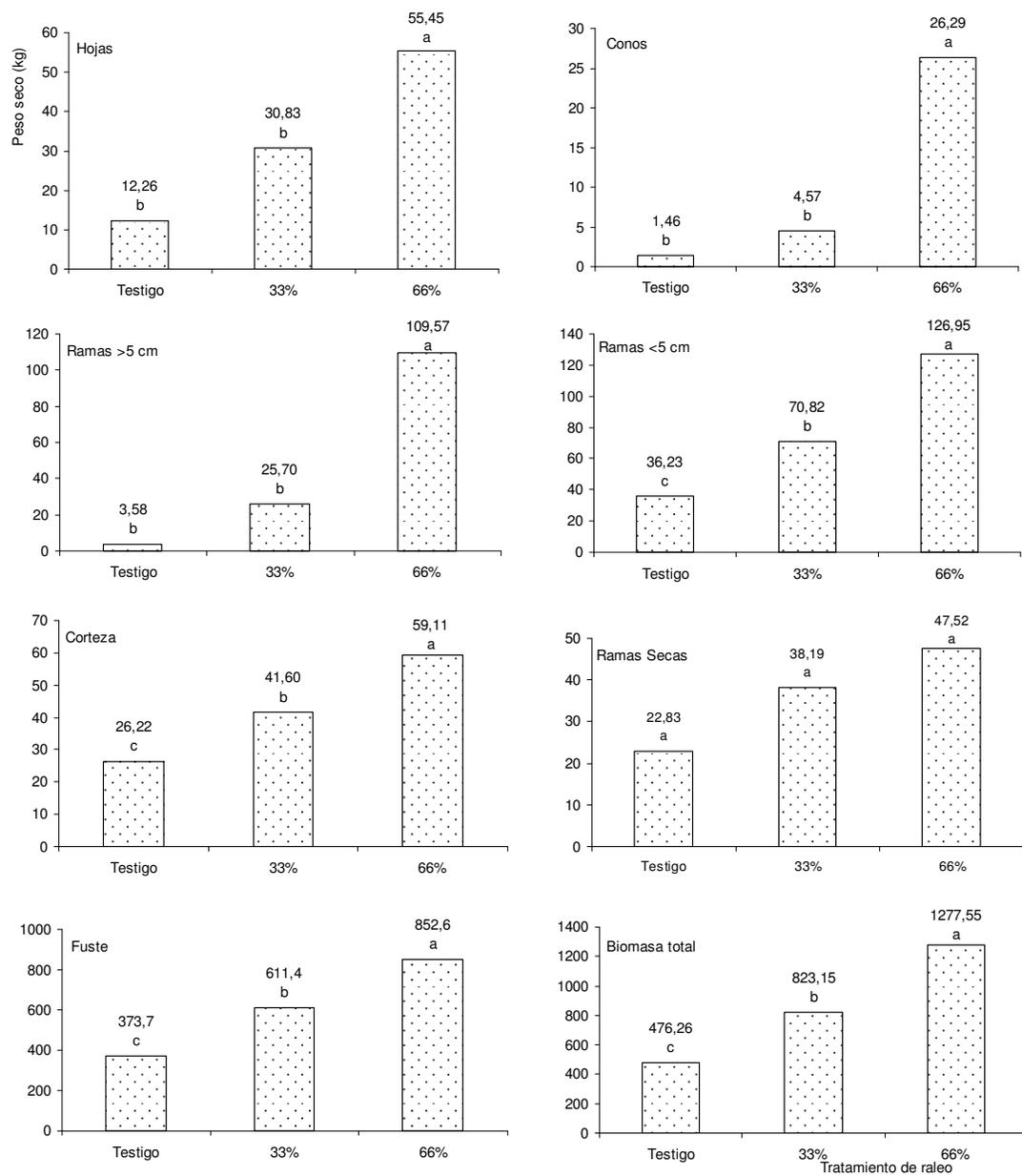
Tabla 3.1: Parámetros de las ecuaciones de biomasa ($\ln B = a + b * \ln \text{DAP}$; DAP en cm) de cada uno de los compartimentos y la biomasa aérea en *Pinus taeda* de 20 años de edad (n=45) manejado bajo diferentes intensidades de raleo.

Compartimento	a	b	ES Est. ⁽¹⁾	R ²	F	P	K ⁽²⁾
Hojas	-9,6481	3,5655	0,4665	0,81	190,00	< 0,05	1,1088
Ramas < 5 cm	-5,7700	2,7573	0,3499	0,82	211,97	< 0,05	1,0612
Ramas > 5 cm	-13,0575	4,5241	0,7162	0,74	107,48	< 0,05	1,2565
Ramas secas	-3,2261	1,8385	0,4283	0,57	52,95	< 0,05	1,0917
Conos	-14,2866	4,4554	0,6885	0,70	95,90	< 0,05	1,2370
Fuste sin corteza	-1,3917	2,1390	0,1814	0,91	452,43	< 0,05	1,0164
Corteza	-3,2550	1,9230	0,2167	0,85	256,07	< 0,05	1,0235
Biomasa Aérea	1,7886	2,3378	0,1750	0,93	580,31	< 0,05	1,0153

⁽¹⁾ Error estándar de estimación; ⁽²⁾ Coeficiente de corrección k según Baskerville (1972)

Biomasa aérea a nivel de árbol individual en función del raleo

Los árboles ($n=27$) cosechados correspondientes a las clases diamétricas más frecuentes en cada tratamiento fueron comparados con la finalidad de comprender cual era el comportamiento de la biomasa de los individuos resultante de la aplicación de las distintas intensidades de raleo. El promedio de los 9 árboles apeados en cada tratamiento indica que la biomasa de todos los compartimentos y total muestra una tendencia creciente con la intensidad del raleo (Figura 3.1). No obstante las diferencias de biomasa entre tratamientos fueron significativas para todos los compartimentos aéreos vivos, no con las ramas secas que son parte de la necromasa en pie.



Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

Figura 3.1: Peso seco de los compartimentos arbóreos a nivel de árbol individual en relación al raleo.

Distribución relativa de la biomasa en los individuos arbóreos en relación al raleo

Los compartimentos de la copa de los individuos más frecuentes mostraron un aumento porcentual, respecto de la biomasa del fuste, con el aumento de la intensidad de raleo (Figura 3.2).

El fuste ocupó el mayor porcentaje de la biomasa aérea individual independientemente del tratamiento, con una disminución con el aumento de la intensidad de raleo. Los compartimentos hojas, (el de mayor importancia respecto a la concentración de nutrientes), conos y ramas vivas (>5 cm y <5 cm) mostraron un aumento relativo con el aumento de la intensidad de raleo. Las ramas secas disminuyeron la participación porcentual con el aumento de la intensidad de raleo.

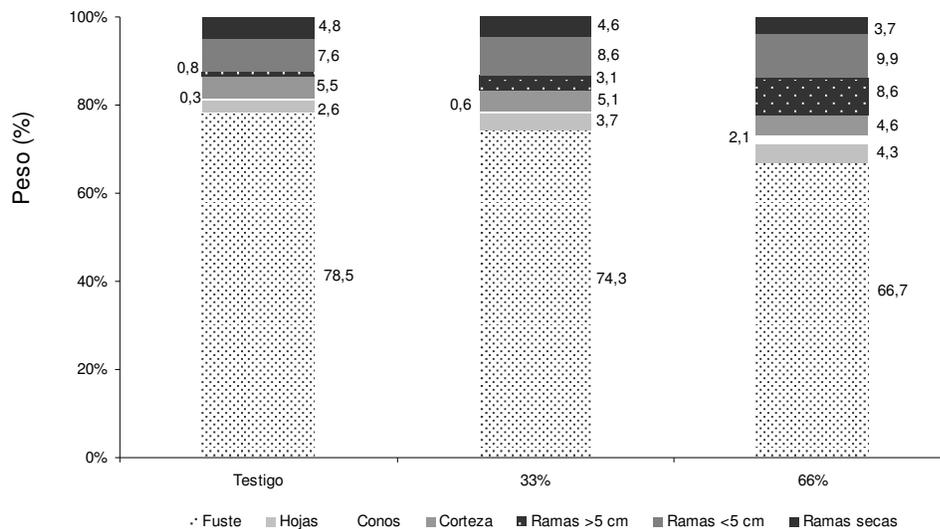


Figura 3.2: Distribución porcentual de la biomasa y necromasa en pie a nivel de árbol individual del *Pinus taeda* de 20 años de edad bajo diferentes tratamientos de raleo.

Concentración de P en individuos arbóreos en relación al raleo

A pesar de algunas tendencias de cambio en las concentraciones de P, los diferentes compartimentos no mostraron diferencias significativas entre tratamientos (Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Concentración promedio de P (mg.g^{-1}) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimentos arbóreos de los árboles de clase diamétrica mas frecuente en relación al raleo.

Compartimento	Tratamiento		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
Hojas	0,599 (0,04) a	0,585 (0,06) a	0,528 (0,05) a
Conos	0,298 (0,04) a	0,319 (0,06) a	0,362 (0,12) a
Ramas <5 cm	0,128 (0,04) a	0,118 (0,01) a	0,150 (0,03) a
Ramas >5 cm	0,085 (0,03) a	0,077 (0,00) a	0,064 (0,01) a
Ramas secas	0,058 (0,01) a	0,060 (0,01) a	0,055 (0,04) a
Fuste	0,115 (0,01) a	0,112 (0,01) a	0,115 (0,02) a
Corteza	0,054 (0,004) a	0,083 (0,02) a	0,048 (0,01) a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

Por otra parte, considerando los distintos compartimentos entre sí se observó la siguiente secuencia de disminución de las concentraciones de P, en todos los tratamientos: hojas>conos>fuste>ramas fina>ramas gruesa>corteza>ramas seca. La significancia de esas diferencias puede observarse en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Concentración promedio de P (mg.g^{-1}) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimentos arbóreos de los árboles de clase diamétrica más frecuente para todos los tratamientos.

	Hojas	Conos	Fuste	Ramas <5 cm	Ramas >5 cm	Corteza	Ramas Secas
Concentración de P (mg.g^{-1})	0,571 (0,037)	0,327 (0,033)	0,114 (0,002)	0,120 (0,007)	0,076 (0,010)	0,062 (0,019)	0,058 (0,002)
	a	b	c	c	c	c	c

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre compartimentos

Contenido de P de individuos arbóreos en relación al raleo

El contenido de P en los distintos compartimentos de los árboles de diámetro más frecuentes mostró una tendencia positiva respecto del aumento de la intensidad

de raleo, que, debido a la ausencia de diferencias significativas de concentración de P entre tratamientos, resultó proporcional al aumento de su biomasa y necromasa. En consecuencia la significancia de las diferencias de contenido de P de los individuos de diámetro más frecuente entre tratamientos para cada compartimento resultó similar a las de sus biomasa y necromasa, destacándose que el tratamiento de raleo al 66% muestra los ejemplares arbóreos con mayores contenidos de P, y que aquellos del Testigo y raleo al 33% no difieren estadísticamente entre sí. Los contenidos de P se indican en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4: Contenido promedio de P (g/compartimento) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimentos arbóreos del árbol individual en relación al raleo.

Compartimento	Tratamiento		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
Hoja	9,08 (3,86) b	17,90 (3,15) ab	29,92 (7,85) a
Conos	0,53 (0,16) b	1,42 (0,35) b	9,45 (2,96) a
Ramas <5 cm	5,94 (4,52) a	7,96 (1,47) a	15,77 (2,47) a
Ramas >5 cm	1,57 (2,58) b	1,96 (1,39) b	6,73 (1,52) a
Ramas secas	1,78 (0,64) a	2,17 (1,25) a	2,85 (0,74) a
Fuste	50,61 (11,75) b	68,27 (4,49) b	97,72 (13,33) a
Corteza	1,79 (0,52) a	3,49 (0,58) a	2,79 (0,85) a
Total	71,30 (22,33) b	103,17 (9,64) b	165,24 (16,65) a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre compartimentos

Contenido relativo de P de individuos arbóreos en relación al raleo

El contenido de P en los compartimentos de la copa de los individuos más frecuentes mostró un aumento relativo, respecto del contenido de P del fuste, con el aumento de la intensidad de raleo (Figura 3.3).

El fuste representó el mayor porcentaje del contenido de P en la biomasa aérea individual independientemente del tratamiento, con una disminución con el aumento de la intensidad de raleo. Los compartimentos hojas y conos mostraron un aumento relativo en el contenido de P con el aumento de la intensidad de raleo.

Las ramas secas disminuyeron la participación porcentual con el aumento de la intensidad de raleo.

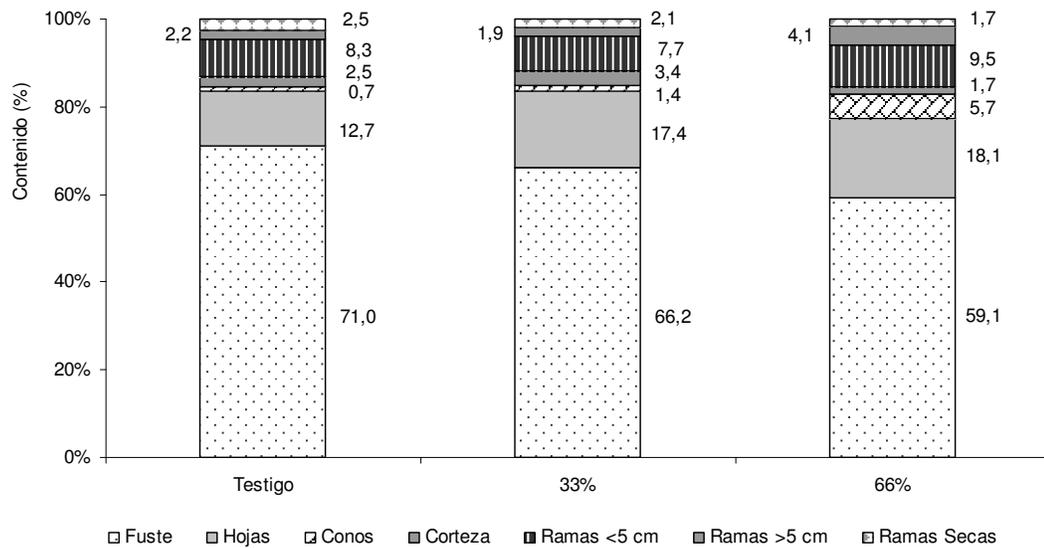


Figura 3.3: Distribución porcentual del contenido de P a nivel de árbol individual del *Pinus taeda* de 20 años de edad en relación a la intensidad de raleo.

Ecuaciones de mineralomasa arbórea por individuo

Para determinar la mineralomasa de individuos de *P. taeda* por métodos no destructivos, los datos disponibles de los análisis de P de 45 ejemplares arbóreos fueron empleados en un análisis de regresión que vinculó el DAP y DAP^2 con los contenidos de P en cada compartimento. Ecuaciones de regresión de éste tipo resultan útiles al fin de estimar la mineralomasa de masas forestales implantadas de *P. taeda* en forma directa, ya que esta nueva variable combina la biomasa y concentración de P en una sola. En la Tabla 3.5 se presentan las ecuaciones a nivel de árbol individual.

Tabla 3.5: Parámetros de las ecuaciones del contenido de P de cada uno de los compartimentos a nivel de árbol individual (n=45) de *Pinus taeda* de 20 años de edad, en plantaciones testigo y raleadas.

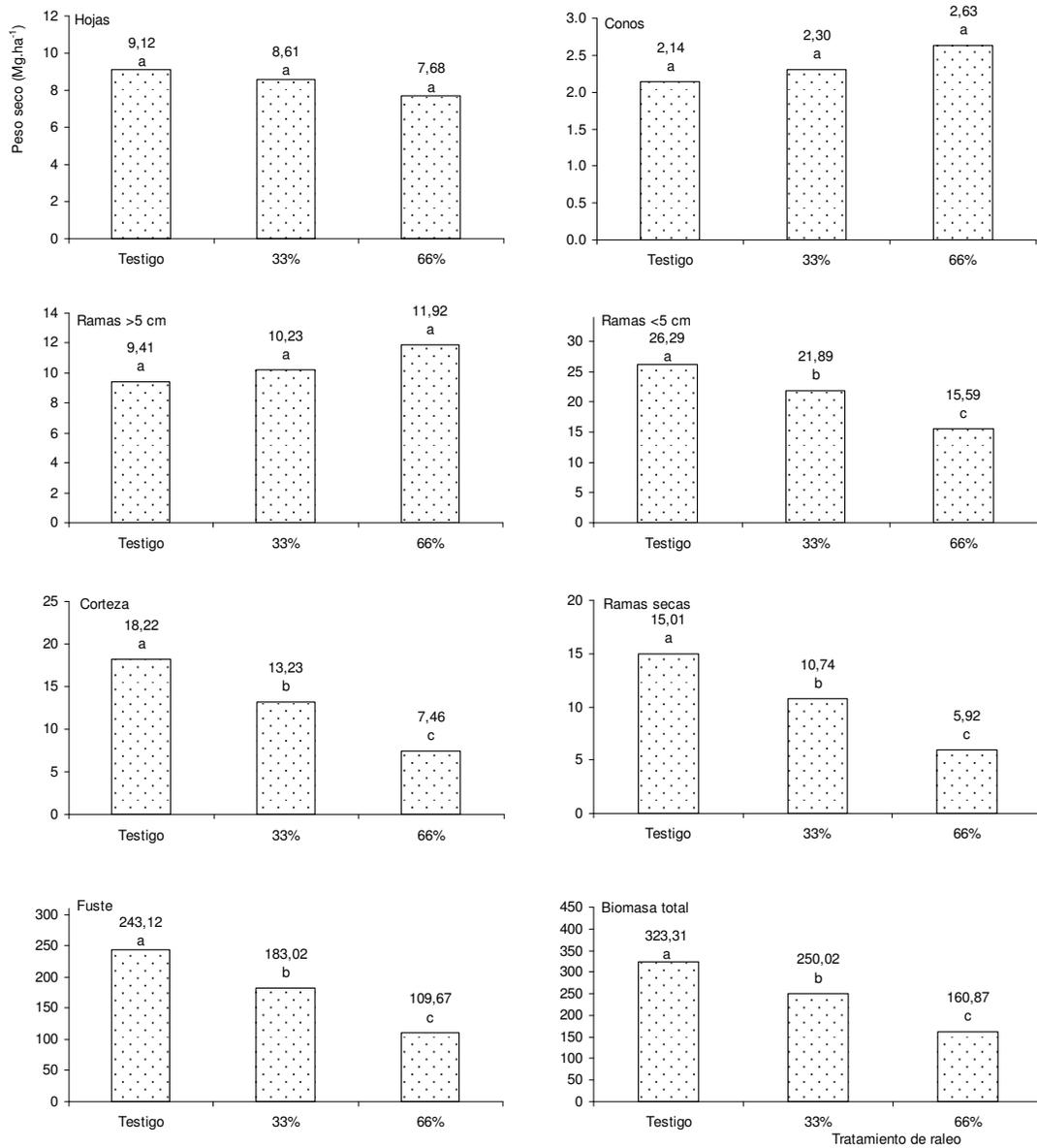
Compartimento	Ecuación	a	b	R ²	Error	P
Hojas	(1)	-6,6595	0,0173	74,38	0,40	< 0,05
Conos	(1)	-2,7123	0,0041	41,50	1,05	< 0,05
Ramas <5 cm	(1)	-1,5562	0,0076	61,12	0,47	< 0,05
Ramas >5 cm	(1)	-2,0979	0,0038	58,84	0,66	< 0,05
Ramas seca	(2)	-0,8758	0,0774	25,50	0,64	< 0,05
Fuste	(2)	-56,3215	3,3945	81,94	0,22	< 0,05
Corteza	(1)	0,2378	0,0018	35,59	0,63	< 0,05

Ecuaciones: (1): $a + b \times \text{DAP}^2$; (2): $a + b \times \text{DAP}$;
DAP: cm

Biomasa aérea a nivel de rodal en función del raleo

El total de biomasa por hectárea encontrado en cada uno de los tratamientos mostró que el tratamiento testigo fue el que mayor biomasa presentó (323,31 Mg.ha⁻¹), seguido por el tratamiento 33% (250,02 Mg.ha⁻¹) y por último el 66% de raleo (160,87 Mg.ha⁻¹).

En relación con el comportamiento de la biomasa total, los compartimentos fuste, corteza, ramas <5 cm, y ramas secas, mostraron tendencia a decrecer con el aumento del raleo. El análisis estadístico mostró que la biomasa de los diferentes compartimentos presentó diferencias significativas cuando se comparan tratamientos extremos en intensidad de raleo. El compartimento hojas mostró la misma tendencia sin diferencias significativas (Figura 3.4). Por otra parte, los compartimentos conos y ramas >5 cm, tuvieron una tendencia no significativa a diferenciar el tratamiento de raleo 66%, con mayor valor, que los otros dos tratamientos (Figura 3.4).



Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

Figura 3.4: Peso seco de los compartimentos arbóreos a nivel rodal en relación al raleo.

Distribución porcentual de la biomasa aérea a nivel de rodal en relación al raleo

La biomasa porcentual del fuste, el principal componente de la biomasa total, disminuyó con el aumento de la intensidad de raleo, mientras que las hojas presentaron un comportamiento inverso, ya que incrementaron su participación relativa al aumentar la intensidad de raleo (Figura 3.5). Ambos grupos de ramas tuvieron un porcentaje mayor en el tratamiento 66% de raleo, mientras que entre los restantes tratamientos la diferencia fue mínima; sin embargo el mayor aumento relativo con el raleo fue de las ramas >5 cm de diámetro. Los conos también respondieron positivamente con la apertura del dosel. La proporción de ramas secas respondió negativamente al aumento de la intensidad de raleo.

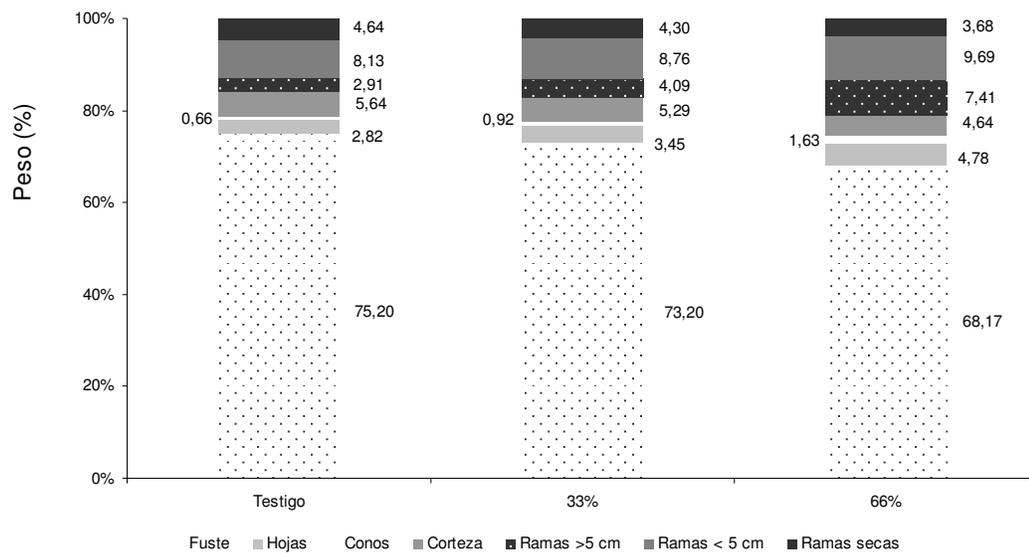


Figura 3.5: Distribución porcentual de la biomasa en el rodal del *Pinus taeda* de 20 años de edad bajo diferentes tratamientos de raleo.

Contenido de P en la biomasa arbórea a nivel de rodal en relación al raleo

El contenido de P en la biomasa aérea arbórea a nivel de rodal pudo estimarse mediante dos procedimientos: Método 1- El cálculo de la biomasa de cada parcela mediante el empleo de las ecuaciones de regresión de la Tabla 3.1 y los datos de inventario forestal, y su multiplicación por la concentración media de P de cada compartimento de los 5 árboles cosechados en cada una de ellas; Método 2- Mediante el empleo de ecuaciones de regresión de contenido de P (Tabla 3.5) y los datos de inventario de cada parcela. Los resultados de ambas aproximaciones se muestran en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) en los compartimentos arbóreos del rodal en relación al raleo, estimado por ambos métodos.

Compartimento	Testigo		33% de raleo		66% de raleo	
	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Hojas	5,16 (0,26) a	5,63 (0,32) a	5,01 (0,41) a	5,19 (0,31) a	4,20 (0,58) b	3,59 (0,18) b
Conos	0,57 (0,02) a	0,55 (0,12) b	0,76 (0,19) a	0,84 (0,06) a	0,94 (0,18) a	0,73 (0,03) ab
Ramas <5 cm	3,38 (0,82) a	3,45 (0,12) a	2,41 (0,58) ab	2,79 (0,16) b	1,91 (0,06) b	1,75 (0,09) c
Ramas >5 cm	0,79 (0,12) a	0,80 (0,09) a	0,75 (0,04) a	0,92 (0,06) a	0,70 (0,13) a	0,72 (0,03) a
Fuste	28,0 (3,54) a	29,0 (1,01) a	21,0 (1,14) b	22,1 (1,28) b	12,8 (1,36) c	11,8 (0,58) c
Corteza	1,20 (0,09) a	1,27 (0,04) a	1,00 (0,19) a	0,89 (0,05) b	0,43 (0,09) b	0,49 (0,03) c
Ramas secas	0,97 (0,11) a	0,95 (0,04) a	0,60 (0,11) b	0,65 (0,04) b	0,30 (0,02) b	0,32 (0,02) c
Contenido	40,1 (2,62)	41,6 (1,56)	31,6 (1,46)	33,4 (1,92)	21,2 (1,47)	19,4 (0,96)
Total	a	a	b	b	c	c

M1: Método 1; M2: Método 2. Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos de un mismo compartimento

Las diferencias significativas en el contenido de P entre tratamientos se observaron en los compartimentos hojas, fuste, corteza, ramas <5 cm, ramas seca y contenido total en los compartimentos arbóreos (Tabla 3.6). El contenido de P de las ramas > 5 cm si bien presentó una tendencia inversa con el aumento de la intensidad

de raleo, similar al de los compartimentos antes mencionados, no fue significativa, al igual que el compartimento conos. Como resultado de la importancia del contenido de P en los comportamientos señalados, el tratamiento de raleo 66% fue el de menor contenido total de P en el estrato arbóreo, diferenciándose cada uno de los tratamientos (Tabla 3.6).

Se realizó la prueba de T para comparar las medias de ambos métodos de estimación del contenido de fósforo en cada uno de los compartimentos para cada intensidad de raleo, donde pudo corroborarse la ausencia de diferencias significativas, con excepción de las ramas > 5 cm en el tratamiento 33%.

Sotobosque

Biomasa del estrato arbustivo

Ambos compartimentos del sotobosque arbustivo, hojas y material leñoso, muestran diferencias en el contenido de biomasa entre tratamientos (Figura 3.6).

Las hojas del tratamiento 66% se diferenciaron estadísticamente de los dos restantes. El material leñoso mostró diferencias entre el tratamiento testigo y el tratamiento 66% de raleo, pero no con el tratamiento 33%, a pesar de la diferencia en valor absoluto observada. Se pudo corroborar que la falta de diferencias significativas entre el tratamiento 66% y el tratamiento 33% se debió a la alta variabilidad en la biomasa encontrada en las repeticiones del tratamiento 66%.

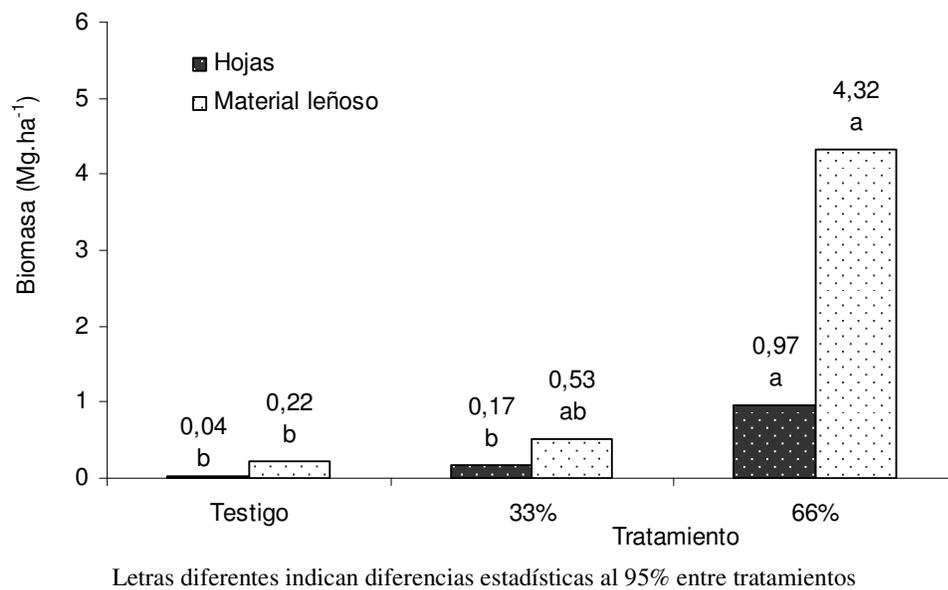


Figura 3.6: Biomasa de los compartimentos hojas y material leñoso del sotobosque arbustivo en función de la intensidad de raleo.

Concentración de P en el sotobosque arbustivo

La concentración de P foliar muestra una tendencia creciente sin diferencias significativas con el aumento de la intensidad de raleo. Los valores registrados fueron 0,964, 1,231 y 1,399 mg.g⁻¹, respectivamente para testigo, 33% y 66% de raleo.

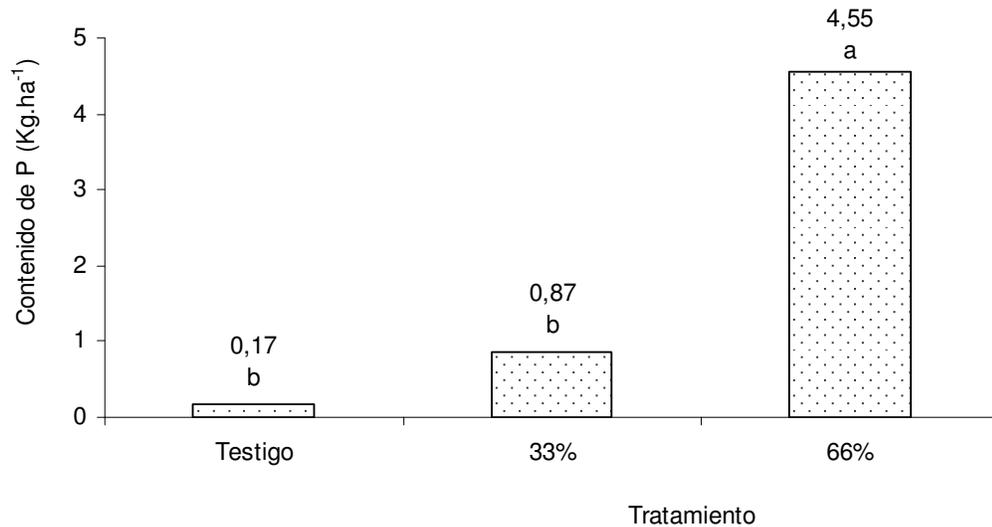
La concentración de fósforo en el material leñoso tampoco mostró diferencias significativas entre tratamientos. La concentración de P en el material leñoso fue inferior a la que se encontró en las hojas, cuyos valores obtenidos fueron 0,995; 0,930 y 0,881 mg.g⁻¹ respectivamente en testigo, 33 y 66% de raleo.

Contenido de P en el estrato arbustivo

El contenido de fósforo en el subcompartimento hojas varió significativamente de acuerdo a la intensidad de raleo que se aplicó en la plantación de *Pinus taeda*, encontrándose valores de 0,03 ($\pm 0,05$); 0,21 ($\pm 0,11$) y 1,36 ($\pm 0,57$) kg.ha⁻¹ respectivamente en los tratamientos testigo, 33% y 66%.

El contenido de fósforo en el material leñoso mostró el mismo comportamiento mencionado anteriormente, con valores de 0,13 ($\pm 0,10$), 0,66 ($\pm 0,84$) y 3,19 ($\pm 0,59$) kg.ha⁻¹ respectivamente en los tratamientos testigo, 33 y 66% de raleo.

El contenido total de fósforo en el sotobosque arbustivo mantuvo la misma tendencia encontrada en los resultados parciales de cada uno de ellos (Figura 3.7). El análisis estadístico detectó diferencias significativas entre el contenido del tratamiento 66% de raleo con los dos restantes, que a su vez no mostraron diferencias entre ellos.

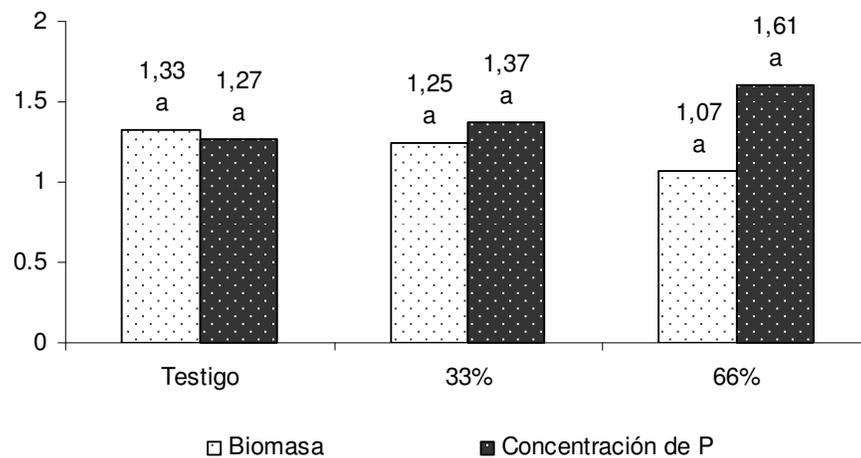


Letras diferentes representan diferencias significativas al 95% entre tratamientos

Figura 3.7: Contenido de P (kg.ha⁻¹) en el estrato arbustivo en relación al raleo.

Biomasa y concentración de P del estrato herbáceo

Se constató la ausencia de diferencias significativas de biomasa herbácea y de concentración de P en sus tejidos entre los tratamientos (Figura 3.8).

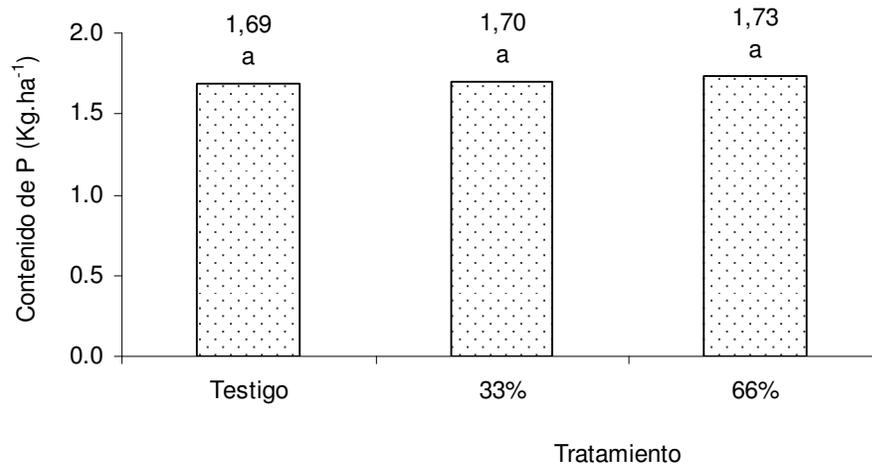


Letras diferentes representan diferencias significativas al 95% entre tratamientos

Figura 3.8: Peso seco de la biomasa (Mg.ha⁻¹) y concentración de P (mg.g⁻¹) del sotobosque herbáceo.

Contenido de P en el estrato herbáceo

El contenido de P en el estrato herbáceo del sotobosque no mostró diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3.9).



Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

Figura 3.9: Contenido de P (kg.ha⁻¹) en el estrato herbáceo en relación al raleo.

Piso Forestal

Contenido de Necromasa

Ninguno de los compartimentos en que se dividió el piso forestal mostró diferencias significativas (Figura 3.10).

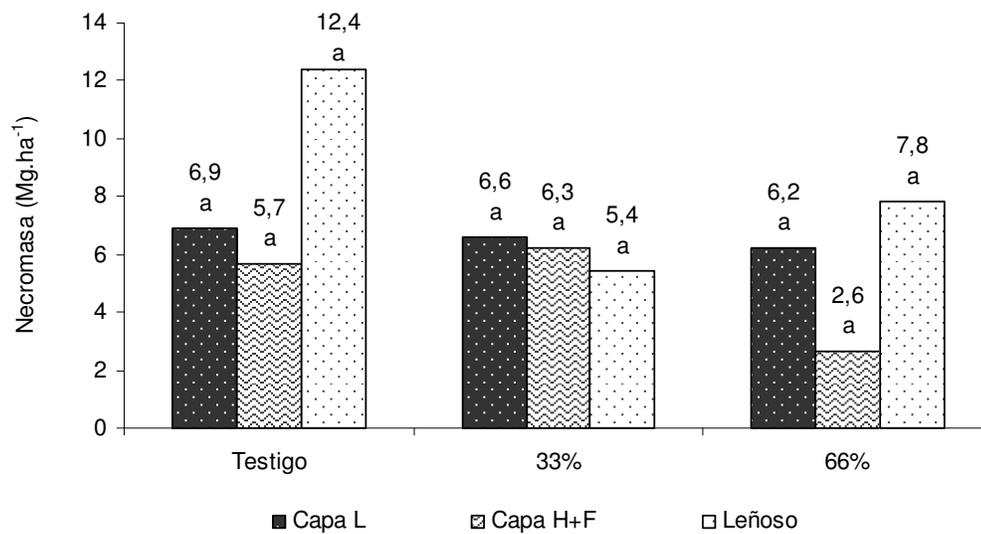
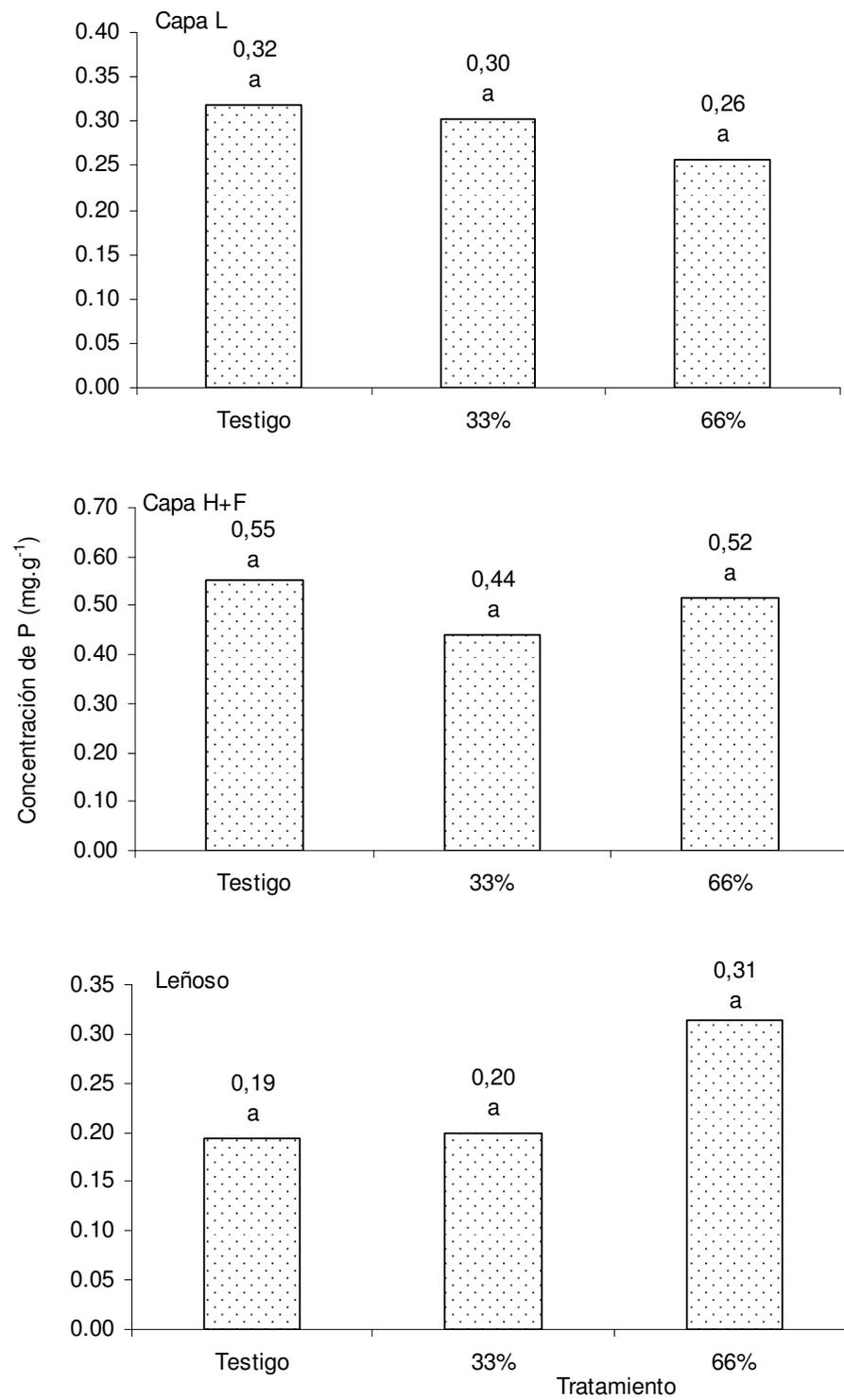


Figura 3.10: Contenido de necromasa del piso forestal en relación al tratamiento de raleo.

Concentración de P

La concentración de fósforo en todos los tratamientos fue mayor en los tejidos finos (capas L, y H+F) y aumentó su concentración desde la hojarasca recién caída a la más antigua y descompuesta ubicada por debajo (Figura 3.11).

La concentración en los compartimentos del piso forestal no mostró diferencias significativas a pesar de alguna tendencia en uno u otro sentido con el aumento de la intensidad de raleo observada en las gráficas (Figura 3.11).



Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

Figura 3.11: Concentración de P (mg.g⁻¹) en los subcompartimentos del piso forestal en los diferentes tratamientos de raleo.

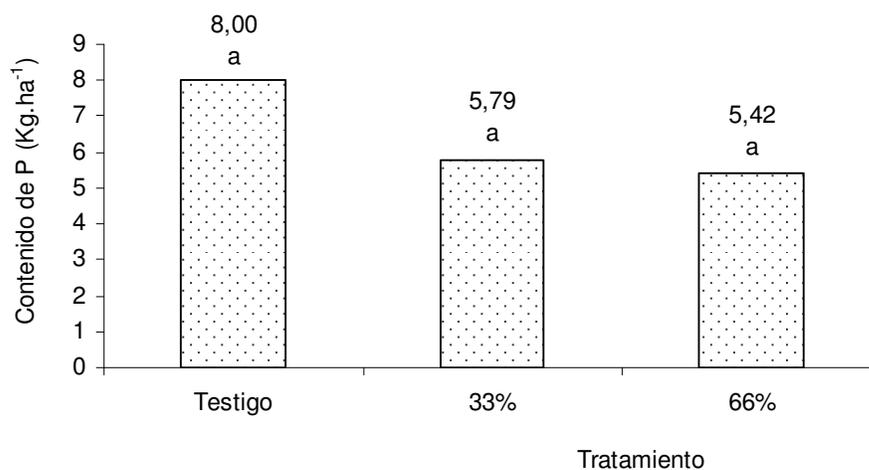
Contenido de P

Los compartimentos L y H+F no mostraron diferencias estadísticas significativas, a pesar de la visible tendencia decreciente de contenido de P respecto del aumento de la intensidad de raleo (Tabla 3.7). Tampoco lo hizo el compartimento material leñoso. De igual forma el aparente decrecimiento de la mineralomasa total de P del piso forestal, entre 33 y 66%, no resultó significativa (Figura 3.12).

Tabla 3.7: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) en el compartimento piso forestal en relación al raleo de *Pinus taeda* de 20 años de edad.

Tratamiento	Capa L	Capa H+F	Leñoso
Testigo	2,21 (0,44) a	3,30 (1,90) a	2,50 (1,69) a
33%	2,02 (0,47) a	2,79 (1,31) a	0,98 (0,66) a
66%	1,54 (0,65) a	1,41 (0,64) a	2,47 (1,58) a

Letras diferentes representan diferencias significativas al 95%



Letras diferentes representan diferencias significativas al 95%

Figura 3.12: Contenido de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el compartimento piso forestal en los diferentes tratamientos de raleo de *Pinus taeda* de 20 años de edad.

Suelo

La vegetación que cubre el área donde se realizó la descripción del suelo está dominada por el bosque cultivado de *Pinus taeda* con sotobosque de plantas arbustivas y herbáceas. El basalto es el material de origen. El sitio posee un relieve normal, y corresponde a posición elevada con inclinación y escurrimiento medio. Su pendiente es de clase 3 siendo su inclinación entre 3 y 10%. Posee permeabilidad moderada, lo que en conjunto con su escurrimiento da como resultado un drenaje clase 4, el que se puede considerar condición óptima de drenaje natural, siendo ideal para los cultivos. Debajo de la plantación no existen problemas actuales de erosión, pero las condiciones del lugar permiten considerar una ligera erosión potencial. De la misma forma se puede observar erosión hídrica en los caminos aledaños a la plantación. El suelo que no posee riesgos de anegamiento y tampoco presenta pedregosidad ni manto rocoso cercano a la superficie.

La descripción del perfil mostró 5 horizontes hasta la profundidad en estudio que fue de 100 cm. Los límites de los horizontes minerales se distribuyeron de la siguiente forma:

Horizonte A: 0-10 cm. Límite de tipo claro y forma ondulada. Estructura predominante granular con algunos bloques subangulares de tamaño entre 1 y 4 cm, mientras que su consistencia es friable. Se observó una gran cantidad de raíces. No se observaron barnices, concreciones ni moteados. Color en suelo húmedo 2,5 YR 2,5/4 (pardo rojizo oscuro).

Horizonte BA: 10-30 cm. Límite de tipo gradual y forma ondulada. Predomina la estructura en bloques subangulares, apareciendo también agregados del tipo granular. El tamaño de la estructura predominante varía entre 2 y 5 cm, con agregados bien formados y definidos de grado moderado. Su consistencia es friable, no se observaron concreciones, barnices y moteados. Cantidad de raíces

muy abundante. Color en suelo húmedo 2,5YR 3/4 (Pardo rojizo oscuro).

Horizonte B1: 30-45 cm. Límite de tipo gradual y forma ondulada. Estructura en bloques subangulares con la presencia de algunos prismas. El tamaño de la estructura predominante varía entre 2 y 5 cm, con agregados bien formados y definidos de grado moderado. Su consistencia es friable, no se observaron barnices y moteados. Escasas concreciones. La cantidad de raíces es abundante, pero en menor cantidad que en el horizonte anterior. Color en suelo húmedo 2,5YR 3/5 (Rojo parduzco).

Horizonte B2: 45-65 cm. Límite de tipo gradual y forma ondulada. Estructura en prismas. El tamaño de la estructura predominante varía entre 2 y 5 cm, con agregados bien formados y definidos de grado moderado. Su consistencia es friable a firme. No se observaron barnices y moteados. Escasas concreciones. La cantidad de raíces es abundante. Color en suelo húmedo 2,5YR 3/4 (Pardo rojizo oscuro).

Horizonte B3: 65 a 100 cm. Estructura en prismas, media a gruesa, con agregados bien formados y definidos de grado moderado. Su consistencia es friable a firme. No se observaron barnices y moteados. Escasas concreciones. Aun se observa la presencia de raíces. Color en suelo húmedo 2,5YR 3/4 (Pardo rojizo oscuro).

Las determinaciones de laboratorio indicaron que el pH fue de 4,8 en los primeros 30 cm, mientras que la materia orgánica fue de 4,1% en los primeros 10 cm de suelo y 2,5% en el espesor 10 a 30 cm. La concentración de P total, respectivamente en los espesores 0-10, 10-30 y 30-60 cm fue de 306,8; 276,5 y 228,4 ppm, mientras que el P disponible para cada tratamiento se observa en la Tabla 3.9.

Densidad aparente

En todos los tratamientos la densidad aparente, como es de esperar, aumenta con la profundidad (Tabla 3.8).

Por otra parte, las diferencias observadas en las densidades aparentes de los distintos horizontes entre tratamientos no resultaron significativas (Tabla 3.8). Entre esas tendencias se halla la disminución del promedio de la densidad aparente con el aumento del raleo y la reducción del rango de cambio con el aumento de la profundidad.

Tabla 3.8: Densidad aparente del suelo (g.cm^{-3}) y desvíos estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.

Horizonte	Tratamiento		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
A	1,32 (0,09) a	1,26 (0,10) a	1,22 (0,08) a
BA	1,35 (0,08) a	1,27 (0,09) a	1,29 (0,09) a
B	1,30 (0,11) a	1,35 (0,08) a	1,30 (0,08) a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos
B: corresponde al horizonte B1 y los primeros 15 cm del horizonte B2

Concentración de P en el suelo

El análisis de variancia entre los tratamientos con diferentes intensidades de raleo de *Pinus taeda* de 20 años de edad no detectó diferencias significativas en la concentración de P (Tabla 3.9).

Tabla 3.9: Concentración promedio de P (ppm) y desvío estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.

Horizonte	Tratamiento		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
A	2,09 (0,29) a	2,35 (0,93) a	2,03 (0,37) a
BA	0,97 (0,06) a	0,87 (0,17) a	0,66 (0,14) a
B	0,44 (0,11) a	0,40 (0,05) a	0,35 (0,03) a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos
B: corresponde al horizonte B1 y los primeros 15 cm del horizonte B2

Contenido de P en el suelo

El contenido de P en el suelo decreció con la profundidad (Tabla 3.10).

No se observó significancia entre la intensidad de raleo y el contenido de fósforo para ninguno de los horizontes, a pesar de cierta tendencia a reducirse los promedios de dicho contenido con el aumento del raleo (Tabla 3.10).

Tabla 3.10: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y desvíos estándar (entre paréntesis) obtenido en los sitios con diferentes tratamientos de intensidad de raleo.

Horizonte	Tratamientos		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
A	2,76 (0,38) a	3,12 (1,07) a	2,61 (0,87) a
BA	2,47 (0,27) a	2,22 (0,46) a	1,76 (0,29) a
B	1,61 (0,37) a	1,56 (0,25) a	1,36 (0,14) a
Total	6,84 (0,91) a	6,89 (1,71) a	5,73 (0,97) a

Letras diferentes indican diferencias estadísticas al 95% entre tratamientos

B: corresponde al horizonte B1 y los primeros 15 cm del horizonte B2

Contenido total de P en el sistema

El contenido de fósforo en el sistema muestra una relación inversa con la intensidad de raleo, ya que a menor densidad arbórea hacia el final del turno la cantidad acumulada de este elemento es menor respecto de los tratamientos con mayor número de árboles (Tabla 3.11). Por otra parte, en los tres tratamientos el mayor contenido de fósforo se encuentra en el estrato arbóreo. El sotobosque (arbustivo + herbáceo) incrementa su participación porcentual con la intensidad del raleo hasta que en el tratamiento 66% representa el quintuplo (16,3%) del valor en el testigo (3,3%) (Tabla 3.11).

Tabla 3.11: Contenido promedio de P ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y participación porcentual del compartimento en el total del sistema (entre paréntesis), en relación a las intensidades de raleo.

Compartimento	Tratamiento		
	Testigo	33% de raleo	66% de raleo
Árboles	40,1 (70,6) a	31,6 (67,4) b	21,2 (54,9) c
Sotobosque arbustivo	0,17 (0,3) b	0,87 (1,9) b	4,55 (11,8) a
Sotobosque herbáceo	1,69 (3,0) a	1,70 (3,6) a	1,73 (4,5) a
Piso forestal	8,00 (14,1) a	5,79 (12,4) a	5,42 (14,0) a
Suelo	6,84 (12,0) a	6,89 (14,7) a	5,73 (14,8) a
Total	56,8 (100) a	46,85 (100) b	38,63 (100) b

Estimación de la exportación de P

Exportación por cosecha final

En la Tabla 3.12 se presentan los resultados del contenido de fósforo exportado mediante dos modalidades de cosecha, (FE y AE), en la cosecha final. También se observa el contenido de P remanente en el sistema luego de la cosecha.

Tabla 3.12: Contenido de P exportado y remanente ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el sistema luego de la cosecha final bajo las modalidades de fuste entero (FE) y árbol entero (AE) en relación a la intensidad de raleo.

Modalidad de cosecha		Tratamiento		
		Testigo	33% de raleo	66% de raleo
FE	Total exportado ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	29,24 (51,5) a	22,03 (47,0) b	13,19 (34,2) c
	Remanente en sistema ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	27,56 a	24,78 a	25,49 a
AE	Total exportado ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	40,10 (70,6) a	31,56 (67,4) b	21,25 (55,0) c
	Remanente en sistema ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	16,70 a	15,26 a	17,43 a

Entre paréntesis % de P exportado sobre el total del sistema. Letras diferentes indican diferencias significativas al 95%.

Exportación por raleos

La Tabla 3.13 muestra el volumen y peso seco de madera extraído en los raleos para cada uno de los tratamientos de intensidad de raleo.

Tabla 3.13: Volumen y peso seco de madera extraídos por raleo a los 8, 12 y 16 años en cada uno de los tratamientos de raleo.

Tratamiento / Edad (años)	Exportación de madera					
	$\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$			$\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$		
	8	12	16	8	12	16
33%	60,62	36,44	23,75	22,07	14,61	10,17
66%	129,58	34,75	42,28	47,17	13,93	18,10

Las exportaciones estimadas de P en cada intervención en los dos tratamientos de raleo se indican en la Tabla 3.14.

Tabla 3.14: Fósforo exportado en cada una de las intervenciones en cada uno de los tratamientos de intensidad de raleo de *Pinus taeda*.

Tratamiento /Edad (años)	Exportación de P (kg.ha ⁻¹)					
	Corteza			Fuste		
	8	12	16	8	12	16
33%	0,31	0,31	0,17	1,03	0,82	0,76
66%	0,65	0,29	0,31	2,20	0,78	1,35

El tratamiento 33% totaliza en los diferentes raleos 3,40 kg P.ha⁻¹ extraído del sistema, mientras que en el tratamiento 66% la extracción por raleo asciende a 5,59 kg P.ha⁻¹.

Exportación total en dos escenarios de cosecha

Con los valores de exportación por cosecha final y raleos, y de acuerdo a las dos modalidades de cosecha planteadas se ha estimado el total de P que se pierde del sistema por rotación (Tabla 3.15). Como es de esperar la modalidad cosecha de árbol entero provoca en todos los tratamientos mayores exportaciones de P de las plantaciones. En cuanto al efecto de las intensidades de raleo, se observa una disminución de la exportación total con el aumento de la intensidad de raleo.

Tabla 3.15: Contenido total de P (kg.ha⁻¹) extraído del sistema en cada uno de los tratamientos de raleo a lo largo del turno de rotación, considerando el escenario de fuste entero (FE) y árbol entero (AE) en corta final.

Tratamiento	Modalidad de cosecha	
	FE	AE
Testigo	29,24	40,10
33%	25,43	34,96
66%	18,78	26,84

Efecto de las pérdidas de P debido a distintas intensidades de raleo sobre el contenido y la estabilidad del P en las plantaciones de *Pinus taeda*

Los dos escenarios de intensidad de raleo-tipo de cosecha planteados, han permitido calcular las respectivas pérdidas de P asociadas. A continuación se evalúan los efectos sobre los contenidos de P del ecosistema forestal implantado con el objetivo de obtener indicios a futuro de posibles problemas nutricionales derivados de los distintos manejos planteados. Para ello, se emplearon índices que ponderan las pérdidas y la estabilidad nutritiva de la plantación.

Índice de exportación de P (IEP)

El cociente biomasa cosechada/mineralomasa P del estrato arbóreo aplicado a ambas modalidades de cosecha (extracción de FE y de AE) muestra diferencias entre los tratamientos de raleo. La mayor eficiencia en la cantidad de producto forestal extraído por unidad de nutriente exportado se obtiene en la cosecha FE para todos los tratamientos de raleo (Tabla 3.16). Comparando entre tratamientos, ambas modalidades de cosecha muestran un pequeño aumento de la eficiencia con el aumento de la intensidad de raleo.

Tabla 3.16: Índice de exportación de P para *Pinus taeda* de 20 años de edad en dos escenarios de cosecha (fuste entero y árbol entero). Incluye raleos y corta final.

Tratamiento	Índice de exportación (Mg biomasa.kg ⁻¹ P)	
	FE	AE
Testigo	8,9	8,1
33%	9,6	8,5
66%	10,5	8,9

AE: Árbol entero; FE: Fuste entero

Costo nutritivo de cosecha

El costo nutritivo de la cosecha, inversa del IEP, es la concentración ponderada de P en los tejidos cosechados. El mismo fue más bajo para las cosechas

de FE que de AE y se observó una tendencia a un decrecimiento de las concentraciones ponderadas con el aumento de la intensidad de raleo (Tabla 3.17)

Tabla 3.17: Costo nutritivo en P para el *Pinus taeda* de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (fuste entero y árbol entero). Incluye raleos y corta final.

Tratamiento	Costo nutritivo (kg P.Mg ⁻¹ biomasa)	
	FE	AE
Testigo	0,112	0,124
33%	0,105	0,118
66%	0,096	0,112

AE: Árbol entero; FE: Fuste entero

Índice de estabilidad del P en las plantaciones forestales a corta final

En la Tabla 3.18 se presentan los resultados para los diferentes escenarios. En la aplicación de éste índice solo se utilizan los datos de la corta final debido a que el contenido de P utilizado en el índice corresponde a la fecha de corta final. Como se ha indicado en Materiales y Métodos, el índice se ha aplicado considerando cuatro tipos de almacenajes de P: 1- Horizontes minerales del suelo (60 cm); 2- Perfil edáfico hasta 60 cm (piso forestal + horizontes minerales); 3- Perfil edáfico + residuos de cosecha; 4- Perfil edáfico + residuos de cosecha + sotobosque.

Las cuatro variantes del índice mostraron el mismo comportamiento por lo cual sólo se informan los resultados de las dos extremas (variantes 1 y 4; Tabla 3.18).

El índice manifestó una disminución con el aumento de la intensidad de raleo en ambos escenarios de cosecha; el aumento de la intensidad de raleo disminuyó el impacto negativo sobre los almacenajes de P en el sistema en 1,2 veces y 1,9 veces para 33% y 66% de raleo respectivamente en relación al testigo no raleado.

Por otra parte, la cosecha del árbol entero provoca mayor impacto negativo en los almacenajes de P que la cosecha de los fustes enteros en ambos tipos de

cosecha; la modalidad de cosecha FE es entre 1,5 y 2,3 veces menos impactante que la cosecha de AE.

La mayor estabilidad se observó cuando los cálculos se realizaron con el mayor contenido posible de P en el sistema sotobosque-suelo (variante 4); teniendo en cuenta el máximo contenido de P (variante 4) el índice resultó entre 2,6 (AE) y 4,0 (FE) veces menor que el cociente de la variante 1.

Resumiendo, el valor más conservador de éste índice se obtuvo en condiciones de cosecha de FE, con tratamiento de 66% de raleo y considerando una situación de campo en la que se suman al suelo mineral con su piso forestal los residuos de la cosecha y los materiales procedentes de los estratos inferiores de la plantación. En el extremo menos conservador de P indicado por el índice se encuentra la condición de 0% de raleo, cosecha de árbol entero y suelo mineral (Tabla 3.18).

Tabla 3.18: Índice de estabilidad (IE) del P para *Pinus taeda* de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (FE y AE), considerando las variantes 1 y 4.

Variante Modalidad de cosecha	IE (kg P exportado.kg ⁻¹ P suelo)			
	1		4	
	FE	AE	FE	AE
Tratamiento				
Testigo	4,27	5,86	1,06	2,40
33%	3,20	4,58	0,89	2,07
66%	2,30	3,71	0,52	1,22

Índice de P remanente para la rotación de la misma especie

La Tabla 3.19 muestra un aumento del valor del índice, calculado para suelo con contenido de P similar a la variante 4 del índice de estabilidad de P en plantaciones forestales, con el aumento de la intensidad de raleo poniendo en evidencia las tendencias expresadas con la aplicación del índice anterior, lo que permite destacar que el número potencial de rotaciones futuras sería mayor en la condición de raleo 66%, y cosecha fuste entero.

Tabla 3.19: Índice de P remanente (IPR) para la rotación de la misma especie en la plantación de *Pinus taeda* de 20 años de edad frente a dos escenarios de cosecha en corta final (FE y AE), incluido los raleos, en los diferentes tratamientos.

Modalidad de cosecha	IPR (kg P suelo.kg ⁻¹ P exportado)	
	FE	AE
Tratamiento		
Testigo	0,94	0,42
33%	0,97	0,44
66%	1,36	0,65

4. DISCUSIÓN

Biomasa arbórea a nivel de árbol individual

Los resultados de densidad básica de la madera muestran una tendencia creciente de esta variable respecto de la intensidad de raleo que no resultó estadísticamente significativa, lo que no permite llegar a conclusiones definitivas. Respecto a la densidad básica de la madera, si bien no en *Pinus taeda*, existen resultados contrapuestos de otros estudios, que muestran valores de densidad de la madera más altos a mayor espaciamiento (Simpson y Denne, 1997 [52]) y otros que indican que los raleos no modifican sustancialmente las propiedades de la madera (Hernández et al., 1996, citado por Goche Telles et al., 2003 [53]).

Crechi et al. (2001) [35] demostraron que el aumento de la intensidad de raleo estaba asociado a árboles de mayor diámetro al tiempo de la corta final. En este estudio se constató que el $DAP_{(1,30\text{ m})}$ fue la variable de crecimiento de mejor ajuste en relación a la biomasa de los diferentes compartimentos del árbol, lo que explica porqué las biomásas individuales aumentan con la intensidad de raleo. Similares resultados encontró Balboa et al. (2004) [54] en un estudio de plantaciones de *Pinus radiata* con diferentes intensidades de raleo a lo largo del turno de rotación.

El comportamiento de todos los compartimentos de la biomasa del árbol individual, mostró similar tendencia de aumento con el aumento del raleo; el tratamiento con 66% de raleo se diferenció de los restantes acumulando la mayor cantidad de biomasa por unidad arbórea. Este efecto debido a las prácticas silviculturales efectuadas a lo largo del turno de rotación, se ha atribuido a que el raleo regula la disponibilidad de acceso y uso de la luz, nutrientes y agua (Burkes et al. 2003 [30]). De esto se deduce que las plantas pertenecientes a los tratamientos con 66% de raleo hicieron uso de la mayor disponibilidad de los recursos, lo cuál condujo a mayor acumulación de biomasa en los diferentes compartimentos respecto del tratamiento testigo.

Se constató que además del aumento de biomasa por individuo, la intensidad de raleo produce cambios en las proporciones de las contribuciones de cada

compartimento arbóreo en que se midió la biomasa aérea. En el tratamiento de mayor apertura del dosel se observa menor porcentaje de fuste y mayor porcentaje de hojas sobre el total de la biomasa en el árbol, respecto de los tratamientos con mayor densidad arbórea. El incremento de la proporción de la biomasa foliar en relación a la biomasa total en el tratamiento 66% parece indicar que la mayor disponibilidad de espacio por individuo da lugar a mayor disponibilidad de luz y recursos edáficos que son aprovechados por los individuos arbóreos, en un contexto de menor competencia intraespecífica que permite una adecuada expresión de la arquitectura heredada de las plantas con mayor desarrollo vertical (profundidad) de la copa. Por el contrario en las condiciones de ausencia de raleo la competencia intraespecífica es notoria, con individuos frecuentes de DAP menor, con presencia de ejemplares más pequeños oprimidos, provocando una reducción de la profundidad de copa y una menor proporción foliar en ejemplares de similar edad. Este efecto fue también encontrado por Naidu et al. (1998) [55] en *Pinus taeda* quienes encuentran que los árboles oprimidos contenían mayor acumulación porcentual de biomasa en el fuste y una fuerte disminución en la biomasa de las hojas al compararlos con los dominantes.

Para la biomasa total del árbol individual en el compartimento fuste los resultados indicaron 78, 74 y 67 % respectivamente para los tratamientos Testigo, 33% de raleo y 66% de raleo. En todos ellos se observa, independientemente del tratamiento, que el fuste ocupa el mayor porcentaje de biomasa del árbol individual, resultados que coinciden con los encontrados por Rey et al. (2001) [56] quienes detectaron para *Pinus radiata* que el 73% de la biomasa total correspondió al fuste. También, en el citado trabajo, los porcentajes de distribución de la biomasa son similares a los encontrados en el presente estudio.

Las diferencias en las condiciones de competencia mencionadas en un párrafo anterior afectan los procesos involucrados en el desarrollo, morfología y composición de la copa. Los árboles oprimidos o aquellos que crecen en condiciones de espacio limitado poseen un reducido desarrollo de las ramas con posterior mortandad y desrame natural en el transcurso del tiempo, mientras que los que crecen con espacio adecuado desarrollan un sistema más extendido de ramas vigorosas y poseen menor mortandad natural de las mismas. A este efecto se puede

asociar el mayor valor absoluto y relativo de biomasa de los compartimentos de la copa en el tratamiento 66% de raleo. Xu y Harrington (1998) [57] realizaron un trabajo de distribución horizontal y vertical de las ramas de *Pinus taeda* de 12 años de edad donde pudieron comprobar que la distribución de la biomasa en dicho compartimento depende del diámetro y largo de las ramas.

Por último, la notoria mayor biomasa de conos en los individuos del tratamiento 66% de raleo, asociada a la biomasa de ramas, hace presumir que la apertura del dosel que permitió el desarrollo de copas más extensas, favoreció también el desarrollo reproductivo de los ejemplares respecto a los restantes tratamientos con mayor número de plantas de igual edad. Esto resulta de interés para la selección de densidad de rodales con la finalidad de instalar huertos semilleros.

Biomasa arbórea a nivel de rodal

El aumento del raleo produjo la reducción de la biomasa arbórea forestal y, como se ha dicho, el aumento de la biomasa individual. Por ello el testigo no raleado tuvo la mayor biomasa. Estos resultados coinciden con los encontrados por Balboa et al. (2004) [54] quienes detectaron que existe una alta relación inversa entre la intensidad de raleo y la biomasa al final del turno de corta. También encuentran los mismos resultados Rey et al. (2001) [56] quienes trabajaron con *Pinus radiata* de 35 años de edad y observaron que a mayor densidad de plantas existe una mayor acumulación de biomasa registrando 186,5; 245,0; 292,4 Mg.ha⁻¹ respectivamente con baja, media y alta densidad, coincidiendo la tendencia con el presente trabajo en el cuál se registraron 160,9; 250,0 y 323,3 Mg.ha⁻¹ respectivamente en baja (66% raleo), media (33% raleo) y alta densidad (0% raleo). Otros investigadores que encontraron la misma tendencia fueron Merino et al. (2003) [58] quienes trabajaron con *Pinus radiata* de 25 a 29 años de edad con calidades de sitio similares donde las densidades variaban de 411 a 1040 pl.ha⁻¹ y la biomasa total varió de 145,2 a 239,5 Mg.ha⁻¹ respectivamente en menor y mayor densidad. Si bien las tendencias de los mencionados autores coinciden con lo encontrado en el presente trabajo hay que resaltar que los valores de biomasa registrados por Merino et al. (2003) [58] son inferiores, lo cuál se puede atribuir a la diferencia estructural de cada una de las

especies y la edad de las plantaciones. Al observar los compartimentos individuales a nivel de rodal se puede apreciar que la principal diferencia la establece el compartimento fuste, ya que en el trabajo presentado por Merino et al. (2003) [58] la variación fue de 172,6 a 108,2 Mg.ha⁻¹, mientras que en el presente trabajo los valores fueron de 243,1 y 109,7 Mg.ha⁻¹, respectivamente en alta y baja densidad en ambos casos.

Los porcentajes de los diferentes compartimentos a nivel de rodal mostraron coincidencia con el trabajo realizado por Goya et al. (2003) [9]. El mismo se refiere a una plantación de 20 años de edad en el norte de la provincia de Misiones, con 1600 plantas por hectárea como densidad inicial sin haber recibido raleo alguno a lo largo del turno de rotación. Esta plantación se asemeja al tratamiento con mayor densidad que aquí se presenta con el cuál los porcentajes de distribución de biomasa poseen coincidencia.

El tratamiento testigo (sin raleo) superó en 2 veces la cantidad de biomasa arbórea aérea a nivel de rodal al tratamiento con 66% de raleo. Los resultados mencionados coinciden con los encontrados por Rodríguez Soalleiro et al. (2004) [59] quienes simularon el crecimiento de dos especies del género *Pinus* con diferentes regímenes silvícolas y determinaron que los raleos débiles suponen una mayor extracción al final del turno.

El decrecimiento de la masa foliar en el raleo 66%, comparado con el testigo y 33%, muestra que la plantación con raleo muy fuerte no tiene una superficie foliar que aproveche plenamente la luz disponible por unidad de área. Esto resulta de una incompleta ocupación de la superficie por los ejemplares remanentes al final de la rotación. Esta interpretación sugiere que, desde el punto de vista silvicultural el raleo 66% parece ser una opción que está desaprovechando recursos disponibles para la producción.

La mayor biomasa de conos en el tratamiento 66% de raleo, muestra que la reducción de la competencia intraespecífica parece ser una causa primordial de esa respuesta que lleva a una mayor producción de estructuras reproductivas por unidad

de área en individuos de similar edad. El mayor número de individuos con menor producción de biomasa conos no alcanza a compensar en los otros tratamientos a la producción de un menor número de individuos vigorosos en el sitio de mayor raleo. En relación a esto y lo expresado a nivel de árbol individual en éste trabajo, puede verificarse que se constata lo expresado por Metz (1965) [60], quien atribuye en su trabajo de biomasa de *Pinus taeda* de diferentes edades que el porcentaje de ramas entre los diferentes árboles apeados se debió a que los árboles contenían distinto largo y ancho de las ramas a consecuencia de la diferencia de densidad del rodal.

En el tratamiento 66% de raleo fue menor el contenido de biomasa de las ramas secas. Ello puede deberse a que en ese tratamiento las ramas vivas y órganos asociados de la copa disponen de condiciones ecológicas que aumentan su vida media y postergan la mortandad, respecto a los otros tratamientos. A la mayor competencia, en los otros tratamientos, se asocia una menor vida media, mortalidad temprana y retraso temporal de la caída de las ramas en la copa lo que aumenta su proporción relativa de ramas secas.

Concentración de P en la biomasa aérea de *Pinus taeda*

El orden decreciente de los compartimentos en relación con su concentración de P respondió a lo reportado por diferentes investigadores, ya que independientemente de la especie que se trate, las hojas, ramas finas, frutos y corteza poseen mayor concentración de nutrientes respecto del fuste y las ramas gruesas, como se constata en las plantas leñosas en general (Bosco Imbert et al., 2004 [61]; Fernández, 2002 [8]; Goya et al., 2003 [9], Goncálvez, 1995 [62]; Little y Shainsky, 1992 [63]; Madgwick y Webber, 1987 [64]). Las hojas y ramas finas representan sólo una pequeña porción de la biomasa total pero son capaces de contener hasta el 50% del P (Prescott, 2002 [65]).

Se ha publicado que la concentración de nutrientes en el compartimento hojas varía con la edad, la ubicación de éstas en el dosel y el estado competitivo del árbol (Binkley, 1993 [25]).

En éste trabajo los resultados muestran que los distintos tratamientos de raleo no ocasionan cambios significativos en la concentración foliar de P, aunque como se ha expresado existen indicios de diferencias en el estado de competencia de los tratamientos. Sí se encontró que la baja concentración de fósforo disponible en el suelo puede estar afectando la concentración en hojas, ya que el valor encontrado ($0,571 \text{ mg.g}^{-1}$) es inferior a los encontrados por Rubilar et al. (2005) [66] y Metz y Wells (1965) [65] quienes trabajaron bajo condiciones de suelo diferentes para la misma especie y rango de edad comprendida entre 20 y 22 años, cuyos valores de concentración de P fueron respectivamente $1,39 \text{ mg.g}^{-1}$ y $0,99 \text{ mg.g}^{-1}$. Por otro lado, la concentración de P encontrada en la madera del fuste ($0,114 \text{ mg.g}^{-1}$) fue semejante a los $0,13 \text{ mg.g}^{-1}$ y $0,11 \text{ mg.g}^{-1}$ encontrados por Rubilar et al. (2005) [66] y Metz y Wells (1965) [65] respectivamente.

Contenido de P en la biomasa arbórea aérea

Debido a que no existen diferencias significativas entre las concentraciones entre tratamientos de los distintos compartimentos, los contenidos de P en las plantaciones bajo distintos tratamientos de raleo se encuentran influidos principalmente por los valores de biomasa. No obstante las diferencias significativas de concentración de P entre compartimentos arbóreos determinan una contribución relativa distinta de cada uno de estos al total de P de las plantaciones.

A nivel de árbol individual el contenido de fósforo se asoció directamente con la intensidad de raleo, encontrándose mayor contenido de fósforo en la menor densidad arbórea. Asimismo la fracción contenida en las hojas, que representan del 2,6 al 4,3% de la biomasa total, aumentó del 12,7 al 18,1% entre el testigo y el 66% de raleo, como consecuencia de la mayor concentración de P en hojas respecto del fuste y la mayor biomasa foliar relativa en éste último tratamiento. Este aspecto resulta de importancia en la toma de decisiones sobre el manejo de los residuos de cosecha, de los cuales las hojas son un componente significativo, ya que pequeñas masas aportadas al suelo o perdidas, representan un impacto relevante en los almacenajes de P en suelos pobres. No obstante, la mayor fracción de P almacenada en los ejemplares arbóreos se encuentra en la madera del fuste. Debido a su menor

concentración en estos tejidos resulta en una menor participación porcentual (59 a 71% del total de P en la planta) respecto de la biomasa que representa (67 al 78% de la biomasa total individual), de manera que las cosechas de madera representan fuertes salidas de P del bosque independientemente de que su pérdida absoluta es dependiente de la estructura del rodal.

El contenido total de fósforo en la biomasa aérea del rodal varió en forma decreciente del tratamiento testigo al de 66% de raleo, respectivamente, con 40,1, 31,6 y 21,2 kg.ha⁻¹ de fósforo, de manera consistente con la reducción de la biomasa forestal en ese sentido.

Las hojas y fuste contribuyen en porcentaje al contenido de fósforo del rodal, de manera similar a lo expresado para los árboles individuales. Respecto de las hojas, según Jorgensen y Wells (1986) [24], el máximo contenido de P acumulado en este compartimento por unidad de terreno, a nivel de rodal, se da con el cierre de las copas de la masa arbórea. Tal como se presenta en este estudio el tratamiento testigo (sin raleo), permanece con el cierre de copas desde edades tempranas de la plantación y hasta la tala rasa, mientras que en el tratamiento con 66% de raleo el espacio aéreo que podría ocupar este compartimento se encuentra subutilizado.

La corteza representó entre 2 y 3% del contenido de fósforo presente en la biomasa aérea. Este valor indica que el *Pinus taeda* es una especie de bajo contenido de fósforo en este compartimento, por lo tanto, la no restitución de la corteza al sitio no supone una sustancial reducción de la exportación de fósforo (Merino, et al. 2003 [58]). El descortezado en campo es importante en aquellas especies que poseen alto contenido de nutrientes contenidos en la corteza (Poggiani, 1985 [67]). No obstante la función de la corteza en el piso forestal podría ser de interés en cuanto elemento de cobertura y de posible aporte de P orgánico al sistema bajo un manejo que haga un uso adecuado de los residuos de cosecha.

Exportación de P del sitio

Al ser el fósforo uno de los elementos esenciales en el crecimiento de las plantas y estar detectado como elemento crítico en sitios de la región de estudio (Goya et al. 2003 [9]), es necesario utilizar sistemas de cosecha que minimicen la exportación de este nutriente.

En un sistema tradicional de cosecha donde se realiza la extracción de fuste entero con corteza, dejando el resto de los compartimentos en el sitio, el contenido de fósforo exportado es de 29,2, 22,0 y 13,2 kg.ha⁻¹ respectivamente en los tratamientos testigo, 33 y 66% de raleo. Al efectuar la cosecha de árbol entero, donde todos los compartimentos son extraídos del sitio, en el mismo orden de tratamientos, el contenido de fósforo exportado del sitio asciende respectivamente a 40,1, 31,6 y 21,2 kg.ha⁻¹. Los valores absolutos son mayores debido a la mayor concentración de fósforo presente en los compartimentos de la copa. La misma tendencia fue encontrada por Rodríguez Soalleiro et al. (2004) [59] quienes estudiaron el fósforo exportado en *Pinus radiata* y *P. pinaster* y la cantidad total del elemento exportado de plantaciones manejadas con diferentes densidades. Los autores indican que el principal factor de estas diferencias son las distintas intensidades de raleo aplicadas, sin hacer mención los autores a diferencias de concentración en los diferentes tratamientos.

Los porcentajes de exportación de fósforo para árbol entero totalizaron 71, 67 y 55%, del total en el sitio, respectivamente de los tratamientos testigo, 33% y 66% de raleo, lo cuál manifiesta que el porcentaje de extracción de P del sitio depende de la densidad de la plantación. Estos valores resultan superiores a los encontrados por Van Lear y Kapeluck (1995) [68] quienes reportaron exportación del 49,9% del P total presente en la masa aérea, en *Pinus taeda* con 437 pl.ha⁻¹ y área basal de 19,1 m².ha⁻¹.

La exportación de madera disminuye el contenido de fósforo en el sitio entre dos momentos determinados, antes y después de la cosecha, dependiendo la cantidad que se exporte del sistema de cosecha utilizado y de la intensidad de raleo aplicado

durante el turno de rotación, como se mencionó anteriormente. Ahora bien, la cantidad remanente en el sistema depende de la modalidad de cosecha, pero no de la intensidad de raleo aplicada durante el turno de rotación.

Aún no se conoce cuánto afecta al suelo la mayor exportación de fósforo con la madera o si este elemento es limitante en la siguiente rotación, pero según reportes de Rubilar et al. (2005) [66], quienes efectuaron el seguimiento de la biomasa y el contenido de nutrientes de *Pinus taeda* en su primera y segunda rotación, detectaron diferencias estadísticas con mayores valores de concentración de P en la biomasa arbórea en la primera rotación, atribuyendo los autores que, en segunda rotación existió un potencial limitante de este elemento en el sitio.

Biomasa y contenido de P en el sotobosque

El raleo induce a cambios en el crecimiento del sotobosque pudiendo este mostrar importancia en la retención de agua y nutrientes (Nambiar, 1985) [69], siendo también capaz de retener una pequeña cantidad de los nutrientes liberados por los residuos luego de la cosecha, generando una potencial fuente de suministro de P durante los tres años posteriores a la cosecha (Palviainen, 2005) [70]. Ouro et al. (2001) [71] hacen mención que el pasto y el sotobosque pueden reducir la pérdida de nutrientes.

La disminución de la biomasa herbácea y el aumento en el estrato arbustivo con la mayor intensidad de raleo se vinculó a la mayor apertura del dosel en los sucesivos raleos.

En el estrato herbáceo la tendencia creciente no significativa en concentración de P con el aumento de la intensidad de raleo, probablemente se deba a la diferencia en la composición específica del estrato, ya que como especies predominantes en el tratamiento 66% se encontró una gramínea heliófila (*Paspalum sp.*) y el “Kuchuvirando” (*Setaria poiretiana*), mientras que en el tratamiento testigo se observó un tapiz de *Olyra latifolia*, siendo la misma una gramínea de sombra, junto a helechos como *Ctenitis submarginales* y *Thelypteris sp.*

En un rodal sin raleo el sotobosque alcanza su máximo cuando se produce el cierre del dosel arbóreo y, según Jorgensen y Wells (1986) [24], se pueden encontrar hasta 8 kg P.ha^{-1} en dicho sotobosque cuando llega este momento. Se ha señalado que, a partir de este cierre el contenido de fósforo en el sotobosque comienza a decrecer si la densidad arbórea se mantiene (Jorgensen y Wells, 1986) [24].

De los tratamientos estudiados el que mostró menor contenido de P fue el tratamiento testigo ($1,86 \text{ kg.ha}^{-1}$), cuya composición del sotobosque fue escasa, al igual que el sotobosque encontrado por Switzer et al. (1971) [72], quienes trabajaron con un rodal de *Pinus taeda* de 20 años de edad con 1000 pl.ha^{-1} .

En el tratamiento con 66% de raleo el fósforo contenido ascendió a $6,28 \text{ kg.ha}^{-1}$, ocasionado por el mayor desarrollo del sotobosque, generando mayor contenido de biomasa y por ende mayor contenido de P.

Necromasa y contenido de P en el piso forestal

El raleo mejora la oferta nutricional a los árboles remanentes y disminuye las eventuales limitantes de nutrientes que existían antes del mismo. El argumento más simple es que la cantidad de nutrientes disponibles para un determinado número de árboles a partir del raleo se distribuirá en un número más reducido de éstos. A ello debe sumarse que el material no aprovechado de los árboles raleados, mediante un sistema de cosecha de fuste entero, pasará a ser parte del piso forestal y futuro aporte de nutrientes que se suma a lo ya disponible. Este aporte se produce por medio de la descomposición del material orgánico mediante la cuál se adicionan nutrientes disponibles para las plantas. La calidad del piso forestal está relacionada con la disponibilidad de nutrientes, la edad, la especie en cuestión y manejo que se le de a la misma (Nambiar, 1985) [69].

La disminución del contenido de fósforo con el aumento de la intensidad de raleo puede deberse a diversos factores, pero entre los principales puede mencionarse el menor aporte de material por parte del tratamiento 66% de raleo de

menor biomasa arbórea. Otro factor que puede haber alterado el contenido de necromasa entre los tratamientos es la apertura del dosel, la cuál modifica las condiciones de humedad, temperatura, naturaleza y abundancia de los organismos descomponedores, influyendo sobre la velocidad de descomposición del material depositado sobre el piso (Palviainen, 2005 [70]; Bosco Imbert, 2004 [61]; Prescott 2002 [65]; Pérez Batallón et al. 1998 [73]; Couteaux 1995 [74]). Los resultados encontrados responden a la premisa de que la acumulación de materia orgánica depositada sobre el piso varía con la densidad de la plantación (Harold y Hocker, 1984) [75].

También es cierto que el menor aporte de biomasa forestal en el tratamiento con 66% de raleo puede compensarse, en parte, por el mayor aporte de sotobosque con mayor concentración de nutrientes respecto al *Pinus taeda*, lo cuál influye aumentando la velocidad de descomposición.

El valor de necromasa encontrado en los compartimentos L y H+F ($12,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en el tratamiento testigo es superior a los registrados en otros estudios. Zerpa (2005) [76] trabajó con *Pinus taeda* de 34 años de edad, cuyo suelo poseía en el Horizonte A (23 cm) $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de P disponible, y registró $9,74 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de necromasa en el piso forestal. Lockaby (1986) [77] realizó estudios en una plantación de *Pinus taeda* sin ralear a lo largo del turno de rotación de 18 años con $960 \text{ pl}\cdot\text{ha}^{-1}$, y totalizó $11,01 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de necromasa.

La mayor cantidad, si bien no significativa, de material encontrada en el piso forestal del tratamiento testigo respecto del tratamiento 66%, previo a la cosecha, probablemente también se deba a una vida media menor de la masa foliar generada por la estructura más cerrada que tomó el rodal, condicionando así la disponibilidad de luz a los órganos inferiores de las plantas, favoreciendo el desfronde.

La concentración de fósforo en la capa L mostró menor concentración que la capa H+F coincidiendo su tendencia con los resultados presentados por Zerpa (2005) [76] y Goya et al. (2003) [9]. Estos resultados estarían asociados al proceso de inmovilización de nutrientes por los microorganismos que participan de la

descomposición de una hojarasca pobre en nutrientes. El mayor valor encontrado en la capa H+F, corresponde a un material que lleva mayor tiempo descomponiéndose, por ende la actividad microbiana ha sido mayor y su biomasa, de relación C/Nutrientes más baja, está íntimamente unida a los restos vegetales influyendo en la concentración del material.

En el presente trabajo la biomasa foliar arbórea no fue separada en hojas vivas y hojas muertas, por lo tanto no se puede determinar la velocidad de retranslocación o proficiencia de reabsorción del P en las hojas. No obstante, con los datos de concentración promedio de P en hojas de la biomasa arbórea ($0,565 \text{ mg.g}^{-1}$) y la concentración de P en las hojas de la capa L del piso ($0,292 \text{ mg.g}^{-1}$), de los tres tratamientos, el valor estimado para *Pinus taeda* de 20 años es de 52%. Este valor resulta posiblemente una sobreestimación de la retranslocación foliar instantánea, ya que se calculó con hojas caídas y no senescentes, sin embargo no resulta demasiado diferente del 47% (45 a 52% según la posición de las hojas en la copa) para esta especie obtenido en otro estudio (Wells y Metz, 1963; citado por Kimmins, 1997 [78]). También es similar a los resultados encontrados por Ouro et al. (2001) [71] quienes en un trabajo acerca de la concentración de P en una plantación de *Pinus radiata* de 25 años de edad obtuvieron una eficiencia de reabsorción del 56%.

El contenido de nutrientes en el piso depende de la concentración de los mismos en las hojas, la retranslocación y la cantidad de biomasa caída (Nambiar, 1985) [69], a su vez, la cantidad de biomasa caída es influenciada por la densidad de la plantación (Baker, 1983) [79]. Independientemente del tratamiento, la acumulación de fósforo en el piso forestal depende, en parte, de la acumulación de material vegetal, lo cual resulta del balance entre la cantidad y calidad de los aportes al mantillo, de su concentración de P, de las condiciones de descomposición del mantillo y la dinámica de liberación/inmovilización de nutrientes. En el presente trabajo la acumulación en el tratamiento testigo (el de mayor acumulación) alcanzó los 8 kg.ha^{-1} , que se asemeja a los $7,1 \text{ kg.ha}^{-1}$ encontrados por Zerpa (2005) [76].

Al final del turno el tratamiento testigo acumuló 2 veces mas biomasa aérea que el tratamiento con 66% de raleo, por lo tanto, también retuvo mayor cantidad de

fósforo. Alcanzado el turno la exportación de P en el tratamiento testigo fue mayor que en el tratamiento 66% de raleo para ambas modalidades de cosecha, pero también el aporte al piso en todos los tratamientos fue superior en la modalidad FE, coincidiendo con los resultados encontrados por Rodríguez Soalleiro et al. (2004) [59], quienes simularon el crecimiento de dos especies del género *Pinus* con diferentes regímenes silvícolas de lo cuál determinaron que los raleos débiles exportaron mayor cantidad de P durante la tala rasa y aportaron mayor contenido de este elemento al piso forestal cuando se dejaban los residuos de cosecha.

Densidad aparente y contenido de P en el suelo

La premisa más importante cuando se trabaja con sistemas forestales es modificar lo menos posible el sitio, en particular no perder nutrientes del suelo para poder mantener la fertilidad del mismo y asegurar la productividad a largo plazo. Sin embargo, muchos nutrientes probablemente se pierdan por lixiviación, ó queden inmovilizados en formas complejas, ó sean tomados por competidores (Escudero y Mediavilla, 2003) [80].

Se encontró una tendencia ($p > 0,05$) con mayores valores de densidad aparente del suelo en el espesor 0-10 cm del tratamiento testigo. Esto puede estar influenciado por la mayor actividad biológica en el tratamiento con mayor apertura del dosel, generado por el mayor ingreso de energía lumínica y térmica al suelo. Esto, favoreció la presencia de mayor cantidad de agentes biológicos que mejoraron las condiciones de descomposición de la materia orgánica, favoreciendo así la aireación del suelo y por ende disminución de la densificación generada en la cosecha de la rotación anterior.

El P disponible es el 0,5% del P total del suelo. Por otro lado, no se conoce la intensidad de los flujos de reposición de fósforo total a fósforo disponible, por lo tanto, no se puede inferir acerca del efecto de los tratamientos sobre la concentración y el contenido de P disponible en el suelo.

Efecto de las prácticas sobre contenido de P en el sitio

Las actividades de raleo y cosecha afectan la disponibilidad y el ciclo de los nutrientes (Jorgensen y Wells 1986) [24], mientras que la pérdida de nutrientes por cosecha puede tener un efecto dramático sobre el contenido remanente de éstos en el sitio (Nambiar 1985) [69]. Grigal (2000) [81] indica que la cantidad de nutrientes que son removidos varía con la especie y con la cantidad y la clase de los productos a cosechar.

El mayor IEP en el método de cosecha FE resulta del efecto de calcular este índice sobre la base exclusiva de materiales leñosos, cuya concentración de nutrientes es inferior a la de los tejidos más finos que integran las copas arbóreas y que participan del cálculo del IEP para la modalidad de cosecha AE. Estas diferencias se reflejan en el costo nutritivo de la cosecha que está representado por los promedios ponderados de los tejidos que integran los compartimentos de la biomasa considerados en cada cálculo. Los productos de raleos incorporados en el cálculo son exclusivamente leñosos y las concentraciones de P empleadas en el cálculo de las mineralomasas de los mismos (Goya et al 2004 [40]; también observados en este estudio) muestran que la concentración de P en la madera se incrementa con la edad de las plantas de *P. taeda*. Ello sumado al aumento en la proporción de la contribución de los raleos a la biomasa total cosechada en la rotación, con el aumento de la intensidad de raleo, provoca un incremento de las eficiencias observadas para ambas modalidades de cosecha.

La adición del capital de P del sotobosque al almacenaje de P en el suelo permite destacar la contribución del mismo al ciclo del P, inmediato o mediato. El grado de reducción de los índices de estabilidad de P en el ecosistema forestal respecto de ambos índices de estabilidad ya descritos resalta aquella contribución. Las plantas del sotobosque concentran y contienen temporalmente nutrientes absorbidos desde el suelo en sus tejidos y son fuente de materia orgánica lábil que puede liberar nutrientes de manera más o menos rápida durante la descomposición posterior a la caída. El resultado de ese aporte permite reducir el índice a valores cercanos a la mitad del calculado con el suelo mineral.

Los resultados encontrados a través del índice de estabilidad del P en las plantaciones forestales para las diferentes modalidades de cosecha coincide con Worrel y Hampson (1997) [82] quienes dicen que la exportación de nutrientes con la modalidad de cosecha de árbol entero supera entre dos y tres veces la exportación con la modalidad de cosecha de fuste entero. Este índice resalta la importancia de dejar los residuos de la copa sobre el terreno durante la cosecha final. Por otra parte, el mismo índice cuando se analiza incorporando el contenido de P en todos los compartimentos supera hasta 4 veces al homólogo incorporando solamente el P disponible del suelo mineral. Esto refleja la importancia del manejo posterior de los residuos, ya que al ser suelos pobres en P se debe mantener la mayor cantidad posible sobre el terreno para mantener la capacidad productiva del sitio y/o atenuar el impacto negativo ocasionado por la cosecha.

El fósforo remanente en el sistema suelo (P disponible en horizontes minerales + piso forestal + residuos de cosecha), independientemente del tratamiento de raleo y la modalidad de cosecha, no alcanzaría para suplir las necesidades de la futura plantación de la misma especie. Se debe considerar que esta aseveración tiene la limitación de no tener en cuenta ingresos ni pérdidas de este elemento a lo largo del turno de rotación, más allá de los previstos durante los raleos y la cosecha final, lo cual no es estrictamente cierto. Goya et al. (2003) [9] identificaron en una plantación de *Pinus taeda* al final del turno de rotación que el fósforo es uno de los elementos críticos desde el punto de vista nutricional. Sin embargo, debe considerarse que el número de rotaciones que pueden realizarse no sólo dependen de las extracciones de la vegetación arbórea y su tolerancia a los cambios en el suelo, sino de los mecanismos de reaprovisionamiento nutritivo del suelo a través de procesos que favorecen formas de P total no disponible a P disponible, retorno, intervención de organismos, aportes meteorológicos y otros ingresos, y a su balance con los egresos de cosechas, manejo de residuos y vías naturales de salida.

CONCLUSIONES

Las plantaciones estudiadas de *Pinus taeda* de 20 años de edad del norte de la provincia de Misiones, raleadas cada 4 años, mostraron a nivel de árbol individual, que la biomasa arbórea aérea responde en forma positiva al aumento de la intensidad de raleo. A nivel de rodal y bajo las mismas condiciones la acumulación de biomasa se asoció negativamente con el aumento de la intensidad de raleo. La concentración de P en el estrato arbóreo no se diferenció entre tratamientos para cada compartimento, por lo cuál el contenido de este elemento respondió a las intensidades de raleo con la misma tendencia encontrada para la biomasa a nivel de árbol individual y rodal respectivamente.

La apertura del dosel arbóreo permitió mayor disponibilidad de recursos para el estrato inferior. Esto favoreció el mayor crecimiento del sotobosque arbustivo en el tratamiento de mayor intensidad de raleo (66% de raleo), y provocó que se diferencie significativamente del tratamiento sin ralear en cuanto a contenido de P. En el tratamiento testigo la disponibilidad de recursos disminuye, lo que hizo que el contenido de este elemento en el sotobosque arbustivo sea insignificante respecto del contenido de P en el sistema.

El sotobosque herbáceo no manifestó diferencias de contenido de fósforo entre tratamientos de intensidad de raleo.

Si bien la menor intensidad de raleo aportó mayor cantidad (no significativa) de material vegetal desde el estrato arbóreo al piso forestal y, la concentración de P fue similar entre tratamientos, las diferencias en contenido de este elemento no se diferenciaron estadísticamente, con lo cuál la intensidad de raleo no alteró el contenido de P en el piso forestal.

El contenido de fósforo disponible en el suelo no se vio afectado por los tratamientos de intensidad de raleo.

La suma del contenido de fósforo en todos los compartimentos mostró que las diferentes intensidades de raleo generaron diferencias en el contenido de P en el sistema, donde el tratamiento sin raleo se diferenció significativamente con mayor cantidad que los tratamientos raleados.

Independientemente del tratamiento de raleo que se aplicó, el fósforo remanente en el sitio se pudo considerar como elemento crítico para la próxima rotación, por ello su conservación se debe tener en cuenta en la elección de las técnicas post cosecha de preparación de terreno, dado que las condiciones ambientales favorecen la descomposición de la materia orgánica y la rápida circulación de nutrientes, pudiendo exportarse o perderse P si la técnica elegida favorece la liberación del mismo de la materia orgánica y la exposición de la superficie del terreno forestal.

Los índices calculados permitieron valorar la estabilidad nutricional del fósforo e identificar que el impacto sobre los recursos de P del sistema forestal aumentan con la intensidad de raleo, las cosechas que se realicen bajo sistemas de árbol entero y el grado de deterioro del sotobosque, piso forestal y reducción de aportes de residuos de cosecha.

BIBLIOGRAFÍA

1. SAGPyA. Inventario Nacional de plantaciones forestales. <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/forestacion/inventario/Inventario2.htm> (2001).
2. Fassola, H.; M. Gelid de Ruibal y P. Ferrere. Predicción del diámetro sobre muñón en *Pinus taeda* L. en el Dpto. Iguazú, Misiones. Novenas Jornadas Técnicas Forestales. Eldorado, Misiones, Argentina (2002b).
3. Crechi, E.; H. Fassola; F. Moscovich; R. Fernández; R. Friedl y J. Falher. Efecto de la intensidad y oportunidad de raleo en *Pinus taeda* sobre la producción de Madera en el Noroeste de Misiones. 11^{as} Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – FCF, UNaM – EEA Montecarlo, INTA (2004).
4. Fassola, H.; P. Ferrere y F. Rodríguez. Predicción de la producción de un pastizal bajo distintas estructuras de canopia de *Pinus taeda* L. En el nordeste de Corrientes, Argentina. Bosque 23(1):3-9 Valdivia, Chile (2002a).
5. Gauchat, M.; D. Alegranza y G. Rodríguez. Productividad de fuentes semilleras comerciales locales y externas de *P. taeda* en el NEA. Resultados al tercer año. Décimas Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales - Facultad de Ciencias Forestales -UNaM- EEA Montecarlo – INTA Eldorado, Misiones, Argentina (2003).
6. Eskiviski, E.; J. Agostini; R. Toloza y O. de Coll. Daños producidos por el pulgón del pino *Cinara atlantica* w. (hemiptera: aphididae) en plantas jóvenes de *Pinus taeda* L. 11as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – FCF, UNaM – EEA Montecarlo, INTA (2004).
7. Lupi, A.; R. Fernández; R. Pezutti; N. Pahr; A. Hernandez y R. Martiarena. Evaluación de técnicas de preparación del terreno para el cultivo del *Pinus taeda* L y *Pinus elliottii* Engelm en suelos hidromorficos. 11as Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales – FCF, UNaM – EEA Montecarlo, INTA (2004).

8. Fernández, R.; P. Mac Donagh; A. Lupi; R. Martiarena y P. Cortez. Relación entre la compactación de suelos y el crecimiento de una plantación de *Pinus taeda* de 8 años de segunda rotación, en Misiones, Argentina. ASAE Annual International Meeting / CIGR XVth World Congress Sponsored by ASAE and CIGR Hyatt Regency Chicago, Chicago, Illinois, USA (2002).
9. Goya, J.; C. Pérez; J. Frangi y R. Fernández. 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 (2003)
10. Vázquez, S. y A. Galmarini. El P en Ultisoles de la provincia de Corrientes: fracciones de P inorgánico, P total y orgánico. Ciencia del suelo 3(1-2) 39-42 (1985).
11. Pettri, M. y M. Acuña. Adsorción diferencial de P en dos suelos de Misiones. XIV Congreso argentino de la ciencia del suelo. Mendoza p177-178 (1993).
12. Pettri, M.; M. Acuña y A. Sosa. Isotermas de adsorción de P, ensayos de maceta y campo en un alfisol. XV Congreso argentino de la ciencia del suelo Santa Rosa, La Pampa 145-146 (1996).
13. Vázquez, S. y L. Morales. Adsorción de P por suelos ácidos de Misiones (Argentina). Ciencia del suelo 18(2)89-94 (2000).
14. Fernández, R.; A. Lupi y N. Pahr. Aptitud de las tierras para la implantación de bosques. Provincia de Misiones. Yvyretá 9: 41 - 49 (1999a).
15. Pahr, N.; R. Fernández y A. Lupi. Potencial de productividad de los suelos del nordeste de Corrientes para el *Eucalyptus grandis*. Yviraretá 10: 91-92 (2000).
16. Lupi, A.; R. Fernández; H. Reis; J. Bernio; J. Elizaul y H. Reboratti. Evaluación inicial de técnicas de establecimiento post-tala rasa sobre el crecimiento inicial del *Eucalyptus grandis hill. ex maiden* en el noreste Argentino. Congreso Mundial IUFRO. Malaysia (2000).

17. Fernández, R.; A. Lupi; N. Pahr y C. Domeq. Respuesta del Kiri (*Paulownia spp.*) a la fertilización y al encalado. Resultados a los 19 meses de edad. *Yvyrareta* 8: 92-94 (1997).
18. Fernández, R.; F. Rodríguez Aspillada; A. Lupi; A. Hernández y H. Reis. Efectos de diferentes prácticas de preparación del terreno y fertilización sobre el crecimiento inicial del *Pinus spp* en el NE argentino. *Bosque* 20(1): 47-55 (1999b).
19. Fernández, R.; F. Rodríguez Aspillada; A. Lupi; E. López; R. Pezzutti; E. Crechi; N. Pahr; M. Natiuck y Cortez, P. Respuesta del *Pinus taeda* y la *Araucaria angustifolia* a la adición de N, P y K en la implantación. Asociación Forestal Argentina. Virasoro, Corrientes. 16 p. (2000a).
20. Aparicio, J.; J. López; F. Dalla Tea; L. Finker y C. Monticelli. Respuesta de las especies de mayor importancia foresto-industrial a la fertilización con NPK en los suelos arenosos de la provincia de Corrientes. Proyecto de Investigación aplicada PIA 37/96. 25 p. (1999).
21. Martiarena, R.; R. Fernández; D. Alegranza; N. Pahr y A. Lupi. Fertilización de *Araucaria angustifolia* (Bert.) o. Ktze en Misiones, Argentina. Variantes de dosis y momento de aplicación. XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos, Argentina (2002a).
22. Martiarena, R.; R. Fernández; N. Pahr; A. Lupi; D. Alegranza y A. Von Wallis. Fertilización y crecimiento de *Araucaria angustifolia* en Misiones, Argentina. Novenas Jornadas Técnicas Forestales. Eldorado, Misiones, Argentina (2002b).
23. Tiarks, A.; E. Nambiar y C. Cossalter. Site management and productivity in tropical forest plantations. Occasional paper N° 16. Center for International Forestry Research (CIFOR) (1998).

24. Jorgensen, J. y C. Wells. Foresters' primer in nutrient cycling. A loblolly pine management guide. Southeastern Forest Experiment Station research Triangle Park, North Carolina (1986).
25. Binkley, D. Nutrición Forestal. Prácticas de manejo. Editorial LIMUSA. (1993).
26. Miller, H. G. Dynamics of nutrients cycling in plantation ecosystems. Nutrition de plantation forest. Edited by Bowen and Nambiar. Academic press inc. (London) LTD. (1984).
27. Piccolo, G.; L. Giuffré; C. Pascale y Heredia, E. Ciarlo. Fracciones de fósforo orgánico edáfico en agroecosistemas subtropicales. Informe técnico N° 77, Estación Experimental Agropecuaria Cerro Azul. (2002).
28. Pritchett, W. Suelos Forestales. Propiedades, Conservación y Mejoramiento. Editorial Limusa. 634 pg. (1986).
29. Carlyle, J. Nutrient management in a *Pinus radiata* plantation alters thinning: the effect of thinning and residues on nutrient distribution, mineral nitrogen fluxes, and extractable phosphorus. Can. J. For. Res. 25: 1278-1291 (1995).
30. Burkes, E.; R. Will; G. Barron; R. Teskey y S. Barry. Biomass partitioning and growth efficiency of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stand of different planting densities. FOR. SCI 47 (2): 224-234 (2003).
31. Fassola, H.; N. Pachas y S. Lacorte. Estimación de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) y niveles de sombra bajo dosel de *Pinus taeda* en Misiones y NE de Corrientes. 3° Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano. Corrientes, Argentina (2005).
32. Herrera, M.; J. Del Valle y S. Orrego. Biomasa de la vegetación herbácea y leñosa pequeña y necromasa en bosques tropicales primarios y secundarios de

Colombia. Simposio Internacional Medición y Monitoreo de la captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia, Chile (2001).

33. Soil Survey Staff. Soil Taxonomy. United States Department of Agriculture Handbook, 436, Washington, D.C. (1975).

34. INTA. Atlas de suelo de la Republica Argentina. Provincia de Misiones, tomo II, 111-154 (1990).

35. Crechi, E.; R. Frida; R. Fernández y J. Falher. Efecto de la intensidad de raleo en Pinus taeda L. sobre el crecimiento y la producción en el Noroeste de Misiones. Informe Técnico N° 35. EEA Montecarlo, INTA (2001).

36. Whittaker, R. y G. Woodwell. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest, New York. J. of Ecol. 56: 1-25 (1968).

37. Mackay, E. Dasometría. Teoría y técnica de las mediciones forestales. 760 pp. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid (1968).

38. IRAM 9544. Maderas. Método de determinación de la densidad aparente (1965).

39. Pereyra, O. y M. Gelid. Estudio de la variabilidad de la densidad básica de la madera de Pinus taeda para plantaciones de Misiones y Norte de Corrientes. 9^{as} Jornadas técnicas Forestales. INTA-FCF-MEYRNRYT. Eldorado, Misiones, Argentina (2002).

40. Goya, J.; J. Frangi; R. Fernández y R. Martiarena. Ciclo de nutrientes en plantaciones de Pinus taeda en el norte de la provincia de Misiones. II estudio de diferentes edades de plantación. En: Investigación Forestal al servicio de la producción II. SAGPyA (2004).

41. Jhonson, C. y A. Ulrich. II. Analytical Methods. for use in plant analysis. 26-27. CERT. Agric. Exp. St. Bull. 766. (Modificada por Carlos LLano, Berkeley, USA) (1959)
42. Etchevehere, P. Normas de reconocimiento de suelos. 2º edición actualizada. Secretaría de Agricultura y ganadería. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Departamento de suelos. Publicación N° 152 (1976).
43. Fernández, R.; A. Lupi; N. Pahr; H. Reis; H. O'Lery; M. Gelid y S. Martínez. Técnicas de manejo de residuos de cosecha para el establecimiento forestal y su impacto sobre la condición química de los suelos rojos del noreste de Argentina. Avances en Ingeniería Agrícola. 2000. Ed. Facultad Agronomía. (UBA). pp 243:248 (2000b).
44. Bray, R. y L. Kurtz. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59: 39-45 (1945).
45. Fernández, R.; P. Mac Donagh; A. Lupi; E. Crechi; J. Bernio; R. Martiarena y M. Marek. Compactación del suelo y su relación con el crecimiento de la segunda rotación del *Pinus taeda*, en Misiones, Argentina. Silvoargentina II (2001b).
46. Santana, R.; N. Barros y J. Neves. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *E. saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. Árvore vol. 26 n° 4. Viçosa (2002).
47. Fernández, R. Estrategias para minimizar los impactos de la cosecha forestal. Balance de nutrientes y condición física del suelo. Actas XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos, Concordia (2003).
48. Raison, R.; P. Khanna y W. Crane. Effects of intensified harvesting on rates of nitrogen and phosphorus removal from *Pinus radiata* and Eucalyptus forests in Australia and New Zealand. N.Z.J. For. Sci. (12):394-403 (1982).

49. Föllster, H. y Khanna. Dynamics of nutrient supply in plantation soil. Pp. 339-378 en: EKS Nambiar y AG Brown (edes). Management of soil nutrient and water in tropical plantation forest. CSIRO. Canberra (1997).
50. Steel, R. y J. Torrie. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Second Edition. 632 pg. (1980).
51. Baskerville, G. Use of logarithmic regression in the estimation of plant biomass. Canadian Journal of Forestry. 2:49-53 (1972).
52. Simpson, H. y P. Denne. Variation of ring width and specific gravity within tree from unthinned Stika spruce spacing trial in Clocaenog, North Wales. Forestry 70: 31-45 (1997).
53. Goche Telles, R.; A. Velásquez y A. Borja. Densidad básica y ancho de anillos de la madera de *Pinus patula* antes y después de un aclareo. INCI. Vol 28, nº 12, p. 705-709. ISSN 0378-1844 (2003).
54. Balboa, M.; R. Rodríguez; J. Alvarez y A. Merino. Temporal variations and distribution of carbon stocks in above-ground tree biomass of *Pinus radiata* and *Pinus pinaster* pure stands under different silvicultural alternatives. International IUFRO. Conference on sustainable Harvest scenarios in forest management. Tale, the Low Tatras, Slovakia, 25-27 (2004).
55. Naidu, S.; E. De Lucia y R. Thomas. Contrasting patterns of biomass allocation in dominant and suppressed loblolly pine. Can. J. For. Res. Vol. 28 (1998).
56. Rey, C.; J. Brañas; R. Rodríguez y A. Merino. Biomasa y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don del norte de España. III Congreso Forestal Español “Sierra Nevada 2001” Granada, España (2001).

57. Xu, M. y T. Harrington. Foliage biomass distribution of loblolly pine as affected by tree dominance, crown size, and stand characteristics. *Can. J. For. Res.* 28: 887-892 (1998).
58. Merino, A.; C. Rey; J. Brañas y R. Rodríguez. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Invest. Agrar.: Sist. Recur. For.* (2003) 12 (2), 85-98 (2003).
59. Rodríguez Soalleiro, R.; M. Balboa; J. González; A. Merino y F. Sánchez. Efecto de la silvicultura en la extracción de nutrientes a lo largo del turno en plantaciones de tres especies de crecimiento rápido en el norte de España. *Invest Agrar: Sist Recursos Forestales* 13 (3) (2004).
60. Metz, L. y C. Wells. Weight and nutrient content of the aboveground parts of some loblolly pines. U. S. Forest Service Research Paper SE-17 (1965).
61. Bosco Imbert, J.; J. Blanco y F. Castillo. Gestión forestal y ciclos de nutrientes en el marco del cambio global. *Ecología de bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Pgs 479-506. Ministerio de medio ambiente. EGRAF S. A. Madrid (2004).
62. Gonçalves, J. Efeito de cultivo mínimo sobre a fertilidade do solo e ciclagem de nutrientes. 1º Seminario sobre cultivo mínimo do solo em florestas (1995).
63. Little, S. y L. Shainsky. Distribution of Biomasa and Nutrients in lodgepole Pine/Bitterbrush ecosystems in Central Oregon. Forest Service Research Paper PNW-RP 454 (1992).
64. Madgwick, H. y B. Webber. Nutrient renewal in harvesting mature *Pinus radiata*. *NZ Forestry*. November 1987; 15-18 (1987).
65. Prescott, C. The influence of the forest canopy on nutrient cycling. *Tree Physiology* 22, 1193-1200 (2002).

66. Rubilar, R., H. Lee Allen y D. Kelting. Comparison of biomass and nutrient content equations for successive rotations of Loblolly pine plantations on an Upper Coastal Plain Site. *Biomass and Bioenergy* 28:548-564 (2005).
67. Poggiani, F. Nutrient cycling in *Eucalytus* and *Pinus* plantations ecosystems. Silvicultural implications. IPEF, Piracicaba, (31) (1985).
68. Van Lear, D. y P. Kapeluck. Above and below stump biomass and nutrient content of a mature loblolly pine plantation. *Can. J. For. Res.* 25: 361-367 (1995).
69. Nambiar, E. Critical processes in forest nutrition and their importance for management. *Research for Forest Management. Proceedings of a conference, Division of forest research, CSIRO* (1985).
70. Palviainen, M. Logging residues and ground vegetation in nutrient dynamics of a clear-cut boreal forest. *Dissertations forestalls 12*. To be presented, with the permission of the faculty of Forestry of the University of Joensuu, for public criticism in Auditorium C2 of the University, Yliopistokatu 4, Joensuu, on 25th (2005).
71. Ouro, G.; P. Pérez Batallón y A. Merino. Effects of silvicultural practices on nutrient status in a *Pinus radiata* plantation: Nutrient export by tree removal and nutrient dynamics in decomposing logging residues. *Ann. For. Sci.* 58:411-422 (2001).
72. Switzer, G. y L. Nelson. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation ecosystems: The first twenty years. *Journal contribution n° 2120 of the Mississippi Agr. And For Exp. Sta., State College, Miss* 39/62 (1971).
73. Pérez Batallón, P.; G. Ouro; A. Merino y F. Macías. Descomposición de material orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO₂ en un suelo forestal bajo diferentes manejos silvícolas. *Edafología. Volumen 5*. 83-93 (1998).

74. Coueteaux, M.; P. Bottner y B. Berg. Litter decomposition, climate and litter quality. TREE Vol. 10 n° 2 (1995).
75. Harold, W. y J. Hocker. Introducción a la biología forestal. AGT. Editor SA. México (1984).
76. Zerpa, J. Understanding forest floor accumulation and nutrient dynamics in a Loblolly Pine plantation regenerated with varying forest floor and slash retention. Graduate Program in the Department of forestry at North Carolina State University under the guidance of Dr. Lee Allen (2005).
77. Lockaby, B. Nutrient dynamics in the litter fall and forest floor of an 18-year-old loblolly pine plantation. Can. J. For. Res. 16:1109-1112 (1986).
78. Kimmis, H. Balancing act--Environmental issues in forestry (2da ed.). Vancouver, BC: University of British Columbia (1997).
79. Baker, T. Dry, matter, nitrogen, and phosphorus content of litter fall and branch fall in *Pinus radiata* and *Eucalyptus* forest. New Zealand Journal of Forestry Science 13(2): 205-21 (1983).
80. Escudero, A. y S. Mediavilla. Dinámica interna de los nutrientes. Ecosistemas. Año XII, N° 1 (2003).
81. Grigal, D. Effects of extensive forest management on soil productivity. Forest Ecology and Management 138 167-185 (2000).
82. Worrel, R. y A. Hampson. The influence of some forest operations on the sustainable management of forest soils – a review. Forestry, Vol. 70, N° 1 (1997).