

Universidad Nacional de La Plata
Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales

Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la
eficiencia de uso y conservación de los
nutrientes en función de las condiciones
edafoclimáticas, edad y manejo de las
plantaciones de *Pinus taeda* L. en la
Mesopotamia Argentina

Rodolfo A. Martiarena
Ingeniero Forestal (MSc.)

Tesis para optar por el grado de
Doctor de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, UNLP

Director: Dr. Jorge Luis Frangi
Co Director: Dr. Marcelo Fabián Arturi

Estación Experimental Agropecuaria Montecarlo – INTA
Montecarlo, Misiones, Argentina
Laboratorio de Investigación de Sistemas Ecológicos y Ambientales –LISEA- UNLP
La Plata, Buenos Aires, Argentina

La Plata, Abril de 2016

*“Millones vieron la manzana
caerse, pero Newton se
preguntó por qué.”*

Bernard Baruch

AGRADECIMIENTOS

Un especial y sincero agradecimiento a mi director de Tesis, el Dr. Jorge Frangi. Su capacidad y conocimientos científicos, avalados por la seriedad y responsabilidad que lo caracterizan, fueron la principal motivación para hacer, de esta Tesis doctoral, un divertido proceso de aprendizaje y crecimiento profesional.

Un gran reconocimiento y agradecimiento a mi codirector de Tesis, el Dr. Marcelo Arturi. Con mucho entusiasmo y profesionalismos, siempre ha estado dispuesto para hacer fácil, lo difícil.

Al señor Otto Knebel, quien ha sido soporte fundamental en actividades de campo y acondicionamiento de muestras.

A la Lic. Mariana Dabadie por su invaluable colaboración en el acondicionamiento y procesamiento de muestras de material vegetal.

A mis compañeros de trabajo, quienes en diversas oportunidades participaron desinteresadamente colaborando con actividades de campo, laboratorio e intelectual.

Al laboratorio de Química del International Institute of Tropical Forestry (IITF), USDA-Forest Service, Puerto Rico, por su colaboración en el marco del Convenio de Cooperación de Largo Plazo existente entre la Universidad Nacional de La Plata y el IITF- USDA-Forest Service. Se agradece al Dr. Ariel E. Lugo, Director del IITF por su soporte permanente, y a Mary Jeanne Sánchez, Directora del Laboratorio Químico de IITF, y su personal (Edwin López, Maribelis Santiago, Carmen Rivera y María Rivera) por su entusiasta y profesional tarea analítica.

Se agradece al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Por un lado, por facilitar los medios y fondos para la realización de las tareas a través de diferentes proyectos. Por otro lado, por facilitar datos que complementaron la base de datos analizadas en esta Tesis.

A las empresas LIPSIA SA, Laharrague Chodorge SA, Forestal Bosques del Plata SA, Papel Misionero SA, Taeda SA y a los señores Eduardo DeCoulom, Eugenio Kimmich y Ernesto Reig por facilitar el ingreso a lotes de su propiedad para realizar los trabajos de campo y respectivos muestreos.

El mayor de los agradecimientos, para mi esposa e hijo, quienes supieron entender mi ausencia en períodos de campañas de campo o en cada viaje a la ciudad de La Plata.

RESUMEN GENERAL

Introducción y Objetivos. El objetivo de la presente Tesis fue determinar el efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina.

Materiales y Métodos. El trabajo se realizó entre los 28° 30' S, en la provincia de Corrientes, hasta los 25° 30' S, en la provincia de Misiones. Se seleccionaron 31 sitios con plantaciones de *P. taeda* entre 3 y 25 años de edad. Los 31 rodales fueron agrupados de acuerdo a la regionalización y el tipo de suelo. Se realizaron 3 agrupamientos que incluyeron: 1) plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos en el norte de la zona de estudio (Ron), 2) plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos en el norte de la zona de estudio (Pe) y, 3) plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos en el sur de la zona de estudio (Ros). Para determinar las condiciones meteorológicas bajo las que crecieron cada una de las plantaciones, se recopilaron los datos meteorológicos históricos de 5 estaciones meteorológicas distribuidas a lo largo de la zona de plantación. En cada uno de los 31 rodales se tomaron muestras de suelo en cada horizonte del perfil para determinar la concentración de C, N, P, K, Ca, Mg, Fe y Mn. Se determinó la densidad aparente del suelo y el contenido de cada nutriente. En el estrato arbóreo se midieron las variables dasométricas de las plantaciones y se calculó el índice de sitio (IS) en cada una de ellas. Luego se aparearon 233 árboles y se obtuvo el peso seco de los mismos por medio de técnicas de análisis dimensional. La cuantificación de los mismos se efectuó para los compartimentos fuste (sin corteza), corteza (sólo de fuste), ramas < 5 cm de diámetro, ramas > 5 cm de diámetro, ramas secas, hojas y conos. De cada uno de los 233 árboles se compuso una muestra de cada compartimento con material proveniente de diferentes partes del mismo, la cual se pesó en fresco, y se secó en horno a 70 °C hasta peso constante. Dichas muestras fueron molidas en un molino Wiley y tamizadas con malla 18 (1 mm), las cuáles fueron analizadas para la determinación de la concentración de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn. Se realizaron en total 11.065 determinaciones químicas. Con los registros de crecimiento y condiciones químicas de suelo se efectuaron análisis de correlación simple para cada uno de los rodales. Con los datos de biomasa, para cada compartimento de cada árbol, se aplicaron modelos lineales mixtos utilizando como variables dependientes fuste, hojas, corteza y ramas, mientras que las variables

independientes fueron el DAP (diámetro a la altura del pecho), Ht (altura total), la edad (efectos fijos del modelo) y la zona geográfica representada por los agrupamientos edafoclimáticos (efecto aleatorio del modelo). En segunda instancia, sobre la misma estructura de los modelos, se agregaron variables predictoras como la edad de la plantación, el índice de sitio (IS) y la densidad de rodal (N). Mediante un procedimiento de selección de variables de a pasos (“stepwise”) se obtuvo la combinación de variables que debían utilizarse para la obtención del modelo con mejor resultado. También se ajustaron modelos lineales con los promedios de concentración de cada nutriente en cada uno de los 31 sitios, para los nutrientes C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en los compartimentos hojas, fuste, corteza y ramas < 5 cm. Las variables del rodal utilizadas para el ajuste fueron, N, DAP, Ht, altura dominante (Hdom), área basal (G), IS, latitud, edad, manejo, zona (el correspondiente agrupamiento edafoclimático Ron, Pe o Ros), suelo (suelo rojo o suelo pedregoso) y el coeficiente precipitación- evapotranspiración (P/ETP). El contenido de nutrientes se obtuvo a partir de los valores obtenidos de biomasa y concentración de nutrientes en cada compartimento y en cada uno de los rodales. Posteriormente se efectuó la evaluación del impacto nutricional de la cosecha a través del índice de exportación de nutrientes (IE) y la retraslocación de nutrientes, mientras que luego se simularon diferentes escenarios de cosecha para determinar el impacto de la exportación de nutrientes en cada rodal. En todos los casos, para las comparaciones de concentración y contenidos de nutrientes en el suelo entre agrupamientos edafoclimáticos, contenido de biomasa arbórea y, concentración de nutrientes y contenido de nutrientes en el estrato arbóreo para comparar agrupamientos edafoclimáticos, rangos etarios y manejo forestal, se realizó ANOVA y test de Tukey con significancia de 0.05, para lo cual se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT 2.0.

Resultados. Los resultados mostraron que el crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* se diferenció entre sitios. El agrupamiento edafoclimático Pe mostró más nutrientes, menor profundidad efectiva, menor volumen ocupado por la fracción fina, con consiguiente menor capacidad de retención de agua y un menor volumen posible de ser explorado por las raíces de las plantas, lo que constituye un contexto relativamente limitante para el crecimiento de la plantación. El ajuste de modelos se realizó para cada agrupamiento edafoclimático, ya que la inclusión del agrupamiento edafoclimático como variable aleatoria en los modelos mixtos determinó diferencias entre sitios y mejoró la precisión en la estimación de biomasa en cada uno de los compartimentos. La biomasa

acumulada en los diferentes compartimentos aéreos de las plantaciones de *P. taeda* aumentó en sitios de mejor calidad. La acumulación porcentual de biomasa en el fuste, en plantaciones adultas, también incrementó en sitios de mejor calidad. Las concentraciones de P y K en los compartimentos arbóreos lignificados disminuyeron con el aumento de la edad de la plantación. La relación de disponibilidad de nutrientes en el suelo, en líneas generales, no se asoció con la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos. La incorporación de variables ambientales en los modelos ajustados para la determinación de la concentración de nutrientes mejoró los parámetros estadísticos; de ellos, 21 modelos resultaron con indicadores estadísticos confiables.

Conclusiones. Las concentraciones de nutrientes en los compartimentos del *P. taeda* dependen, en mayor medida, de la disponibilidad de agua para las plantas. Independientemente de la disparidad, principalmente física de los suelos de la región de estudio y, de la disponibilidad de agua, las plantaciones actuales de *P. taeda* no registraron mayores deficiencias nutricionales. No obstante, el acortamiento del turno de rotación, y por ende, la aceleración de la extracción de nutrientes del sistema, aumenta el riesgo de agotamiento de los nutrientes más escasos en los sistemas forestales. Esto podría conducir a la disminución de la productividad de los sitios en las futuras rotaciones. Los índices relacionados con el uso de los nutrientes (IE y retraslocación) pusieron en evidencia que en estas plantaciones existe una mayor conservación y uso más eficiente de los elementos de menor disponibilidad en los suelos (P y K), y que esta es mayor donde su disponibilidad es menor y su IS es mayor (suelos rojos profundos). El mantenimiento de la capacidad productiva del sitio en el largo plazo debe efectuarse en la totalidad de sitios donde se realice la actividad forestal, no obstante algunos sitios, son más propensos a perder capacidad productiva que otros, particularmente por las condiciones intrínsecas de cada uno de ellos. Finalmente, los resultados hallados en esta Tesis indican que de acuerdo con el sitio en que sea plantado el *P. taeda* sería recomendable determinar una nueva área basal óptima, ajustar la intensidad y oportunidad de los raleos y concentrar la acumulación de biomasa en el fuste a partir de las podas. También, que la cosecha forestal se realice con la máxima edad posible, conservando los compartimentos de la copa en el terreno y reponer los nutrientes exportados para mantener la capacidad productiva de los sitios.

ABSTRACT

Introduction and Objectives. The aim of this study was to determine the effects of the resources availability over the use efficiency and nutrients conservations according to edaphoclimatic conditions, age and management of *Pinus taeda* L. in the Mesopotamia Argentina.

Materials and methods. The study was conducted between 28° 30' S (Corrientes province) and, 25° 30' S (Misiones province). Thirty one sites of *P. taeda* plantations between 3 and 25 years old were selected. The 31 stands were grouped according to the regionalization and soil type. Three groups were performed: 1) plantations established on sites with red soils in north of the study area (Ron), 2) plantations established on sites with stony soils in north of the study area (Pe) and, 3) plantations established on sites with red soils in the south of the study area (Ros). To determine the meteorological conditions in which grew each plantation, meteorological history data were collected from 5 meteorological stations distributed in all over the plantation zone. Soil samples of each horizon were collected in each of the 31 stands, to determine the concentration profile of C, N, P, K, Ca, Mg, Fe and Mn. The bulk density and nutrient content were determined. The dasometric variables and the site index (SI) were calculated in the different tree layer of the plantation forest variables. Two hundred and thirty three trees were then cut and the dry weight thereof was obtained by dimensional analysis techniques. The quantification of the same was done to the stem compartments (bark), bark (stem only), branches <5 cm in diameter, branches > 5 cm in diameter, twigs, leaves and cones. Each of the 233 trees a sample of each compartment from different parts of it, which was weighed fresh and dried in an oven at 70° C to constant weight material is composed. These samples were ground in a Wiley mill and sieved with 18 mesh (1 mm), which were analyzed for determining the concentration of C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe and Mn. 11,065 chemical determinations were performed in total. With growth records and chemical soil conditions simple correlation analysis for each of the stands they were made. With biomass data for each compartment of each tree, linear mixed models using as dependent variables (stem, leaves, bark and branches) were applied, while independent variables were the DBH (diameter at breast height), Ht (total height), age (fixed effects model) and the geographical area represented by edaphoclimatic groupings (random effect model). Secondly, on the structure of the models, predictors such as age of the plantation site index (IS) and stand density (N) were added. Through a selection process variable steps

("stepwise") a combination of variables to be used for obtaining model best result was obtained. Linear models were also adjusted to the average concentration of each nutrient in each of the 31 sites for nutrients C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe and Mn in the compartments leaves, stem, bark and branches <5 cm. Stand variables were used for setting N, DAP, Ht, dominant height (Hdom), basal area (G), IS, latitude, age, management, area (corresponding grouping Ron, Pe or Ros), soil (red soil or stony soil) and the precipitation-evapotranspiration ratio (P / ETP). The nutrient content was obtained from the values obtained from biomass and nutrient concentration in each compartment and in each of the stands. The evaluation of the nutritional impact of harvesting subsequently made through the export ratio of nutrients (IE) and retraslocation of nutrients while then different scenarios harvest were simulated to determine the impact of the export of nutrients in each stand. In all cases, comparisons of concentration and content of soil nutrients between soil and edaphoclimatic groupings content tree biomass and nutrient concentration and nutrient content in the tree layer to compare edaphoclimatic groupings, age ranges and forest management is performed ANOVA and Tukey test with significance of 0.05, for which INFOSAT 2.0 statistical package was used.

Results. The results showed that the growth of *P. taeda* plantations differed between the different analyzed sites. The edaphoclimatic grouping Pe showed more nutrients, less effective depth, smaller occupied volume by the fine fraction, resulting in lower water retention capacity and a lower volume to be explored for the plant roots. This is a relatively limited context for the growth of the plantation. The setting of models were carried out for each edaphoclimatic group, since the inclusion of edaphoclimatic variable as a random variable in the mixed models determined differences between sites and improved the accuracy in biomass estimation in each one of the compartments. The accumulated biomass in the different aerial compartments of the *P. taeda* plantations were increased in sites of better quality. The percentage biomass accumulation in the stem in adult plantations, also were increased in sites of better quality. The concentrations of P and K in the woody tree compartments were decreased with the increasing of the age of the plantation. The relationship between the availability of nutrients in the soil were not associated with the concentration of nutrients in the tree compartments. The incorporation of environmental variables in the adjusted models to determine the nutrients concentration improved the statistical parameters; of them, 21 models resulted as a reliable statistical indicators.

Conclusions. The nutrient concentrations in the *P. taeda* compartments in general depend more on the water availability for the plants. Regardless of the disparity (mainly soil physics of the study area and the water availability), the present *P. taeda* plantations not recorded higher nutritional deficiencies. However, the shortening of shift rotation, and thus, the acceleration of the nutrients removal from the system, increase the risk of depletion of the scarce nutrients in the forest systems. This could lead to a decreased productivity of the sites in future rotations. The related index is to the use of nutrients (IE and retraslocation) had highlighted that in this plantations exist more conservation and a better efficiency of the use of the elements with lower availability in the soils (P and K), and this is greater where its availability is less and IS is higher (deep red soils). The maintenance of the productive capacity of the site in the long term should be performed in the totality of the places where forestry is made. However some sites are more likely to lose productive capacity than others, particularly for the intrinsic conditions of each them. Finally, the results obtained in this study reveal that according to the site where *P. taeda* is planted would be advisable determine a new optimal basal area, adjust the intensity and timing of the thinning and concentrate the biomass accumulation in the stem from the pruning. Also, that forest harvesting is made with the maximum possible age, retaining the compartments of the cup on the ground and replenish the nutrients exported to maintain the productive capacity of the sites.

TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	1
INTRODUCCIÓN	2
Historia, situación actual e importancia de las plantaciones de <i>Pinus taeda</i> L.	2
Marco teórico sobre productividad y exigencias ambientales de <i>Pinus taeda</i> L.	5
HIPÓTESIS Y PREDICCIONES	8
Hipótesis 1	8
Predicciones	8
Hipótesis 2	9
Predicciones	9
OBJETIVOS	9
Objetivo general	9
Objetivos particulares	9
Estructura y organización de la tesis	10
BIBLIOGRAFÍA	11
CAPÍTULO 2	13
PROPIEDADES DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE SITIO EN PLANTACIONES DE <i>Pinus taeda</i> L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA	14
INTRODUCCIÓN	14
METODOLOGÍA	17
Caracterización de la zona de estudio y las plantaciones	17
Muestreo y contenido de nutrientes en el suelo	28
Análisis de datos	32
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
Concentración de nutrientes en el suelo	32
Densidad aparente del suelo	35
Contenido de nutrientes en el suelo y sus relaciones	36
Índice de sitio de las plantaciones y su relación con los nutrientes	37
CONCLUSIONES	39
BIBLIOGRAFÍA	40
CAPÍTULO 3	47
EFFECTO DE LAS VARIABLES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA EN RODALES DE <i>Pinus taeda</i> L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA	48

INTRODUCCIÓN	48
METODOLOGÍA	51
Determinación de la biomasa arbórea aérea	51
Ajuste de ecuaciones	57
Determinación de coeficientes asociados a variables meteorológicas	59
Determinación de índices asociados con el manejo de las plantaciones	62
Ajuste de modelos para identificar las variables que inciden sobre el IMAB	63
Estadística	63
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	64
Registros meteorológicos durante el período de crecimiento de las plantaciones	64
Determinación del peso seco total y por compartimento de los individuos arbóreos	66
Relación P/ETP y biomasa acumulada en cada agrupamiento edafoclimático	68
Biomasa acumulada por rangos de edades en los compartimentos aéreos	68
Incremento medio de biomasa por compartimento en los rodales	77
Identificación de variables que afectan la acumulación de biomasa	79
CONCLUSIONES	80
BIBLIOGRAFÍA	81

CAPÍTULO 4 **88**

EFFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN LOS COMPONENTES ARBÓREOS DE LAS PLANTACIONES DE *P. taeda* L. Y SU RELACIÓN CON EL CRECIMIENTO

	89
INTRODUCCIÓN	89
MATERIALES Y MÉTODOS	96
Muestreo de árboles y determinación de concentraciones de elementos químicos	96
Comparaciones estadísticas por agrupamientos	99
Ajuste de modelos para determinar la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos	99
Cálculo de cocientes entre nutrientes	100
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	101
Concentraciones medias de nutrientes en los compartimentos arbóreos de los 233 árboles de <i>P. taeda</i>	101
Concentración media de nutrientes en los compartimentos arbóreos en función de la edad de las plantaciones	104
Concentraciones medias de nutrientes en función de los agrupamientos edafoclimáticos de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	107

Relación de concentraciones de nutrientes foliares en las plantaciones de <i>P. taeda</i>	112
Ajuste de modelos para la determinación de la concentración de nutrientes en función de variables ambientales y del rodal	117
Ajuste de modelos para la identificación de la influencia de las variables ambientales y de manejo sobre la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos	121
CONCLUSIONES	123
BIBLIOGRAFÍA	125
CAPÍTULO 5	134
EFEECTO DE LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LOS NUTRIENTES ACUMULADOS E IMPACTO NUTRICIONAL DE LA COSECHA FORESTAL EN PLANTACIONES DE <i>Pinus taeda</i> L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA	135
INTRODUCCIÓN	135
MATERIALES Y MÉTODOS	138
Ajuste de modelos explicativos para la determinación de la influencia de las variables del rodal y ambientales, sobre los nutrientes acumulados en el vuelo forestal	139
Correlación del contenido de nutrientes en el vuelo forestal con las variables del rodal y del ambiente	140
Evaluación del impacto nutricional de la cosecha	140
Retraslocación de nutrientes en las plantaciones	141
Simulación de diferentes escenarios de cosecha para determinar el impacto de la exportación de nutrientes en cada rodal	142
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	143
Nutrientes acumulados en la biomasa aérea de las plantaciones	143
Compartimentalización de contenidos de nutrientes en plantaciones de <i>Pinus taeda</i>	156
Eficiencia de uso de los nutrientes e impacto de la cosecha	165
Retraslocación	168
Escenarios de cosecha	170
Tabla 5-8. Simulación del contenido de nutrientes (kg.ha ⁻¹) exportados durante la cosecha en plantaciones de <i>P. taeda</i> de 10 y 20 años respectivamente.	170
Comparación de nutrientes acumulados en plantaciones del presente estudio respecto de otras plantaciones	172
CONCLUSIONES	176
BIBLIOGRAFÍA	178
CAPÍTULO 6	185

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	186
CONCLUSIONES GENERALES	186
RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA EL MANEJO SILVICULTURAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	191

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1. Características estructurales de las plantaciones de <i>P. taeda</i> y condiciones de sitio en cada rodal de muestreo.....	23
Tabla 2-2. Concentración promedio de nutrientes del suelo (ppm) de cada uno de los agrupamientos de rodales.....	33
Tabla 2-3. Contenido de nutrientes en el suelo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) hasta 60 cm de profundidad en cada uno de los grupos de sitios estudiados.....	36
Tabla 2-4. Coeficientes de correlación y valor de probabilidad de la correlación (entre paréntesis) entre el índice de sitio (IS) y, la concentración y contenido de nutrientes en el suelo.....	39
Tabla 3-1. Comparación de los modelos con parámetros de los efectos fijos (DAP y Edad) específicos para cada nivel del factor aleatorio "Zona" mediante la prueba de cociente de probabilidad (likelihood ratio) con la biomasa de fuste como variables dependientes en cada caso.....	66
Tabla 3-2. Valores de R^2 obtenidos con el ajuste de ecuaciones para cada compartimento y en cada agrupamiento edafoclimático para el modelo 1 (variables predictoras DAP y Ht) y modelo 2 de acuerdo por lo determinado a través del procedimiento stepwise (variables predictoras densidad del rodal, índice de sitio y edad).....	67
Tabla 3-3. Valores de los coeficientes de las ecuaciones del modelo 1 ($\text{Log}Y=\beta_0+\beta_1*\log(\text{DAP})+\beta_2*\log(\text{Ht})+\epsilon$), para cada compartimento arbóreo de <i>P. taeda</i> y su respectivo agrupamiento edafoclimático.....	68
Tabla 3-4. Biomasa estimada y límites de confianza de la estimación de los compartimentos fuste y corteza de las plantaciones de <i>P. taeda</i> en cada rodal de muestroo.....	70
Tabla 3-5. Biomasa estimada y límites de confianza de la estimación de los compartimentos hojas y ramas de las plantaciones de <i>P. taeda</i> en cada rodal de muestroo.....	71
Tabla 3-6. Coeficiente P/ETP, coeficiente de manejo, e IMAB de los compartimentos fuste, hojas, ramas y corteza de cada una de las plantaciones de <i>P. taeda</i> en cada rodal de muestroo.....	77
Tabla 3-7. Coeficientes de los modelos lineales ajustados para determinar las variables que afectan el IMAB de los compartimentos hojas, ramas, fuste y corteza de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	79

Tabla 4-1. Número de unidades muestrales en las que se determinó la concentración de cada uno de los nutrientes en cada compartimento arbóreo.....	97
Tabla 4-2. Concentración media y desvío estándar de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en cada compartimento arbóreo. Las unidades muestrales (véase Tabla 4.1), proceden de 233 árboles de 31 plantaciones de <i>P. taeda</i> de las provincias de Misiones y Corrientes.	102
Tabla 4-3. Concentración media de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en cada compartimento arbóreo en plantaciones de <i>P. taeda</i> agrupados por rangos etarios (n=233).	105
Tabla 4-4. Concentración media de Zn en el compartimento hojas en plantaciones de <i>P. taeda</i> agrupados por rangos etarios (n=54).....	107
Tabla 4-5. Valores medios y desvíos estándar de concentración de nutrientes encontrados en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para cada compartimento arbóreo de <i>P. taeda</i> en las provincias de Corrientes y Misiones (n=233).	108
Tabla 4-6. Valores medios y desvíos estándar de concentración de Zn encontrado en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para el compartimento arbóreo hojas de <i>P. taeda</i> en las provincias de Corrientes y Misiones (n=54).	112
Tabla 4-7. Relación de concentración de nutrientes foliares en 31 sitios con diferentes condiciones edafoclimáticas (Ron, Pe y Ros) de <i>P. taeda</i>	113
Tabla 4-8. Valores de R ² de los modelos lineales ajustados (Concentración de nutriente (y) = a + b.DAP + c.Ht + d.Hdom + e.N + f.G + g.Edad + h.IS + i.Latitud + j.Manejo + k.Zona + l.Suelo + m.P/ETP), para la determinación de la concentración de nutrientes en plantaciones de <i>P. taeda</i> a partir de variables ambientales y de manejo forestal.....	117
Tabla 4-9. Modelos de regresión de tipo lineal para el cálculo de la concentración de nutrientes en distintos compartimentos aéreos de <i>P. taeda</i> en el NE de Argentina.	118
Tabla 4-10. Coeficientes de los modelos lineales ajustados para las concentraciones de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en los compartimentos hojas, ramas, fuste y corteza de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	121
Tabla 5-1. Valores medios de contenido de nutrientes (kg.ha ⁻¹) en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para cada compartimento arbóreo de <i>P. taeda</i>	145
Tabla 5-2. Coeficientes de los modelos lineales (Modelo 1: y = a + b.IS + c.edad + d.densidad + e.latitud + ε; Modelo 2: y = a + b.IS + c.edad + d.densidad + e.P/ETP + ε; Modelo 3: y = a + b.latitud + c.P/ETP + ε), ajustados para cada contenido de nutriente en la biomasa aérea de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	155

Tabla 5-3. Contenido de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn) en la biomasa de los compartimentos aéreos de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	157
Tabla 5-4. Contenido de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn y desvíos estándar en cada compartimento arbóreo de los agrupamientos edafoclimáticos Ron, Pe y Ros. Las unidades muestrales (véase Tabla 4.1), proceden de 233 árboles de 31 plantaciones de <i>P. taeda</i> de las provincias de Misiones y Corrientes.	163
Tabla 5-5. Índice de exportación de nutrientes para los contenidos de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn, en la biomasa de los compartimentos aéreos de las plantaciones de <i>P. taeda</i>	166
Tabla 5-6. Índice de exportación de nutrientes (Mg biomasa. Kg nutriente ⁻¹) para la cosecha de fuste con corteza en plantaciones de <i>P. taeda</i> en función del rango de edad de la plantación y el agrupamiento edafoclimático.	167
Tabla 5-7. Concentración de C y N (%) y P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn (g.mg ⁻¹) en hojas vivas y hojas caídas de <i>P. taeda</i> en función del agrupamiento edafoclimático.	169
Tabla 5-8. Simulación del contenido de nutrientes (kg.ha ⁻¹) exportados durante la cosecha en plantaciones de <i>P. taeda</i> de 10 y 20 años respectivamente.....	170

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Área de distribución natural de <i>Pinus taeda</i>	3
Figura 2-1. Imágenes de perfiles representativos de los tipos de suelo descriptos. A) suelo rojo y, B) suelo pedregoso.....	18
Figura 2-2. Imágenes representativas de la superficie de los suelos pedregosos pos plantación de <i>Pinus taeda</i>	19
Figura 2-3. Imágenes representativas de la superficie de los suelos rojos con plantaciones de <i>Pinus taeda</i> en su primer año de crecimiento.	20
Figura 2-4. Localización de las plantaciones de <i>P. taeda</i> estudiadas de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge.	24
Figura 2-5. Plantaciones de <i>Pinus taeda</i> de 3 años de edad, A) establecida en suelo rojos y, B) establecida en suelo pedregoso.	25
Figura 2-6. Plantaciones de <i>Pinus taeda</i> , A) plantación de 7 años de edad establecida en suelo rojo, previo al primer raleo y, B) plantación de 10 años de edad establecida en suelo pedregoso, con el primer raleo realizado.	26
Figura 2-7. Plantaciones de <i>Pinus taeda</i> , A) plantación de 20 años de edad establecida en suelo pedregoso, B) plantación de 20 años de edad establecida en suelo rojo, correspondiente al área productora de semilla de la empresa Lipsia SA.	27
Figura 2-8. Muestreo de la densidad aparente en suelos rojos, A) martillo extractor de muestras, B) orificio de donde se extrajo la muestra, C) extracción del cabezal del martillo junto a la muestra, D) enrazado de la muestra, E) preservación de la muestra para su traslado y, F) secado de las muestra en estufa.	30
Figura 2-9. Muestreo de la densidad aparente en suelos pedregosos, A) recolección del material del pozo, B) cubicación del pozo, C) tamizado del material del pozo, D) secado de la fracción fina, E) cubicación de las piedras y, F) fracción gruesa del pozo.	31
Figura 3-1. Actividades de muestreo de biomasa en campo, A) selección de árboles, B) apeo de árboles, C) cubicación de fuste y, D) trozado de fus te.....	54
Figura 3-2. Actividades de muestreo de biomasa en campo, A) separación por compartimentos, B) pesado del compartimento ramas secas y, C) pesado del compartimento hojas.	55
Figura 3-3. Recolección y procesamiento de muestras, A) selección de ramas para extracción de muestras, B) extracción de muestras, C) secado de muestras de los compartimentos de la copa y, D y E) trozado y procesamiento de muestras de fuste.	56

Figura 3-4. Ubicación de las estaciones meteorológicas y plantaciones utilizados en esta Tesis con las respectivas isohietas para su área de influencia.....	61
Figura 3-5. Registros meteorológicos para el período 1989 - 2009 para las localidades de Puerto Esperanza, Eldorado, Montecarlo, Santo Pipó y Gobernador Virasoro, secuencia de localidades según su ubicación latitudinal creciente; (A) temperatura media mensual y, (B) precipitación media mensual.	65
Figura 3-6. Biomasa estimada en los compartimentos arbóreos de las plantaciones de <i>P. taeda</i> en función de la densidad y la edad de la plantación.	72
Figura 3-7. Porcentajes de biomasa estimada a nivel de rodal. A) agrupamiento de los sitios en la zona sur en suelos rojos (Ros); B) agrupamiento de los sitios en la zona norte en suelos rojos (Ron); C) agrupamiento de los sitios en la norte sur en suelos pedregosos (Pe).....	76
Figura 4-1. Molienda de muestras, A) Molino procesador de muestras y, B) bolsas con muestras molidas para la determinación de la concentración de nutrientes.....	98
Figura 4-2. Relación de concentraciones de nutrientes en función de índice de sitio de las plantaciones de <i>P. taeda</i> en Argentina.....	116
Figura 5-1. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de <i>Pinus taeda</i> en función de la edad de la plantación (en años, línea inferior de números en eje x) y la densidad del rodal (en árboles.ha ⁻¹ , línea superior de números en eje x). A) contenido de carbono, B) contenido de nitrógeno y, C) contenido de fósforo.....	148
Figura 5-2. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de <i>Pinus taeda</i> en función de la edad de la plantación y la densidad del rodal. A) contenido de potasio, B) contenido de calcio y, C) contenido de magnesio.....	151
Figura 5-3. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de <i>Pinus taeda</i> en función de la edad de la plantación y la densidad del rodal. A) contenido de azufre, B) contenido de hierro y, C) contenido de manganeso.....	153
Figura 5-4. Contenido de cinc en el compartimento hojas de 14 rodales de <i>Pinus taeda</i> en función de la edad de la plantación (línea inferior en eje x) y la densidad del rodal (línea superior en eje x).....	162
Figura 5-5. Porcentajes retraslocados de N y P en hojas de <i>P. taeda</i> de 3 a 25 años de edad en los diferentes agrupamientos edafoclimáticos.....	170

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

Historia, situación actual e importancia de las plantaciones de *Pinus taeda* L.

Según la FAO (2010), las áreas forestales del mundo cubren el 31% de la superficie terrestre, aproximadamente 4 billones de hectáreas. Sudamérica posee el 49% de su superficie cubierta por áreas forestales, superficie que totaliza 21% de las áreas forestales mundiales. El carbono almacenado en las áreas forestales del planeta alcanza 650 billones de toneladas, que se distribuye el 44% en la biomasa, 11% en el piso forestal y 45% en el suelo. Sudamérica acumula en promedio 200 toneladas de biomasa por hectárea en las regiones tropicales, cuya cantidad representa la mayor cantidad de biomasa acumulada del mundo. Del total del área forestal mundial, el 6.6% (264.000.000 Ha) corresponde a plantaciones, superficie que se incrementó anualmente en el período 2000-2010, en 5 millones de hectáreas por año (FAO, 2010).

En Argentina, las áreas con bosques nativos alcanzan aproximadamente 29 millones de hectáreas (Frangi *et al.*, 2015), lo que representa aproximadamente, 8.8% de la superficie continental del país. Las plantaciones forestales, en Argentina, superan 1.200.000 Ha, de las cuáles el género *Pinus* supera las 650.000 Ha, donde el 88% de las mismas se encuentran plantadas en las provincias de Misiones y Corrientes (SAGPyA, 2001). Si bien no se cuenta con datos estadísticos de los porcentajes de cada especie, *P. taeda* es la conífera que mayor superficie ocupa.

Pinus taeda es originario de Estados Unidos y es la especie comercial más importante de ese país (Harms *et al.*, 2000). La distribución de *P. taeda* en EEUU alcanza los Estados de Virginia, North Carolina, South Carolina, Georgia, Florida, Alabama, Mississippi, Louisiana, Arkansas y Texas (Figura 1-1). En su lugar de origen abarca desde el nivel del mar hasta los 2500 y, ocasionalmente hasta los 4500 m snm. La región abarca varios tipos de suelos, pero su mejor crecimiento lo registra en suelos moderadamente ácidos con textura media en superficie, mientras que las precipitaciones varían de 1015 a 1525 mm anuales (Kronka *et al.*, 2005; Baker & Balmer, 1983).



Fuente: http://www.efloras.org/object_page.aspx?object_id=5252&flora_id=1

Figura 1-1. Área de distribución natural de *Pinus taeda*.

En la República Argentina, el *P. taeda* fue introducido en el año 1944 en la provincia de Misiones, a partir de las experiencias en plantaciones forestales llevadas adelante por Adolfo Schwelm, en el año 1930. El mismo comenzó con la plantación de una parcela de 7 hectáreas de *Araucaria angustifolia*, parcela ésta donde luego en el año 1940 el ingeniero Lucas Tortorelli comparó el crecimiento de éstas con el crecimiento de las plantaciones de otras especies cultivadas en Europa. A partir de los buenos crecimientos mostrados por la *A. angustifolia* en los suelos rojos de la Ciudad de Eldorado, respecto de las especies cultivadas en Europa y, por recomendación de los directivos de la empresa Celulosa Argentina SA, en el año 1943 se intensifica la plantación de *A. angustifolia*. En el año 1944 se introduce el *P. taeda*, mientras que en el año 1948 se establecen las primeras parcelas comerciales de *P. taeda* y *P. elliotii*. Al poco tiempo y al observar los resultados poco satisfactorios del crecimiento de la Araucaria, principalmente cuando se

plantaba en regiones edafoclimáticas diferentes a las de origen, se intensifican las plantaciones de *Pinus*, cuya mayor superficie la ocupaba el *P. elliottii* en los inicios (Golfari, 1965). Las forestaciones con coníferas en Argentina, al año 1965, ascendían a 20.000 ha. El mencionado incremento en la superficie forestada se debió a la motivación creada a los productores regionales a través de la compra de material fino provenientes de las raleos. Esta compra la realizaba la empresa Celulosa Argentina SA, radicada en la zona para la fabricación de pasta celulósica (Sutton, 1965).

Actualmente en Argentina, el *P. taeda* se encuentra mayoritariamente en el tercer ciclo de cultivo, mientras que algunos sitios transitan el cuarto ciclo productivo. Tradicionalmente cada ciclo de cultivo tuvo una duración aproximada de 20 años de edad, cuyo aprovechamiento se realizó con diferentes modalidades de cosecha, como así también, diferentes manejos de los residuos remanentes. Durante el primer ciclo de cultivo predominó como sistema de cosecha, la extracción del fuste con su corteza, mientras que el manejo de residuos predominaba la quema de los mismos en escolleras. Posteriormente, se reemplazó la quema de residuos por la conservación de los residuos sobre la superficie. En la actualidad, el incremento de la demanda de productos celulósicos y la necesidad de generación de energía a partir de remanentes forestales, están provocando la reducción de los turnos de rotación y la extracción del sitio del árbol completo. Esto conduce, en lo que respecta al fuste con su corteza, al acortamiento de los turnos de rotación con similar exportación total de nutrientes en menor tiempo. Además, la exportación de nutrientes se incrementa por la extracción del sitio de los compartimentos de la copa, que reportan altas cantidades de nutrientes contenidos en ellos.

Si bien en la zona de estudio se encuentran las principales empresas de pasta celulósica, las plantaciones de *P. taeda* se efectúan, principalmente, con finalidad de madera para aserrado en su corta final. Una pequeña proporción de las plantaciones se establecen para sistemas silvopastoriles, mientras que en la actualidad algunas empresas comenzaron a realizar la corta final con fines celulósicos. Las plantaciones realizadas con fines de madera aserrada, inician el ciclo productivo con una densidad aproximada de 1600 pl.ha⁻¹. La densidad final, dependiendo de las condiciones propias de manejo de cada empresa forestal, llegan al final del turno de rotación aproximadamente con 200 pl.ha⁻¹. La madera obtenida en las cortas intermedias (raleos), tiene diferentes destinos. Por lo general los raleos se efectúan con la modalidad por lo bajo, es decir, priorizando la extracción de los

árboles de menor diámetro y peor forma, respetando el espaciamiento de los árboles remanentes para optimizar el uso de los recursos. El primero de los raleos se efectúa, aproximadamente, entre el quinto y sexto año de edad, en el cual el destino de la madera depende de diversos factores. Uno de ellos es la distancia entre la plantación y las fábricas de pasta celulósicas. Si la relación costo beneficio, principalmente los costos de transporte, justifican transportar la madera a la fábrica de pasta, es entregado allí, caso contrario será un “raleo muerto”. En cuyo caso la madera queda en el terreno y no es aprovechada. Los sucesivos raleos, también pueden tener diferentes destinos, pero generalmente son aprovechados. La madera de menores dimensiones, podría ser aprovechada por las fábricas de pasta celulósica, mientras que la madera de mayores dimensiones es aprovechada para la obtención de diferentes productos elaborados. De esta manera la plantación llega al final del turno con edad aproximada de 20 años. La madera allí obtenida es aprovechada por la industria del aserrado. La provincia de Misiones es la principal provincia Argentina en cantidad de madera aserrada, no obstante, la provincia de Corrientes es en la actualidad es la provincia con mayor superficie forestada, con lo cual podría en los próximos años superar la cantidad de madera actualmente aserrada por la provincia de Misiones. El sector de la foresto industria genera importantes ingresos de dinero en ambas provincias, lo que lo hace un sector importante en la economía de las mismas. Según Díaz *et al.* (2009), el sector de la foresto industria para la provincia de Misiones aporta el 63% de las exportaciones de la provincia, mientras que para la provincia de Corrientes el sector lo hace con el 11%, relegado por el sector arrocero y el frutícola (Corrientes Exporta – IFE – MP, 2013).

Marco teórico sobre productividad y exigencias ambientales de *Pinus taeda* L.

Respecto de las exigencias ambientales del *P. taeda*, si bien es una especie plástica que se adapta a diferentes ambientes edafoclimáticos y no muestra síntomas de deficiencias nutricionales, la capacidad máxima de soporte del sitio varía de acuerdo con las condiciones ambientales. Por ejemplo, en otras latitudes la especie alcanza los 100 m².ha⁻¹ de área basal máxima (Harms *et al.*, 2000), no obstante, las condiciones de crecimiento para obtener estos valores probablemente sean las condiciones ideales para que el *P. taeda* exprese su máximo potencial de crecimiento. En Argentina las forestaciones han sido establecidas en sitios edafoclimáticos de buena calidad, a diferencia de lo que ocurre en la mayoría de los países del mundo (Reissman & Wisnewski, 2002). No obstante, los

registros indican que estas plantaciones establecidas en suelos de alta productividad agrícola y en condiciones subtropicales, con ocupación plena del sitio, apenas superan los $50 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de AB (Crechi *et al.*, 2014). Si bien estas diferencias de ocupación del sitio puedan ser consecuencia de la suma de factores que las plantaciones necesitan para su crecimiento, la conservación de los nutrientes en el sitio podría ser de gran importancia para incrementar o mantener los niveles de crecimiento actuales.

Los sitios más demandados para forestaciones son los de alta productividad (suelos profundos, bien drenados y fácilmente trabajables), no obstante, las forestaciones que se establecen sobre este tipo de sitios corresponden solo a reemplazo de forestaciones existentes. Por tal motivo, los productores forestales están estableciendo las nuevas plantaciones en sitios que tradicionalmente no fueron ocupados por plantaciones forestales, ya sean sitios con suelos pedregosos, o bien, campos tradicionalmente utilizados para ganadería en la provincia de Corrientes. Estos sitios a los cuáles están desplazándose las forestaciones se corresponde con la tendencia mundial, ya que las plantaciones forestales son tradicionalmente instaladas en sitios degradados donde la actividad agrícola ya no es rentable (Ranger & Turpault, 1999; Fox, 2000) o bien, suelos arenosos, pedregosos o lixiviados que no pueden ser utilizados por la agricultura (Bizon, 2005).

El contraste entre sitios degradados y sitios de alta productividad marcan la diferencia en las variables de crecimiento de las plantaciones forestales. En Misiones, las plantaciones de *P. taeda*, instaladas en sitios de alta productividad, registran índices de sitio (IS) de aproximadamente 25 metros. Estos registros de IS son similares a los de las zonas del norte de la provincia de Corrientes donde tradicionalmente se realizó ganadería y en la actualidad avanza el cultivo forestal. Ahora bien, para las forestaciones en suelos pedregosos en la provincia de Misiones no se registran datos de IS, no obstante, en estos sitios puede observarse que el crecimiento es inferior y los turnos de rotación para obtener determinados diámetros son mayores.

El mantenimiento o mejora de la productividad demanda un manejo intensivo de las plantaciones, acción que requiere la manipulación del suelo y del rodal para atenuar los factores que limitan el crecimiento, tales como calidad de suelo, genética del plantín, fertilización, densidad del rodal y control de malezas (Fox, 2000). Los nutrientes y el agua son considerados como los principales factores abióticos que afectan el crecimiento de las plantaciones de rápido crecimiento (Fisher & Binkley, 2000). La evaluación de la

disponibilidad de estos elementos es importante para planificar el establecimiento de próximas plantaciones y las tareas silvícolas aplicables a ella. Respecto al agua disponible, se debe tener en cuenta que ella depende, tanto de la posibilidad de almacenamiento de la misma en el suelo como de la cantidad y distribución de las precipitaciones a lo largo del año; asimismo, el régimen de precipitaciones y térmico influyen en la humedad y déficit de saturación de vapor de agua atmosférico, como en el balance de agua del suelo, lo que también afecta el crecimiento. En cuanto a la disponibilidad de nutrientes, en nuestra región aún no se emplean planes de fertilización y manejo de la nutrición para el establecimiento de las nuevas plantaciones, debido a que las plantaciones de *P. taeda* son de baja demanda nutricional y carecen de síntomas asociados a la falta de nutrientes (Reissmann & Wisnewski, 2002). No obstante, las tasas de crecimiento de las plantaciones de rápido crecimiento se acoplan generalmente con la alta utilización de los recursos del sitio, por lo que es importante estudiar la cantidad y disponibilidad de los recursos, como así también la eficiencia de uso de los mismos (Stape, 2002).

La eficiencia de uso de los recursos puede definirse como la cantidad producida por unidad de recurso empleada. La cantidad producida en forestaciones se expresa, generalmente, como el incremento del volumen maderable o como cantidad de carbono fijado (Sands & Mulligan, 1990). Además, debe considerarse que la eficiencia de uso de un recurso puede modificarse con la disminución o incremento en la disponibilidad de otro recurso (Binkley *et al.*, 2004). Por ejemplo, la eficiencia de uso de nitrógeno puede modificarse cuando se modifica la cantidad de agua disponible para la plantación. (Stape, 2002). Plantaciones en sitios más productivos tienden a tener mayor eficiencia en el uso de los recursos que sitios menos productivos, mientras que los tratamientos silviculturales podrían modificar la eficiencia de uso de los recursos (Binkley *et al.*, 2004).

El manejo eficiente de los nutrientes del sitio posibilita mantener los niveles productivos de cada sitio y reducir la reposición de nutrientes en el largo plazo. Si bien requiere un mínimo de habilidad por parte del silvicultor, éste debe conocer las cantidades presentes y las cantidades exportadas y/o perdidas en cada actividad realizada durante el ciclo productivo. La cuantificación del contenido de nutrientes de una plantación se efectúa mediante estimaciones y mediciones que se aproximan a la realidad y aportan datos que permiten establecer los planes nutricionales. Según Ranger & Turpault (1999), el balance de nutrientes en las plantaciones intensamente manejadas siempre es negativo, por lo que

las técnicas silviculturales deben ser las herramientas que ayuden a minimizar el impacto. El mayor impacto nutricional ocasionado por la actividad forestal ocurre con la preparación de terreno y la cosecha de la plantación, cuyas actividades se dan respectivamente al comienzo y al final del ciclo productivo. Por ser la actividad forestal, una actividad que no se alterna con otras actividades productivas, el final de un ciclo se acopla con el comienzo de la siguiente plantación. Esto hace que el impacto nutricional se concentre en un mismo momento. Según Stape (2002), entender el impacto de las prácticas de manejo sobre la productividad potencial es una responsabilidad de todos los administradores forestales. No obstante, no todas las prácticas son negativas, ya que por ejemplo la fertilización o la fijación biológica son prácticas que aportan nutrientes al sitio. Por otro lado, si bien algunas prácticas generan balance nutricional negativo, el manejo racional permite disminuir las cantidades perdidas de nutrientes. Por ello, el silvicultor tiene herramientas de manejo para atenuar el impacto de la actividad forestal y contribuir con la sustentabilidad y mantenimiento de la capacidad productiva de los sitios.

Por ello, conocer la cantidad de nutrientes que la especie demanda y, que puede almacenar en un sitio en función de la edad, las condiciones ambientales y el manejo que reciba, es importante para mantener la capacidad productiva del sitio y atenuar el impacto nutricional que las actividades ocasionan en el ambiente, por ello en la presente Tesis se plantean las siguientes hipótesis de trabajo y los objetivos generales y específicos que se detallan a continuación:

HIPÓTESIS Y PREDICCIONES

Hipótesis 1

La disponibilidad hídrica y la fertilidad edáfica representan las limitantes al crecimiento de *Pinus taeda* en el área de estudio por lo que las variaciones geográficas del cociente precipitación/evapotranspiración potencial y del tipo de suelo explican las variaciones geográficas del crecimiento en esa área.

Predicciones

En sitios con suelos pedregosos y ante iguales condiciones de manejo forestal y factores climáticos, la tasa de incremento de la biomasa es menor que en sitios con suelos rojos.

Ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación P/EP se relaciona con un aumento de la tasa de incremento de la biomasa.

Hipótesis 2

A similares condiciones edáficas los factores que tienden a reducir el crecimiento disminuyen la eficiencia en el uso de los nutrientes provocando un incremento de las concentraciones en los tejidos vegetales.

Predicciones

En sitios con suelos pedregosos, y ante iguales condiciones de manejo forestal y factores climáticos, la concentración de nutrientes en los tejidos vegetales es mayor que sitios con suelos rojos.

Ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación P/EP se relaciona con una disminución de la concentración de nutrientes en los tejidos.

A densidades de plantación que determinan competencia intraespecífica, y bajo similares condiciones edafoclimáticas, la reducción de la densidad se relaciona con una disminución de la concentración de nutrientes en los tejidos.

Ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación P/EP se relaciona con un aumento de la tasa de incremento de la biomasa.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar la influencia del clima y el suelo en las variaciones geográficas del crecimiento y la eficiencia del uso de nutrientes en *Pinus taeda* en Misiones y el norte de Corrientes.

Objetivos particulares

Evaluar diferencias en la tasa de acumulación de biomasa y la concentración de nutrientes en los tejidos vegetales entre plantaciones sobre suelos rojos y suelos pedregosos.

Analizar la relación entre el cociente P/ETP y la tasa de acumulación de biomasa y la concentración de nutrientes de la plantación.

Analizar el efecto del manejo de la densidad de la plantación durante el turno de rotación sobre la tasa de acumulación de biomasa y la concentración de nutrientes de la plantación. Evaluar la eficiencia de uso de los nutrientes para cada una de las variables tipo de suelo, relación P/EP y manejo de la densidad del rodal.

Sobre la base de la información anterior modelar el efecto de la variación geográfica del suelo y el cociente P/EP sobre la tasa de acumulación de biomasa y la eficiencia del uso de los nutrientes de *Pinus taeda* en el área de estudio.

Estructura y organización de la tesis

La presente Tesis está estructurada en 6 Capítulos. Los Capítulos, si bien abordan temáticas diferentes, cada uno de ellos se relaciona con los Capítulos anteriores, cuya vinculación se relaciona en el Capítulo final. Cada Capítulo tiene un objetivo particular que responde parcialmente a los objetivos generales de la Tesis y que, en su conjunto, dan respuesta a la totalidad de los objetivos generales. El Capítulo 1 trata el marco teórico de referencia de esta Tesis. Además, contiene las hipótesis de trabajo con sus respectivas predicciones y el enunciado de los objetivos generales y específicos que se busca responder con los datos obtenidos. El capítulo 2 relaciona algunas propiedades de suelo con el crecimiento de 31 plantaciones de *Pinus taeda* L. localizadas en las provincias de Misiones y Corrientes, cuyas edades están comprendidas entre 3 y 25 años de edad y que se agrupan bajo similares características edafoclimáticas. En el capítulo 3 se determina la biomasa acumulada en cada uno de los 31 rodales mencionados y se analiza el efecto de las condiciones edafoclimáticas, la edad de la plantación y el manejo de la densidad del rodal sobre la acumulación de biomasa en cada uno de ellos. El capítulo 4 analiza el efecto de las condiciones edafoclimáticas, la edad de la plantación y la densidad del rodal sobre la concentración de nutrientes en cada uno de los compartimentos arbóreos. El análisis del capítulo se realizó con más de 11000 determinaciones químicas correspondiente a 10 nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn y Zn) en los compartimentos arbóreos. En el capítulo 5, a partir de los datos obtenidos de biomasa y concentración de nutrientes, se estudia el efecto de las variables edafoclimáticas, la edad de la plantación y densidad del rodal sobre el contenido de nutrientes en cada compartimento arbóreo de cada plantación. A partir del citado análisis se calcula el índice de exportación de nutrientes y se simulan diferentes situaciones de cosecha con el fin de determinar el impacto nutricional de la cosecha forestal. Finalmente, el capítulo 6 interpreta en conjunto, el efecto de las variables

edafoclimáticas, edad del rodal y densidad arbórea sobre el crecimiento de las plantaciones, biomasa acumulada, concentración de nutrientes y contenido de nutrientes. El análisis en conjunto permite analizar el impacto nutricional y posibilita sugerir algunas recomendaciones para atenuar dicho impacto.

BIBLIOGRAFÍA

Baker J & Balmer W. 1983. Loblolly pine. *Pinus taeda*, ecology, management, production, United States. In Agriculture Handbook. US Dept. Agriculture, Washington, DC; 148-152.

Binkley D, Stape J & Ryan M. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*, 193: 5-16

Bizon J. 2005. *Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de Pinus taeda L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes*. Dissertação Mestrado em Recursos Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil: 92 p.

Corrientes Exporta – IFE – MP. 2013. Informe de Comercio Exterior Desempeño exportador de la Provincia de Corrientes 2013. Disponible en: www.corrientesexporta.gov.ar.

Crechi E, Keller A, Fassola H, Falher J & Maletti R. 2014. Efecto de la intensidad y oportunidad de raleo en *Pinus taeda* L., sobre la producción de madera en el Noroeste de Misiones, Argentina. *XVI Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales*. Eldorado, Misiones, Argentina.

Díaz A, Guarrochena de Arjol M & Díaz D. 2009. Dinámica de las exportaciones forestales en la provincia de Misiones. *Visión de Futuro*, 12(2): 1-25.

FAO. 2010. *Global forests resources assessment 2010*. Main report. FAO Forestry Paper 163. Rome. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/013/i1757e/i1757e.pdf> Acceso 08 de Julio de 2014.

Fisher R & Binkley D. 2000. *Ecology and management of forest soils*. Wiley, New York: 489 p.

Fox T. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 138: 187-202.

- Frangi J, Pérez C, Martiarena R, Pinazo M, Martínez Pastur G, Brown A, Peri P & Ceballos D. 2015. Aspectos ecológicos y ambientales de los bosques nativos y plantaciones forestales en la Argentina: una visión panorámica y conceptual. En: El deterioro de los suelos y del ambiente en la Argentina.
- Golfari L. 1965. Resultados preliminares de la experimentación de coníferas exóticas en Misiones. P 133-140 En: *Actas de las primeras jornadas de trabajo organizadas por el Centro de Estudios del Bosque Subtropical*. Eldorado, Misiones, Argentina: 329 p.
- Harms WR, Whitesell CD & DeBell DS. 2000. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 126: 13-24.
- Kronka F, Bertolani F & Ponce R. 2005. *A cultura do Pinus no Brasil*. Sociedade Brasileira de Silvicultura, Sao Paulo: 160 p.
- Ranger J & Turpault M. 1999. Input-output nutrient budgets as a diagnostic tool for sustainable forest management. *Forest Ecology and Management*, 122: 139-154.
- Reissmann B & Wisnewski C. 2002. Nutritional aspects of pine plantations. Chapr 6: 141-170 En: Goncálves L & Benedetti V (Ed.) *Forest Nutrition and fertilization*. IPEF, Sao Paulo, Brasil: 421 p.
- Sands, R & Mulligan D. 1990. Water and nutrient dynamics and tree growth. *Forest Ecology and Management*, 30: 91-111.
- SAGPyA. 2001. Inventario Nacional de plantaciones forestales. Disponible en: <http://www.sagpya.mecon.gov.ar/new/0-0/forestacion/inventario/Inventario2.htm>.
- Stape J. 2002. *Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in Northeastern Brazil*. Tesis Doctoral. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EEUU: 225 p.
- Sutton C. 1965. La provincia de Misiones y el desarrollo forestal del país. P 185-190 En: *Actas de las Primeras jornadas de trabajo organizadas por el Centro de Estudios del Bosque Subtropical*. Eldorado, Misiones, Argentina: 329 p.

Capítulo 2

**PROPIEDADES DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE SITIO
EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA**

PROPIEDADES DEL SUELO Y SU RELACIÓN CON EL ÍNDICE DE SITIO EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

INTRODUCCIÓN

Pinus taeda L. es la especie forestal con mayor superficie cultivada en el centro norte de la Mesopotamia Argentina, habiéndose adaptado a un amplio rango de condiciones edáficas y climáticas, en el área comprendida, aproximadamente, desde los 25°30'S en la provincia de Misiones hasta los 29° S en la Provincia de Corrientes.

En dicho rango latitudinal, el cultivo con esta especie predomina bajo suelos del orden Kandiodult, conocidos localmente como “suelos rojos”. En la actualidad, se está ampliando la superficie de cultivo de esta especie a sitios con diferentes condiciones edáficas, cuyos suelos hacia donde se registra el avance, corresponden taxonómicamente al orden Inceptisol. Los suelos de éste orden son conocidos localmente como suelos “pedregosos” por el elevado porcentaje de fragmentos de roca en su perfil. Estos suelos, se denominan técnicamente “con fragmentos gruesos”, cuyo tamaño de fragmentos es > a 2 mm de diámetro y pueden ocupar 35 o 40% del volumen total del suelo (Soil Survey Staff, 2010; Stendahl *et al.*, 2009), o incluso hasta 70% (Eriksson & Holmgren, 1996). Ese elevado porcentaje de la fracción gruesa deja un reducido volumen de suelo con partículas finas (Bornemann *et al.*, 2011) y disminuye la posibilidad de exploración por las raíces.

En la provincia de Misiones, los suelos pedregosos ocupan el 35% de la superficie total de la misma, mientras que los suelos rojos ocupan el 33% (Ligier *et al.*, 1990). Si bien no se cuenta con datos estadísticos, la mayor superficie forestada con *P. taeda* ocuparía suelos rojos.

La diferencia entre los suelos con fragmentos gruesos y los suelos que solo poseen partículas finas (diámetro de partículas < 2 mm) es marcada y reside en las características físicas, químicas y biológicas. La presencia de fragmentos gruesos de roca en el perfil dificultan el laboreo (Cousin *et al.*, 2003), modifican la porosidad (Shi *et al.*, 2012) y la densidad aparente de la fracción fina (Van Wesemael *et al.*, 2000), y por ende, retienen menor cantidad de agua (Shi *et al.*, 2008; Tetegan *et al.*, 2011; Novák & Knava, 2012). La provincia de Misiones no dispone de información referente a física de suelos en gran

parte de su territorio, principalmente en suelos pedregosos. Por ende, tampoco se conoce la disponibilidad de agua en este tipo de suelos. Los muestreos y caracterización en suelos pedregosos poseen mayor complejidad respecto del mismo trabajo en suelos rojos. La presencia de piedras en este tipo de suelos impide realizar el trabajo con las metodologías clásicas aplicadas en suelos agrícolas. No obstante, algunos relevamientos realizados, puntualmente para determinadas zonas de la provincia, permiten inferir la retención de agua en ambos tipos de suelo. Un relevamiento edafológico realizado en la alta cuenca del Río Uruguay (Lasserre *et al.*, 1990), realizado en 40 calicatas en distintos tipos de suelo, muestra diferencias físicas entre ellos. Si bien allí no se determinó las proporciones de agua en el suelo, identifican a los suelos pedregosos con excesivo drenaje que acarrea problemas en el abastecimiento de agua para los cultivos. Además, el análisis granulométrico permite identificar que las partículas de arcilla y limo en el perfil son 6 y 18% superiores en los suelos rojos respecto de los pedregosos, mientras que las partículas de arena son 24% superior en los suelos pedregosos. Estos valores permiten predecir que la capacidad de retención de agua es superior en los suelos rojos, ya que la superioridad de las partículas de arena incrementa la macroporosidad y por ende genera excesivo drenaje. Por otro lado, Dalurzo (Comunicación personal), realizó algunas mediciones de disponibilidad de agua en los suelos de Misiones. En los mismos encontró que en suelos rojos la capacidad de campo estuvo entre 25 y 30%, mientras que el PMP (punto de marchitez permanente) alcanzó valores entre 13 y 16%. Estos valores dejan ver que el rango de agua disponible en este tipo de suelos es de 12 a 14%. En suelos pedregosos, la capacidad de campo alcanzó valores de 19%, mientras que el PMP fue de 9-10%, por lo que el agua disponible en este tipo de suelos es aproximadamente entre 8 a 10%.

La presencia de fragmentos gruesos en el perfil también modifica la temperatura (Danalatos *et al.*, 1995; Casals *et al.*, 2000) y las condiciones biológicas (Certini *et al.*, 2004), afectando el contenido de nutrientes (Agnelli *et al.*, 2001; Bornemann *et al.*, 2011; Rau *et al.*, 2011). Algunos estudios indican que los fragmentos rocosos son químicamente activos y liberan nutrientes (Martín-García *et al.*, 1999; Heisner *et al.*, 2004; Whitney & Zabowski, 2004; Rytter, 2012), y que los suelos con fragmentos gruesos contienen, en algunos casos, más carbono orgánico y consecuentemente mayor actividad biológica (Agnelli *et al.*, 2001; Cerdá *et al.*, 2001); no obstante, no todas las litologías presentan estas características (Cuniglio *et al.*, 2009). Asimismo, se sabe que las variaciones en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, impactan sobre el crecimiento del

cultivo (Bellote *et al.*, 2005; Hope, 2007). Las relaciones entre propiedades del suelo y el crecimiento de *P. taeda* no son conocidas en la región comprendida por éste trabajo, debido a que, si bien hay plantaciones sobre los sitios con suelos pedregosos, no se dispone de datos publicados de crecimiento arbóreo a los cuales hacer referencia. No obstante en otras latitudes puede observarse que la disminución de la disponibilidad de agua en el suelo y el aumento de la evapotranspiración disminuyen la cantidad de biomasa acumulada por *Pinus taeda* (Dougherty *et al.*, 1995).

Cabe asimismo destacar que, independientemente de las condiciones edáficas del sitio, las tareas que se realizan durante el ciclo forestal incluyen aquellas para el establecimiento de la plantación, el manejo de la densidad, la poda y la cosecha. Desde el punto de vista nutricional, el establecimiento de la plantación y la cosecha, son las actividades de mayor impacto sobre el sitio (Martiarena *et al.*, 2009), principalmente, el manejo de los residuos para el establecimiento del nuevo cultivo. La conservación de residuos de cosecha predomina en los sistemas de preparación de terreno, no obstante, la reposición nutricional mediante fertilización no se realiza, al menos en plantaciones de *P. taeda*, por lo cual el crecimiento actual de estas plantaciones se debe a las condiciones propias del sitio.

Al comparar el crecimiento de *P. taeda* en la región Mesopotámica Argentina con otras regiones donde se cultiva esta especie, puede observarse que el área basal (AB) a los 20 años de edad de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina, mencionados por Pinazo *et al.* (2007), es similar a la que se obtiene en EEUU (Jokela, 2004); no obstante, es la mitad de los 103 m².ha⁻¹ de Hawaii (Harms *et al.*, 2000). Estas diferencias probablemente se deban en parte a factores ecológicos cuyo estado difícilmente pueda cambiarse; sin embargo, también es posible suponer que *P. taeda* responde ante los cambios en la disponibilidad de recursos cuyo estado sí puede modificarse tanto en sentido positivo como negativo. Igualmente, estas comparaciones exigen la máxima ocupación de sitio, situación difícilmente replicable en plantaciones comerciales; por ello, las comparaciones deben realizarse con variables que expresen el potencial de crecimiento de cada sitio y se independicen del manejo a lo largo de la rotación, tal como el índice de sitio (IS). Es probable que las diferencias de crecimiento entre plantaciones de regiones alejadas con diferencias ecológicas, también ocurran a escala zonal y local en tanto se constate cierta heterogeneidad de sitios.

Como se mencionó en los párrafos anteriores, los suelos pedregosos serían de inferior calidad que los suelos rojos debido a su menor volumen efectivo y con mayores limitaciones en cuanto a la disponibilidad de agua para las plantas. No obstante, de acuerdo con los resultados encontrados en otros estudios (Bellote *et al.*, 2005), sería razonable encontrar mayor concentración de nutrientes. Por ello, el objetivo de éste capítulo de la Tesis es verificar si existe vinculación entre algunas características de los suelos de la zona de plantación comercial de *P. taeda* en la Mesopotamia Argentina con los valores del crecimiento de dichas plantaciones, empleando variables indicadoras del potencial de crecimiento no afectadas por el manejo tal como el IS. La hipótesis de este trabajo es que los suelos pedregosos poseen limitaciones para el crecimiento de *P. taeda* que determinan una menor calidad de sitio respecto de los suelos rojos, pero esa diferencia no está relacionada con la disponibilidad de nutrientes.

METODOLOGÍA

Caracterización de la zona de estudio y las plantaciones

El trabajo se realizó en las provincias de Corrientes y Misiones, República Argentina, ubicadas aproximadamente entre los 25°S a 31° S, y 54°O a 60° O. Las plantaciones estudiadas se hallaban ubicadas entre los 28° 30' S, en la Provincia de Corrientes, hasta los 25° 30' S, en la Provincia de Misiones.

Las precipitaciones medias anuales en el sur de la zona de estudio (departamento Santo Tomé, provincia de Corrientes), son de aproximadamente 1450 mm para los diferentes períodos de los que se tienen registros; la temperatura media anual es de 20° C (ECOS / GEF-PNUD, 2002). En el Norte de la zona de estudio la precipitación media anual es de 2000 mm, y la temperatura media anual es de 20° C (Ligier, 1990). Ambas zonas corresponden a la Zona de Vida Bosque Templado Cálido Húmedo según la clasificación de Holdridge (1967).

Se seleccionaron 31 rodales de *P. taeda* entre 3 y 25 años de edad, de material genético desconocido, con diferentes manejos silviculturales (densidad del rodal) y sobre 2 grupos de suelo. El primero de los grupos de suelo es conocido localmente como “suelos rojos” y comprendido en los órdenes taxonómicos Ultisoles, Oxisoles y Alfisoles (Soil Survey Staff, 2010). Estos suelos se caracterizan por un desarrollo en profundidad mayor a los 2 m, con una secuencia de horizontes A-AB-Bt-C, de color rojo, libre de pedregosidad y fragmentos gruesos, permeabilidad moderada y bien drenados (Figura 2-1). El segundo

grupo es conocido como “suelos pedregosos” y pertenecen taxonómicamente a los órdenes Inceptisoles, Entisoles y Molisoles (Soil Survey Staff, 2010). Estos suelos se caracterizan por poseer limitantes físicas debido a la presencia de fragmentos gruesos y piedras, con elevada infiltración, secuencia de horizontes A-AC-C y, en general, de desarrollo vertical somero, aunque puede variar desde pocos centímetros hasta 1 m de profundidad (Figura 2-1). Se considera fragmentos gruesos aquellos que superan los 2 mm hasta 25 cm de diámetro, mientras que piedra son las que superan los 25 cm de diámetro (Etchevehere, 1976). La Figura 2-2 muestra el aspecto superficial pos plantación de los suelos pedregosos, mientras que la Figura 2-3 muestra plantaciones en su primer año de crecimiento, establecidas en suelos rojos.



Figura 2-1. Imágenes de perfiles representativos de los tipos de suelo descriptos. A) suelo rojo y, B) suelo pedregoso.



Figura 2-2. Imágenes representativas de la superficie de los suelos pedregosos pos plantación de *Pinus taeda*.



Figura 2-3. Imágenes representativas de la superficie de los suelos rojos con plantaciones de *Pinus taeda* en su primer año de crecimiento.

Los 31 rodales se congregaron en 3 grupos de acuerdo a la regionalización y el tipo de suelo. En la zona norte de la región de estudio se localizaron dos grupos y uno en la zona sur. Este último comprendió todos los rodales de la zona sur, ya que todas las plantaciones fueron establecidas sobre suelos rojos (Ros) y en la actualidad son raros los rodales de *P. taeda* sobre otros tipos de suelo. En la zona norte del estudio los rodales fueron divididos de acuerdo al tipo de suelo, con un grupo establecido sobre suelos rojos (Ron), y el otro grupo sobre suelos pedregosos (Pe).

La estructura de cada uno de los 31 rodales se caracterizó por medio de 3 parcelas de 600 m². En cada parcela se realizó un inventario de DAP (diámetro del tronco medido a 1.30 m de altura) con forcípula, cuyo número varió de 100 árboles en plantaciones de 3 años de edad (aún sin raleos) hasta 15 árboles en plantaciones de 20 años de edad con 3 o 4 raleos a lo largo de la rotación. A partir del DAP se calculó la Ht (altura total) de cada uno de los árboles plantados de la parcela por medio de los modelos de Ht ajustados para el simulador forestal (Crechi *et al.*, 1999), cuyos modelos han sido validados científicamente y son utilizados por diversas empresas del sector, siendo ellos:

- Clase de edad 2 a 6 años

$$Ht = (7.46994 + 1.18064 * edad) * (1 - (1.11847 - 0.0608534 * edad) * \exp(-(0.0643616 * DAP)))$$

Para el ajuste de este modelo se utilizaron 1944 pares de datos altura/DAP entre 3 y 6 años, siendo los diámetros y alturas mínimos y máximos respectivamente 4 y 24 cm y 2 y 15 m, cuyo muestreo incluyó parcelas en diferentes sitios.

-Clase de edad 7 a 30 años

$$\ln(Ht) = 3.83321 - \frac{9.309495}{DAP} - \frac{8.011572}{edad} + 36262282/(DAP * edad)$$

La base de datos empleada para la construcción del modelo de clase de edad 7 a 30 años estuvo constituida por 6983 pares de datos altura/DAP, comprendiendo rangos diamétricos entre 5 y 65 cm y altura entre 5.5 a 36 m.

Los datos utilizados para predecir la altura individual sobre la base del DAP y la edad presentó un ajuste satisfactorio (Crechi *et al.* 1999), a partir de datos provenientes de distintas calidades de sitio, por lo que el modelo no lineal que utiliza al dap y la edad como predictores da cuenta de esas variaciones, y en consecuencia, podría predecir adecuadamente la altura de diferentes calidades de sitio.

Como estimador del potencial de crecimiento se utilizó el IS. Para determinar el IS de cada rodal se utilizó el modelo aplicado en el simulador forestal (Crechi *et al.*, 1999), cuyo modelo ha sido validado científicamente y es utilizado por diversas empresas del sector. El mismo fue:

$$IS = Hi * \left(\frac{1 - \exp(-0.0849947 * Eo)}{1 - \exp(-0.0849947 * Ei)} \right)^{1.1589676}$$

Donde:

IS: índice de sitio (m)

Hi: altura media dominante (m) $i = 17, \dots, 28$

Eo: 15 años, edad de referencia para la cual se calculó el IS

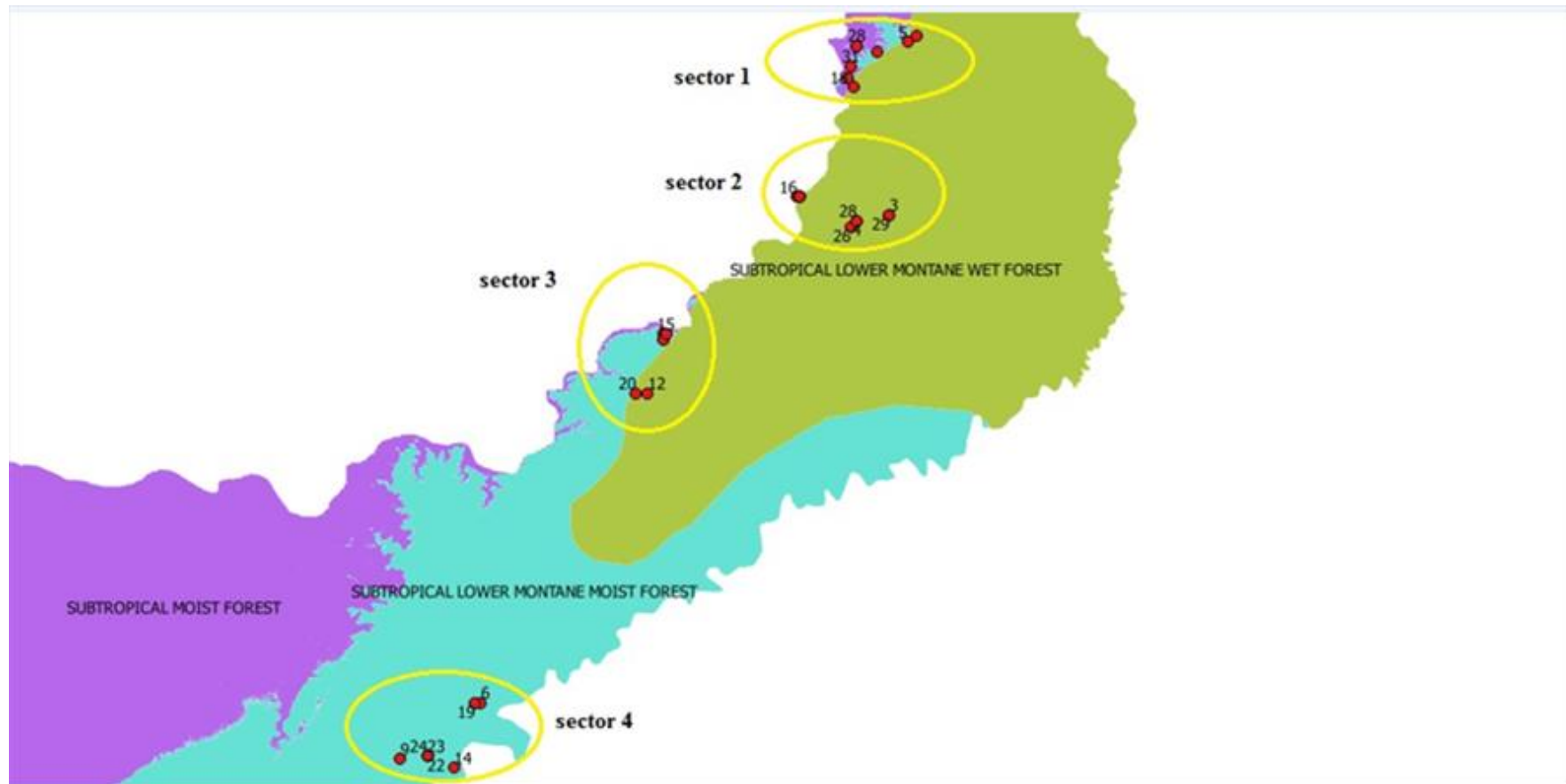
Ei: edad del rodal (años)

Las características estructurales de cada uno de los rodales donde se efectuaron los muestreos y, la edad y el tipo de suelo sobre el cual crecieron las plantaciones se observan en la Tabla 2.1. También se calculó la altura dominante (Hdom), como la altura media de los 100 árboles de mayor diámetro del rodal. La ubicación de los sitios se indica en la Figura 2-4, mientras que las Figura 2-5, Figura 2-6 y Figura 2-8 muestran algunos rodales en los diferentes agrupamientos edafoclimáticos de la zona de estudio.

Tabla 2-1. Características estructurales de las plantaciones de *P. taeda* y condiciones de sitio en cada rodal de muestreo.

Rodal	Edad	Suelo	Latitud	N	IS	DAP	Ht	AB	V
1	3	Ron	26°59'40"	857	22.2	9.12	5.27	5.64	15.71
2	3	Ron	26°00'25"	1130	22.5	7.77	4.72	5.66	14.95
3	3	Pe	26°34'56"	1400	21.7	4.28	4.02	2.25	4.02
4	3	Pe	26°36'06"	1028	22.4	6.41	4.06	3.57	8.32
5	3	Ron	25°59'52"	1513	22.2	6.69	4.82	5.92	16.02
6	3	Ros	28°13'24"	1350	22.8	7.91	4.78	6.95	18.48
7	5	Ron	26°59'52"	417	22.8	15.65	9.38	8.07	38.05
8	5	Ron	26°00'35"	1400	24.6	13.34	8.61	21.23	97.96
9	5	Ros	28°24'51"	950	23.5	14.75	9.08	16.84	78.77
10	7	Ron	26°59'54"	427	21.2	19.83	11.93	13.22	77.57
11	7	Ron	26°02'03"	470	21.5	20.17	11.95	15.31	90.32
12	7	Pe	27°10'54"	1264	20.7	14.05	10.56	20.40	111.98
13	7	Ron	26°32'00"	600	25.7	20.3	14.5	20.08	141.70
14	7	Ros	28°26'36"	625	21.3	18.82	11.70	17.92	104.50
15	10	Ron	26°58'47"	213	26.0	35.19	21.81	22.50	230.92
16	10	Pe	26°31'17"	275	20.4	24.42	14.28	13.05	89.60
17	10	Pe	26°31'24"	491	23.9	22.40	16.30	20.15	156.40
18	10	Pe	26°07'15"	600	20.5	21.90	14.57	23.05	161.80
19	10	Ros	28°12'55"	750	22.6	25.72	16.51	40.21	321.35
20	10	Pe	27°10'44"	740	22.2	23.10	16.08	32.02	250.01
21	13	Ron	26°30'33"	483	23.7	25.90	21.70	25.63	255.40
22	16	Ros	28°24'12"	1056	25.2	26.40	25.40	56.60	704.44
23	16	Ros	28°24'09"	759	25.9	26.10	25.50	38.90	483.03
24	16	Ros	28°24'07"	722	25.1	26.50	24.70	38.10	482.24
25	18	Ron	26°30'36"	300	23.2	32.2	25.0	28.70	332.25
26	19	Pe	26°37'09"	172	17.9	38.3	19.4	20.32	190.64
27	20	Pe	26°08'59"	150	24.4	46.81	27.97	25.64	365.20
28	20	Pe	26°36'06"	225	20.5	38.28	22.81	26.60	313.61
29	20	Pe	26°34'56"	271	21.7	37.64	22.78	30.38	276.97
30	23	Ron	25°58'41"	752	24.6	32.04	28.90	51.53	686.73
31	25	Ron	26°04'32"	238	22.3	39.11	27.35	29.14	403.47

Referencias: N: densidad del rodal (pl.ha⁻¹); IS: índice de sitio (m); DAP: diámetro medio del rodal a 1,30 m (cm); Ht: altura total media del rodal (m); AB: área basal (m².ha⁻¹); V: volumen total actual del rodal (m³.ha⁻¹); Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso.



Fuente: Sitios de estudio georeferenciados en Mapas de Zonas Vida de Holdridge, sector NOA, de María Rosa Derguy, Tesis Doctoral en realización, Facultad de Cs. Naturales y Museo, UNLP. Se agradece a María Rosa Derguy la realización del mapa con los sitios.

Figura 2-4. Localización de las plantaciones de *P. taeda* estudiadas de acuerdo con las zonas de vida de Holdridge.



Figura 2-5. Plantaciones de *Pinus taeda* de 3 años de edad, A) establecida en suelo rojos y, B) establecida en suelo pedregoso.



Figura 2-6. Plantaciones de *Pinus taeda*, A) plantación de 7 años de edad establecida en suelo rojo, previo al primer raleo y, B) plantación de 10 años de edad establecida en suelo pedregoso, con el primer raleo realizado.



Figura 2-7. Plantaciones de *Pinus taeda*, A) plantación de 20 años de edad establecida en suelo pedregoso, B) plantación de 20 años de edad establecida en suelo rojo, correspondiente al área productora de semilla de la empresa Lipsia SA.

Muestreo y contenido de nutrientes en el suelo

Para cada uno de los 31 rodales descriptos se determinaron las propiedades químicas y densidad aparente del suelo. En los sitios con suelos rojos, la determinación de las propiedades químicas se realizó por medio de muestras obtenidas con barreno por horizonte hasta los 60 cm de profundidad las cuales fueron compuestas extrayendo 10 muestras simples en los horizontes A y AB, mientras que en el horizonte Bt se obtuvieron 5 muestras simples (Fernández *et al.*, 2000). La profundidad de muestreo para el horizonte A fue de 0-10 cm, el Horizonte AB de 10-30 cm y el horizonte B de 30 hasta 60 cm, siendo la profundidad efectiva de estos suelos, mayor a los 2 m de profundidad. Para determinar propiedades químicas en los suelos pedregosos el muestreo alcanzó, en algunos casos, solo hasta los 30 cm de profundidad, ya que la pedregosidad fue una limitante física para realizarlo a mayor profundidad, coincidiendo con la profundidad efectiva en esos sitios. El muestreo en el horizonte A se realizó de 0-10 cm, mientras que en el horizonte AC se lo hizo de 10-30 cm. En los casos en que la pedregosidad lo permitió y la profundidad efectiva del suelo fue mayor, el muestreo se extendió en parte del horizonte C hasta los 60 cm de profundidad. En cada una de estas muestras compuestas, tanto las de suelos rojos como las de suelos pedregosos, se determinó el pH actual, carbono orgánico, nitrógeno total, fósforo y potasio disponible, calcio, magnesio intercambiable, Fe, Mn y Zn (Jackson, 1964).

Para determinar densidad aparente del suelo se aplicaron dos métodos de acuerdo al tipo de suelo. Para suelos rojos se aplicó el método del cilindro (Forsythe, 1975) y se extrajeron, en cada rodal, 8 muestras individuales en los espesores 0-10 y 10-30 cm, mientras que del espesor 30-60 cm se obtuvieron 5 muestras individuales (Fernández *et al.*, 2000). Las muestras se llevaron a laboratorio y se secaron a 105°C hasta peso constante (Figura 2-8) calculando la densidad aparente como la relación entre la masa de suelo y el volumen total, o sea el volumen de partícula más el espacio entre ellas:

$$Da = Ms/Vt$$

Donde:

Da: densidad aparente del suelo en g.cm⁻³

Ms: masa de suelo en g

Vt: volumen total en cm³

En suelos pedregosos la densidad aparente se determinó por medio del método del pozo (USDA, 1999). En cada rodal, en los espesores 0-10 y 10-30 cm de suelo se realizaron 8 muestras simples, mientras que en los sitios que se efectuó muestreo entre 30 y 60 cm de espesor se obtuvieron 5 muestras simples. Para cada una de las determinaciones simples se realizó un pozo de aproximadamente 2000 cm³ extrayendo la totalidad del material contenido en el mismo (Figura 2-9a). Posteriormente se realizó la cubicación del pozo con arena contenida en una probeta graduada, obteniendo por diferencia el volumen del pozo. Esta cubicación debió realizarse con arena debido a que la pendiente del terreno no permitió efectuarla con agua (Figura 2-9b). El material extraído del pozo se secó a 105°C y luego se separó la fracción fina del suelo del resto con tamiz de 2 mm (Figura 2-9c, d), para finalmente pesar la fracción fina. La fracción gruesa se separó en raíces y material consolidado mayor a 2 mm, cubicándolo en una probeta graduada por separado (Figura 2-9e, f). La cubicación se efectuó rellenando los espacios vacíos con arena, ya que el material proveniente del basalto con alto grado de descomposición por meteorización química, se degrada rápidamente en contacto con el agua y no permite obtener el volumen real de piedras en el suelo. Luego de ello la densidad aparente del suelo se calculó con la misma fórmula expresada para suelos rojos, siendo M_s la masa de suelo de la fracción fina, mientras que V_t es la diferencia de volumen entre el volumen total del pozo obtenido en campo menos el volumen de la fracción gruesa (material mayor a 2 mm + raíces).

El contenido de cada uno de los nutrientes, para los cuales se determinó la concentración, se calculó hasta los 60 cm en suelos rojos, mientras que en suelos pedregosos hasta la profundidad que pudo hacerse el muestreo, la cual varió entre 30 cm y 60 cm. Para cada uno de los nutrientes el contenido fue calculado como la sumatoria de los productos de la densidad aparente por la concentración respectiva de cada elemento en cada horizonte.



Figura 2-8. Muestreo de la densidad aparente en suelos rojos, A) martillo extractor de muestras, B) orificio de donde se extrajo la muestra, C) extracción del cabezal del martillo junto a la muestra, D) enrasado de la muestra, E) preservación de la muestra para su traslado y, F) secado de las muestra en estufa.



Figura 2-9. Muestreo de la densidad aparente en suelos pedregosos, A) recolección del material del pozo, B) cubicación del pozo, C) tamizado del material del pozo, D) secado de la fracción fina, E) cubicación de las piedras y, F) fracción gruesa del pozo.

Análisis de datos

Se efectuaron análisis de correlación simple entre el IS obtenido para cada uno de los rodales y la concentración de nutrientes por espesor de muestreo de suelo, como así también con el contenido de nutrientes. También, se realizó ANOVA y test de Tukey para las concentraciones y contenidos de nutrientes en el suelo entre los agrupamientos. Para ambos análisis se utilizó el paquete estadístico INFOSTAT 2.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de nutrientes en el suelo

La concentración de nutrientes en el suelo, promedio de todos los sitios agrupados bajo las mismas características edafoclimáticas y para cada horizonte, fue mayor en los sitios con suelos pedregosos, respecto de los sitios con suelos rojos, excepto el micronutriente Fe (Tabla 2-2), donde también puede observarse que los coeficientes de variación entre sitios fueron relativamente elevados.

En el espesor de suelo 0-10 cm, P, K y Zn fueron los 3 elementos con mayor diferencia de concentración entre los sitios de suelos pedregosos y los sitios de suelos rojos de ambas regiones. La concentración promedio de P, K y Zn en suelos pedregosos respecto de suelos rojos, fue respectivamente 4.8, 3.8 y 4.4 veces superior. Para el resto de los elementos, en general la concentración de nutrientes en suelos pedregosos, duplicó la concentración encontrada en suelos rojos.

También en el espesor 10-30 cm, el P, K y Zn presentaron mayor concentración en suelos de sitios pedregosos, con 4.0, 3.2 y 3.0 veces superior respectivamente, de acuerdo con el promedio de ambas zonas con suelos rojos.

En el espesor 30-60 cm, la diferencia de concentración se acentuó aún más en suelos pedregosos respecto de los suelos rojos, siendo en este caso el P, Mg y Zn los 3 elementos de mayor diferencia, los cuáles superaron respectivamente en 8.7, 5.9 y 3.9 veces la concentración en sitios con suelos rojos. El K también mantuvo la tendencia encontrada en los anteriores horizontes, solo que no se ubicó entre los 3 elementos de mayor diferencia.

Tabla 2-2. Concentración promedio de nutrientes del suelo (ppm) de cada uno de los agrupamientos de rodales.

Espesor (cm)	Grupo	Concentración de nutrientes (ppm)								
		C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	Ron	23170 (19) a	1925 (31) a	2.8 (66) a	94 (38) a	195 (66) a	998 (52) a	105 (69) a	3.2 (148) a	77 (144) a
	Pe	45860 (13) b	3828 (24) b	11.6 (66) b	357 (82) b	498 (44) b	2761 (23) b	364 (34) b	9.1 (40) b	32 (50) a
	Ros	26990 (16) a	1575 (26) a	2.2 (38) a	92 (41) a	235 (81) a	1193 (32) a	163 (38) a	1.5 (31) a	109 (145) a
10-30	Ron	17040 (25) a	1285 (27) a	1.9 (77) ab	78 (36) a	144 (69) a	882 (49) a	98 (70) a	2.9 (166) ab	78 (192) a
	Pe	24390 (26) b	2341 (30) b	6.8 (106) b	263 (91) b	448 (56) b	2237 (25) b	218 (32) b	4.4 (34) b	26 (67) a
	Ros	21170 (13) ab	1189 (17) a	1.5 (86) a	86 (39) a	188 (101) a	1231 (18) a	123 (42) a	1.0 (10) a	27 (78) a
30-60	Ron	12510 (25) a	1058 (37) a	1.2 (58) a	82 (34) a	99 (63) a	914 (50) a	82 (112) a	1.6 (105) ab	35 (160) a
	Pe	16910 (58) a	1298 (64) a	7.3 (84) b	252 (52) b	568 (64) b	2267 (19) b	181 (33) b	3.2 (67) b	14 (42) a
	Ros	16680 (13) a	947 (18) a	0.7 (56) a	73 (38) a	95 (29) a	949 (13) a	52 (54) a	0.6 (22) a	8 (30) a

Referencias: Grupo: Ron: suelo rojo zona Norte; Pe: suelo pedregoso; Ros: suelo rojo zona Sur. n = 14 (Ron), 10 (Pe) y 7 (Ros). Entre paréntesis coeficientes de variación. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) del valor medio de concentración, entre grupos.

La mayor concentración de nutrientes en los suelos pedregosos es coincidente con el trabajo realizado por Bellote *et al.* (2005), quienes compararon suelos rojos y pedregosos en Brasil. Los suelos pedregosos son considerados como menos evolucionados respecto de los suelos rojos (Cocos, 1997), situación que responde principalmente a los procesos de formación a través de la meteorización y liberación de nutrientes de los clastos gruesos, lo que genera, por esa vía, mayor aporte de nutrientes (Whitney & Zabowski, 2004; Rytter, 2012). Walker & Syers (1976) han señalado que los materiales recientemente depositados, en su caso cenizas volcánicas, y por extensión los más recientemente expuestos a la meteorización como los fragmentos gruesos de rocas basálticas en Misiones, tienen el mayor contenido de nutrientes derivados de las rocas, como P, de los que ellos alguna vez podrán tener. Por lo tanto cabe esperar, como ocurre en éste estudio, que los suelos menos evolucionados, como los pedregosos puedan ofrecer un alto suministro de esos nutrientes a las plantas (Vitousek & Farrington 1997). Sin embargo, a través del tiempo la cantidad de P en el ecosistema completo debería declinar (Vitousek, 2004), lo que se observa, en éste estudio, en los suelos rojos más antiguos. Por el contrario, debido a que el N está ausente en la mayoría de los sustratos primarios, su abundancia dependerá de la acumulación por medio de la fijación biológica y la deposición atmosférica a través del tiempo (Walker & Syers 1976; Vitousek 2004). Las condiciones subtropicales misioneras que favorecen el rápido crecimiento de la vegetación espontánea y la acumulación de materia orgánica y N en el suelo, han permitido estimar en 10 a 12 años después del abandono del uso agrícola de la tierra, el tiempo necesario para que se recuperen los contenidos de MO, N y la densidad aparente anteriores a la conversión de uso de la tierra; y en unos 16 a 20 años el tiempo de recambio de la vegetación nativa boscosa (*cf.* Píccolo *et al.*, 2002; Váccaro *et al.*, 2003; Frangi *et al.*, 2004). Estas observaciones permiten sugerir que la elevada concentración de MO y N en los suelos pedregosos podría estar relacionada con el rápido crecimiento y aportes al mantillo y horizontes del suelo de toda la vegetación espontánea como respuesta a la mayor oferta de nutrientes en los primeros centímetros de suelo.

La tendencia no significativa de menor concentración de hierro en suelos pedregosos, probablemente también tenga que ver con el menor tiempo de evolución de estos suelos, ya que la evolución de suelo en regiones tropicales va acompañada de un enriquecimiento relativo con óxidos de hierro con pérdida de sílice (Porta *et al.*, 2003).

Densidad aparente del suelo

La densidad aparente promedio, en los dos horizontes superficiales, fue significativamente menor en los sitios de suelos pedregosos respecto de los sitios con suelos rojos, mientras que también las diferencias fueron significativas entre ambos agrupamientos de suelos rojos. Los suelos Ron, Pe y Ros presentaron, respectivamente, densidades de 1.32 (± 0.10), 1.14 (± 0.15) y 1.56 (± 0.08) g.cm⁻³ en el espesor 0-10 cm, de 1.31 (± 0.12), 1.13 (± 0.17) y 1.67 (± 0.11) g.cm⁻³ en el espesor 10-30 cm, mientras que en el espesor 30-60 cm fue de 1.30 (± 0.09), 1.23 (± 0.15) y 1.68 (± 0.07) g.cm⁻³, con diferencias significativas solo en el agrupamiento Ros respecto de los dos restantes. Más allá de que éstos valores son inferiores a los sitios con suelos rojos, aún son superiores a trabajos realizados en suelos someros de otras regiones (Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2009), mientras que la tendencia de menor densidad aparente en suelos pedregosos, es coincidente con los resultados de Bellote *et al.* (2005).

La menor densidad aparente en los suelos pedregosos es consecuencia de una suma de factores, no obstante, en el presente trabajo se puede observar que los suelos pedregosos poseen, en el horizonte superficial, mayor concentración de MO respecto de los suelos rojos y con una notoria disminución hacia los horizontes más profundos. La mayor presencia de MO en el horizonte superficial hace suponer mayor presencia de raíces en menor volumen explorable, tendencia coincidente con lo citado por Cerdá (2001).

La diferencia entre los valores promedio de los sitios de suelos rojos, probablemente sea consecuencia del uso anterior del terreno, ya que en la región sur, si bien no se tiene precisión del uso anterior de los sitios estudiados, la región posee mayor actividad ganadera, actividad que podría haber producido, mediante pisoteo, el aumento de la densidad del suelo.

La presencia de fragmentos gruesos y piedras en el perfil de los suelos pedregosos varió entre 5 y 56% del volumen total del suelo hasta los 30 cm de espesor, rango de valores característicos de este tipo de suelos (Soil Survey Staff, 2010; Stendahl *et al.*, 2009). A partir de los 30 cm de espesor, en 4 de los sitios la presencia de una capa rocosa continua impidió el muestreo de suelo, lo que se conoce localmente como “planchón” y que en la mayoría de los casos las raíces de las plantas no pueden atravesar.

Contenido de nutrientes en el suelo y sus relaciones

El contenido de C (carbono orgánico) disminuyó con el aumento porcentual de la pedregosidad (Tabla 2.1), coincidente con los resultados encontrados por Bornemann *et al.* (2011). La materia orgánica, de la cual deriva el C, es considerada indicador de sostenibilidad (Cruz-Flores & Etchevers-Barra, 2009), siendo recomendable su conservación en suelos tropicales, ya que influye en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Moraes Sá & Lal, 2009; Rivero *et al.*, 2004). Además, actúa como reservorio de nutrientes (Pulido-Moncada *et al.*, 2010) y contribuye con la reducción del contenido de carbono atmosférico (Lal, 2005). Si bien la MO actúa como reservorio de nutrientes, lo cual *a priori* indicaría que mayor contenido de C directamente relacionado con mayor contenido de MO, debería ser coincidente con mayor contenido de nutrientes. Esta relación la manifestó solo el N, ya que elementos como el P, considerado elemento crítico para el crecimiento de las plantaciones en la región (Goya *et al.*, 2003; Martiarena *et al.*, 2011a, b), mostró mayor contenido de P en suelos pedregosos, coincidente con el menor contenido de C (Tabla 2-3). Esta asociación tiene que ver principalmente con el tipo de suelo, lo cual deja de manifiesto que el mayor contenido de nutrientes, excepto N, está influenciado por la permanente meteorización de fragmentos gruesos en el perfil (Rau *et al.*, 2011), mientras que el contenido de N es dependiente de la mineralización de la materia orgánica.

Tabla 2-3. Contenido de nutrientes en el suelo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) hasta 60 cm de profundidad en cada uno de los grupos de sitios estudiados.

Grupo*	Contenido de nutrientes ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)								
	C ($\times 10^3$)	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
Ron	125 (17) ab	9463 (32) a	14 (55) ab	623 (40) a	884 (46) a	6346 (45) a	655 (76) a	17 (141) a	138 (31) b
Pe	96 (45) a	8383 (57) a	28 (71) b	1061 (89) a	1966 (73) b	9071 (55) ab	979 (62) a	20 (66) a	81 (41) a
Ros	196 (9) b	11213 (16) a	12 (65) a	804 (41) a	1443 (52) ab	10772 (16) b	910 (35) a	9 (16) a	139 (24) b

Referencias: Grupo: Ron: suelo rojo zona norte; Ros: suelo rojo zona sur; Pe: suelo pedregoso. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas ($P < 0.05$) del valor medio entre grupos. Entre paréntesis coeficientes de variación.

La relación C:N, considerada como un parámetro de calidad o riqueza del suelo, puede observarse en los sitios con suelos pedregosos que fue de 12.6, 10.9 y 14.8 respectivamente en los espesores 0-10, 10-30 y 30-60 cm, siendo estos valores inferiores

a los sitios con suelos rojos, que fueron, en promedio de las dos zonas de suelos rojos, de 13.9, 13.7 y 15.3. Esta tendencia podría indicar menor proporción de mineralización de la materia orgánica respecto de los suelos pedregosos, no obstante, estos valores son bajos de acuerdo a los límites de nula mineralización establecidos por Duchaufour (1984), cuyo rango corresponde a valores entre 25 y 30. En contraposición Almeida *et al.* (2012), en plantaciones de *Pinus* sp. en Brasil encontraron valores de relación C:N entre 19 y 34 en los primeros 15 cm de espesor, quienes atribuyen estos valores a la menor descomposición de la materia orgánica como consecuencia de la acidificación que produce en el suelo la descomposición de las hojas del pino, valores que difieren notoriamente de los encontrados en éste trabajo. En bosques nativos de Misiones, los valores de relación C:N en los espesores 0-10 y 10-30 cm de suelo son respectivamente de 10.2 y 9.0 (R. Martiarena, datos inéditos), lo cual sugiere una mayor mineralización de la materia orgánica en presencia de materiales orgánicos con mayor concentración de nutrientes, respecto de los sitios con plantaciones de *P. taeda* presentados en este trabajo. La elevada concentración de P en los suelos pedregosos, también influyó sobre la relación C:P siendo inferior respecto de los suelos rojos. De la misma manera, la relación N:P fue menor en los suelos pedregosos.

Índice de sitio de las plantaciones y su relación con los nutrientes

El valor de IS (índice de sitio) promedio de los agrupamientos de los rodales de *P. taeda* establecidos en suelos rojos fue 10% superior respecto de los sitios en suelos pedregosos. En el norte de la región de estudio y en suelos rojos, las plantaciones de *P. taeda* tuvieron IS = 23.5 m, mientras que sobre el mismo tipo de suelo en la región sur el IS = 23.8 m. Las plantaciones de la región norte sobre suelos pedregosos fueron las de menor crecimiento con un IS = 20.9 m. Bellote *et al.* (2005) encontraron que el crecimiento en suelos pedregosos del Estado de Paraná en Brasil, fue menor respecto de los suelos rojos en dicha región, similar a lo que resulta de este estudio.

La Tabla 2-3 muestra que los contenidos de P y K, elementos nutritivos del suelo considerado como los de mayor criticidad para la región de estudio (Goya *et al.*, 2003, Martiarena *et al.*, 2011), son mayores en los suelos pedregosos, sitios éstos que mostraron el menor IS. Esto muestra que para esta región y bajo las condiciones de estudio, el IS no se relaciona, al menos solamente, con el contenido de nutrientes críticos del suelo. El menor crecimiento en los sitios con suelos pedregosos permite inferir que bajo las

condiciones de estudio, el incremento del crecimiento del *P. taeda* no está condicionado por la mayor acumulación de nutrientes en el suelo, o al menos, con los niveles de nutrientes actuales de estos suelos. Como se mencionó, la profundidad efectiva y el volumen de la fracción fina de suelo varió entre los diferentes tipos de suelo, lo cual puede estar marcando la diferencia en el crecimiento. La profundidad de suelo ha sido utilizada para determinar en algunos casos la calidad del sitio (Kimsey *et al.*, 2011), y ésta junto con la fracción fina se vinculan con el volumen físicamente apto para ser ocupado y explorado por las raíces para obtener agua, nutrientes y anclaje (Gardner *et al.*, 1999). Fisher & Binkley (2000), aluden que suelos pedregosos con menos de 25 cm de profundidad efectiva tiene efectos directos sobre el crecimiento de la plantación. Estos autores también mencionan que los suelos pedregosos retienen menor cantidad de agua, ya que la expansión y contracción de las piedras forman mayor cantidad de macroporos y canales entre ellas; el menor crecimiento en el caso de *P. taeda* sobre suelos pedregosos podría incluir como causa derivada de las características físicas a la menor capacidad de retención de agua, ya que las precipitaciones del norte misionero son elevadas. Bellote *et al.* (2005) corroboraron en Brasil, las diferencias de capacidad de retención de agua en suelos rojos respecto de pedregosos; allí, entre los 10 y 30 cm de espesor de suelo, el agua disponible en suelos rojos duplicó aquella de suelos pedregosos.

La correlación IS y concentración de nutrientes en el suelo, analizada con la totalidad de los datos de los tres sitios, es negativa para los tres espesores de suelo, en la totalidad de los elementos nutritivos estudiados (Tabla 2-4). La correlación con las mismas variables, individualizando los sitios (Ron, Pe y Ros), destacó la concentración de P con correlación negativa en los tres sitios y en todos los espesores de suelo, lo que indica que menor concentración de P en el suelo mayor IS.

Los coeficientes de correlación obtenidos para el IS y el contenido de cada uno de los nutrientes estudiados hasta los 60 cm de espesor de suelo, en la totalidad de los sitios, muestra que el contenido de P en el perfil es el único elemento que se asoció significativamente con el IS (Tabla 2-4). Esta asociación es negativa, lo cual indicaría que, bajo las condiciones de estudio el P no sería limitante para el crecimiento de *P. taeda*.

Tabla 2-4. Coeficientes de correlación y valor de probabilidad de la correlación (entre paréntesis) entre el índice de sitio (IS) y, la concentración y contenido de nutrientes en el suelo.

Espesor de suelo (cm)	Coeficiente de correlación concentración de nutrientes - IS								
	C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	-0.48 (0.01)	-0.53 (0.002)	-0.60 (0.0004)	-0.12 (0.51)	-0.35 (0.05)	-0.34 (0.07)	-0.38 (0.05)	-0.43 (0.03)	-0.09 (0.66)
10-30	-0.40 (0.03)	-0.47 (0.01)	-0.35 (0.05)	-0.01 (0.96)	-0.26 (0.17)	-0.23 (0.22)	-0.38 (0.05)	-0.31 (0.12)	-0.20 (0.32)
30-60	-0.50 (0.01)	-0.35 (0.07)	-0.39 (0.05)	-0.18 (0.36)	-0.32 (0.10)	-0.09 (0.66)	-0.50 (0.01)	-0.31 (0.14)	-0.28 (0.19)

Espesor de suelo (cm)	Coeficiente de correlación contenido de nutrientes - IS								
	C	N	P	K	Ca	Mg	Mn	Zn	Fe
0-10	0.07 (0.72)	-0.16 (0.40)	-0.53 (0.0023)	0.09 (0.63)	0.02 (0.93)	-0.14 (0.45)	-0.08 (0.71)	-0.24 (0.23)	-0.03 (0.87)
10-30	0.18 (0.32)	-0.09 (0.62)	-0.34 (0.07)	0.20 (0.27)	-0.18 (0.32)	-0.10 (0.60)	-0.05 (0.79)	-0.12 (0.54)	-0.17 (0.41)
30-60	0.08 (0.71)	0.10 (0.63)	-0.40 (0.04)	0.05 (0.82)	-0.05 (0.82)	-0.02 (0.94)	-0.31 (0.15)	-0.16 (0.47)	-0.24 (0.26)

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos destacan que el crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* tienen mayores limitaciones (menor IS) en suelos pedregosos respecto de los suelos rojos, independientemente del agrupamiento edafoclimático. Los suelos pedregosos resultaron ser los mejores provistos en nutrientes por unidad de superficie, lo cual se debería a la diferencia en el tiempo de desarrollo y meteorización (mayor en los suelos rojos profundos). Sin embargo, los suelos pedregosos poseen una menor profundidad efectiva y menor volumen de la fracción fina, lo que podría manifestarse más intensamente en los intervalos sin lluvias generando escasez de agua en comparación con los suelos rojos, afectando negativamente el crecimiento.

En los suelos rojos profundos, cuya concentración y contenido de nutrientes es similar, el crecimiento es mayor (no significativamente) en la zona sur, respecto de la zona norte. Ambas zonas tienen temperaturas similares, no obstante presentan diferencias en la cantidad de

precipitaciones. Esto hace suponer un mayor déficit de saturación atmosférica y una mayor demanda de agua lo que daría lugar a un mayor crecimiento tal como lo expresa el mayor índice de sitio.

La disponibilidad de fósforo en los suelos sigue los patrones expresados en la literatura, que considera que éste es el principal nutriente limitante en suelos tropicales antiguos, pero que en general, los suelos jóvenes o incipientes muestran mayor concentración de P, como se observó con los suelos pedregosos.

En cuanto a la nutrición y crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* en la República Argentina, se recomienda que los futuros estudios abordados para correlacionar variables edáficas con crecimiento de las plantaciones, consideren el estudio de las variables físicas del suelo, cuya incidencia creemos fue la responsable de los resultados encontrados.

BIBLIOGRAFÍA

Agnelli A, Ugolini F & Corti G & Pietramellara G. 2001. Microbial biomass-C and basal respiration of fine earth and highly altered rock fragments of two forest soil. *Soil Biology & Biochemistry*, 33: 613-620.

Almeida H, Pinheiro Dick D, Bertotto F & Chitarra G. 2012. Distribution of chemical compartments of soil organic matter and c stocks of a Cambisol from south Brazil as affected by Pinus afforestation. *Quimica Nova*, 35 (7): 1329-1335.

Bellote A, Filho A & Dedeczek R. 2005. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. Colombo: *Embrapa Florestas*: 94 p (Documentos / Embrapa Florestas, ISSN 161517-536X; 121).

Bornemann L, Herbst M, Welp G, Vereecken H & Amelung W. 2011. Rock fragments control size and saturation of organic carbon pools in agricultural topsoil. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 1898-1907.

Caldato S. 2011. *Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de Pinus taeda L. no nordeste Argentino*. Dissertação, Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura. UFSM, RS, Brasil.

- Casals P, Romanyà J, Cortina J, Bottner P, Coûteaux M & Vallejo V. 2000. CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil. I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 48: 261–281.
- Cerdá A. 2001. Effects of rock fragment cover on soil infiltration interrill runoff and erosion. *European Journal of Soil Science*, 52: 59-68.
- Certini G, Campbell C & Edwards C. 2004. Rock fragments in soil support a different microbial community from the fine earth. *Soil Biology & Biochemistry*, 36: 1119-1128
- Cocos O. 1997. Soil-forming factors and their impact on the evolution of soils in the upper semenic mountains. *Geographica Pannonica*, 1: 11-12.
- Cousin I, Nicoulaud B & Coutadeur C. 2003. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil. *Catena*, 53: 97-114.
- Crechi E, Fassola H & Maestropaolo J. 1999. *Manual de Descripción Técnica del Simulador Forestal de Pinus taeda 2.0*. INTA EEA Montecarlo – Facultad de Ciencias Forestales - Empresas forestales de Misiones y NE de Corrientes: 16 p.
- Cruz-Flores G & Etchevers-Barra J. 2009. Contenidos de carbono orgánico de suelos someros en pinares y abetales de áreas protegidas de México. *Agrociencia*, 45: 849-862.
- Cuniglio R, Corti G & Agnelli A. 2009. Rock fragment evolution and nutrients release in vineyard soil developed on a thinly layered limestone (Tuscany, Italy). *Geoderma*, 148: 375-383.
- Danalatos N, Kosmas C, Moustakas N & Yassoglou N. 1995. Rock fragments II. Their impact on soil physical properties and biomass production under Mediterranean conditions. *Soil Use and Management*, 11: 121-126.
- Dougherty P, Hennessey T, Zarnoch S, Stenberg P, Holeman R & Wittwer R. 1995. Effects of stand development and weather on monthly leaf biomass dynamics of a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) stand. *Forest Ecology and Management*, 72: 213–227.
- Duchaufour P. 1984. *Edafología. 1: Edafogénesis y clasificación*. Edit Masson. Barcelona: 493 p.
- ECOS - GEF-PNUD. 2002. *Manejo y conservación de la biodiversidad en los humedales de los Esteros del Iberá*. Proyecto ARG/02/G35, Provincia de Corrientes, Argentina: 172 p.

- Eriksson C & Holmgren P. 1996. Estimating stone and boulder content in forest soils – evaluating the potential of surface penetration methods. *Catena*, 28: 121-134.
- Etchevehere P. 1976. *Normas de reconocimiento de suelos. 2º Edición actualizada*. Secretaría de Agricultura y Ganadería. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Departamento suelos. SUELOS - Publicación N° 152: 210 p.
- Fernández R, Lupi A, Pahr N, Reis H, O’Lery H & Gelid M. 2000. 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. P 243-248 En: *Avances en Ingeniería Agrícola*. Ed Facultad Agronomía (UBA), Buenos Aires: 686 p.
- Fisher R & Binkley D. 2000. *Ecology and management of forest soils*. Third Edition. John Wiley & Sons, Inc.: 489 p.
- Forsythe W. 1975. *Física de suelos. Manual de laboratorio*. IICA, Turrialba: 221 p.
- Frangi JL, Arturi M, Goya JF, Vaccáro S & Píccolo G. 2004. La sucesión secundaria del bosque subtropical y su importancia ecológica y agrícola en el centro y sur de Misiones. Cap 3: 11 p En: Arturi MF, Frangi JL & Goya JF (eds) *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina*. EDULP (Editorial Universidad Nacional de La Plata). ISBN 950-34-0307-3. Disponible en: http://www.sedici.unlp.edu.ar/search/request.php?id_document=ARG-UNLP-EBook-0000000006.
- Gardner C, Laryea K & Unger P. 1999. Soil physical constraints to plant growth and crop production. AGL/MISC/24/99. FAO, Roma: 96 p.
- Goya J, Perez C, Frangi J & Fernández R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda*. *Ecología Austral*, 13(2): 139-150.
- Harms W, Whitesell C & DeBell D. 2000. Growth and development of loblolly pine in a spacing trial planted in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 126: 13-24.
- Heisner U, Raber B & Hildebrand E. 2004. The importance of the soil skeleton for plant-available nutrients in sites of the Southern Black Forest, Germany. *European Journal Forest Research*, 123: 249–257.
- Holdridge LR. 1967. *Life Zone Ecology*. Tropical Science Center, Costa Rica.

- Hope GD. 2007. Changes in soil properties, tree growth, and nutrition over a period of 10 years after stump removal and scarification on moderately coarse soils in interior British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 242: 625–635.
- Infostat. 2008. Software estadístico. Versión 2.0. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba.
- Jackson M. 1964. *Análisis químico de suelos*. Ediciones Omega SA: 662 p.
- Jokela E. 2004. Slash pine: still growing and growing. En: Dickens E, Barnett J, Hubbard W & Jokela E (Eds) *Proceedings of the slash pine symposium*. Gen. Tech. Rep. SRS-76. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 148 p.
- Kimsey M, Garrison-Johnston M & Johnson L. 2011. Characterization of Volcanic Ash-Influenced Forest Soils across a Geoclimatic Sequence. *Soil Science Society America Journal*, 75: 267–279.
- Lal R. 2005. Forest soil and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 220: 242-258.
- Lasserre S, Escobar E, fernández R, Castello L, O'Lery H, Pettri M, Trujillo R, Amarilla A, Silva F, Carmuega J, Acuña G, Smorzewski M & Barboza O. 1990. Relevamiento edafológico y de aptitud de uso ganadera, forestal y agrícola de las tierras de la alta cuenca del arroyo Uruguay-i. Documento del convenio INTA - Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables. 94 p.
- Ligier D, Matteio H, Polo H & Rosso J. 1990. *Atlas de suelos de la República Argentina*. Misiones. Secretaría de Agricultura, Ganadería Pesca. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro de investigaciones de Recursos Naturales, Buenos Aires. Tomo II: 41 p.
- Martiarena R, Frangi J, Pinazo M, Von Wallis A & Fernández R. 2011a. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*, ID 761532: 10 p DOI:10.1155/2011/761532.
- Martiarena R, Pinazo M, Von Wallis A, Knebel O & Pahr N. 2011b. Alternativas de manejo para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Revista Ciencia del Suelo*, 29 (1): 39-48.

- Martiarena R, Von Wallis A & Knebel O. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Wanda, Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. *Revista Forestal Venezolana*, 53 (2): 165-173.
- Martín-García M, Delgado G, Párraga J, Gámiz E & Delgado R. 1999. Chemical, mineralogical and micromorphological study of coarse fragments in Mediterranean red soils. *Geoderma*, 90: 23-47.
- Moráes Sá J & Lal R. 2009. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research*, 103: 46-56.
- Novák V & Knava K. 2012. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: simulation of water movement in forest stony soil. *European Journal Forest Research*, 131:1727-1735.
- Piccolo G, Goya J, Frangi J, Arturi M & Vaccáro S. 2002. Materia orgánica y nutrientes en suelos de ecosistemas subtropicales de cultivo anual, foresto-ganadero y bosque secundario. *INTA, Publicaciones regionales*, Cerro Azul, Misiones (Argentina), Informe Técnico N° 76: 12 p.
- Pinazo M, Martiarena R, Von Wallis A, Crechi E, Pahr N & Knebel O. 2007. Efectos de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. establecida sobre Ultisoles de Misiones. *RIA (Revista de Investigaciones Agropecuarias, Argentina)*, 36: 5-20.
- Porta J, López-Acevedo M & Roquero C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3° edición revisada y ampliada. Ediciones Mundi-Prensa: 929 p.
- Pulido-Moncada M, Flores B, Rondón T, Hernández R & Lozano Z. 2010. Cambios en fracciones dinámicas de la materia orgánica de dos suelos, Inceptisol y Ultisol, por el uso de cultivo de cítricas. *Bioagro (Venezuela)*, 22(3): 201-210.
- Rau B, Melvin A, Johnson D, Goodale C, Blank R, Frederiksen G, Miller W, Murphy J, Todd D & Walker R. 2011. Revisiting Soil Carbon and Nitrogen Sampling: Quantitative Pits versus Rotary Cores. *Soil Science*, 176: 273-279.
- Rivero C, Chirenje T, Ma L & Martinez G. 2004. Influence of compost on soil organic matter quality under tropical conditions. *Geoderma*, 123: 355–361.

- Rytter R. 2012. Stone and gravel contents of arable soils influence estimates of C and N stock. *Catena*, 95: 153-159.
- Shi Z, Xu L, Wang Y, Yang X, Jia Z, Guo H, Xiong W & Yu P. 2012. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China. *African Journal of Biotechnology*, 11(39): 9350-9361.
- Shi Z, Yanhui W, Yu P, Xu L, Hao G & Guo H. 2008. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in Liupan Mountains, China. *Acta Oecologica Sinica*, 28(12), 6090-6098.
- Soil Survey Staff. 2010. *Keys to Soil Taxonomy*. Agriculture Handbooks 436, Eleventh Edition. NRCS, Washington DC, USA.
- Stendahl J, Lundin L & Nilsson T. 2009. The stone and boulder content of Swedish forest soils. *Catena*, 77: 285-291.
- Tetegan M, Baize N, Bouthier D & Cousin A. 2011. The contribution of rock fragments to the available water content of stony soils: proposition of new pedotransfer functions. *Geoderma*, 165: 40-49.
- USDA (United States Department of Agriculture). 1999. *Guía para la evaluación de la calidad y salud del suelo*. Departamento de Agricultura de Estados Unidos de América: 88 p.
- Vaccáro S, Arturi M, Goya J, Frangi J & Pícolo G. 2003. Almacenaje de carbono en estadios de la sucesión secundaria en la provincia de Misiones. *Interciencia (Venezuela)*, 28 (9): 521-527.
- Van Wesemael B, Mulligan M & Poesen J. 2000. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment the impact of rock fragments and soil thickness. *Hydrological processes*, 14: 1128-1133.
- Vitousek P. 2004. *Nutrient cycling and limitation. Hawaii as a Model System*. Princeton University Press, USA.
- Vitousek P & Farrington H. 1997. Nutrient limitation and soil development: experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37: 63-75.
- Walker T & Syers J. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma*, 15: 1-19.

Whitney N & Zabowski D. 2004. Total soil nitrogen in the coarse fraction and at depth.
Soil Science Society America Journal, 68: 612–619.

Capítulo 3

**EFFECTO DE LAS VARIABLES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LA
ACUMULACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA EN RODALES DE *Pinus taeda* L.
EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA**

EFFECTO DE LAS VARIABLES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LA ACUMULACIÓN DE BIOMASA ARBÓREA EN RODALES DE *Pinus taeda* L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

INTRODUCCIÓN

La masa viva vegetal de un ecosistema, principalmente expresada como peso seco o peso seco libre de cenizas por unidad de área, se define como biomasa vegetal (Newbould, 1970). En general, en los ecosistemas, la biomasa vegetal se considera equivalente a la biomasa total, ya que las plantas constituyen la mayor parte de la masa viviente de un sistema ecológico y, en referencia a los bosques suele denominarse biomasa forestal (Pedrosa *et al.*, 2013; Wendling, 1998). El conocimiento de la biomasa y la productividad primaria de los bosques recibió un gran impulso por parte del Programa Biológico Internacional, que propició definiciones y metodologías estandarizadas y el desarrollo de estudios comparativos en el mundo entero (Newbould, 1970).

La biomasa puede determinarse por métodos directos o indirectos. El método directo involucra la corta, cosecha, secado y pesado de todos los vegetales, en nuestro caso solo los arbóreos, de un área y, debido a su carácter destructivo, es aplicable a pequeñas superficies. Los métodos indirectos disponen de varias alternativas, entre las cuales una de ellas utiliza los datos de individuos de una muestra de árboles del rango de tamaño existente en un área, sea específicamente realizada para la investigación o bien usando ecuaciones de publicaciones previas, para la obtención de relaciones alométricas, en combinación con datos estructurales de los árboles, procedente de inventarios forestales. Esto causa un mínimo impacto sobre la cubierta arbórea, reduce la tarea y permite estimar la biomasa de mayores superficies de terreno (Vieira *et al.*, 2008).

Las relaciones alométricas son modelos, los cuales representan una abstracción o una representación simplificada de un aspecto de la realidad (Vanclay, 1994). Un modelo es útil si permite simular o predecir el comportamiento de un sistema de una forma más sencilla, más barata o más rápida que la experimentación directa sobre el sistema original (Calama, 2004). En el caso de la biomasa, se trata de establecer una relación alométrica entre variables, que permita estimar el peso de los diferentes componentes del árbol mediante ecuaciones, cuyas variables observadas sean de fácil registro (Porté *et al.*,

2002), donde luego por medio de la aplicación de estas ecuaciones a los datos de inventario se puede estimar, la biomasa de un rodal (Bellote & Silva, 2004).

Estimar la biomasa de un rodal es un arte impreciso (Pritchett, 1986). Tiene un alto costo, el cual se incrementa cuando se pretende mejorar la precisión de la estimación. La precisión asignará la calidad, en éste caso, del modelo de estimación de los pesos individuales, y por ende de la información que se obtendrá con el mismo. Para mejorar la calidad del modelo, en ciertas ocasiones hay que ampliar el tamaño de muestra, no obstante en ocasiones y dependiendo del objetivo y los recursos disponibles, se debe mejorar la calidad del muestreo por sobre ampliar la cantidad de muestras a tomar. La bibliografía específica muestra que el número de árboles utilizados para ajustar un modelo, por lo general no supera los 50 ejemplares (Schumacher *et al.*, 2013; Sixel, 2012; Martiarena *et al.*, 2011; Caldato, 2011; Ferrere *et al.*, 2008; Popescu, 2007). Estos modelos son utilizados generalmente para la determinación del peso individual y de la biomasa de plantaciones de un único sitio. Por el contrario, cuando se pretende abarcar una región geográfica o varias especies, los modelos utilizan más de 50 árboles (Fassola *et al.*, 2010; Vismara, 2009), siendo estos últimos modelos menos frecuentes.

La calidad de los modelos del peso de individuos también puede variar por la cantidad de variables independientes incorporadas para la estimación, en particular aquellos empleados luego para la biomasa forestal. La mayoría de ellos utilizan el DAP (Paré *et al.*, 2013; Morhart *et al.*, 2013; Sixel, 2012; Caldato, 2011; Pinazo *et al.*, 2007). El DAP, permite predecir adecuadamente el peso (Gómez Días, 2011) y, como es de esperar, existe una asociación positiva entre el aumento del DAP y el aumento del peso total individual (Sixel, 2012). Otros modelos también adicionan la altura total (Ht), pudiendo con ella mejorar la estimación del peso (Vismara, 2009; Balbinot *et al.*, 2008; Wang, 2006). La inclusión de más variables, por ejemplo edad de la plantación, densidad del rodal o efectos ambientales, debe justificarse estadísticamente y, además recordar que es necesario lograr un balance entre la precisión del ajuste y la practicidad de su aplicación (Schumacher *et al.*, 2013; Ferrere *et al.*, 2008). De igual manera, si los modelos serán aplicados a una amplia región geográfica, debe decidirse si se empleará un único modelo o bien distintos modelos sectoriales de acuerdo a las condiciones ambientales que puedan modificar, por ejemplo, la compartimentalización de la biomasa en los individuos.

Conocer la biomasa acumulada en un rodal permite conocer el potencial productivo del mismo, y ayuda al silvicultor en la elección de prácticas silviculturales compatibles con

el cuidado del medio ambiente (Schumacher, 2011; Martiarena *et al.*, 2011b; Castañeda Mendoza, 2005; Santa Regina, 2000). Así también, permitirá escoger un sistema adecuado de explotación forestal en beneficio de mantener la productividad del sitio (Viera *et al.*, 2011). Además, la biomasa acumulada es la información base para estimar el stock de nutrientes acumulados en el rodal (Paré *et al.*, 2013; Martiarena *et al.*, 2011a; Radtke *et al.*, 2009; Pinazo *et al.*, 2007; Goya *et al.*, 2003). De estas aplicaciones, en especial de la última, se deduce que la precisión de la estimación del peso de los individuos arbóreos y de la biomasa es uno de escalones más importante del proceso.

El sitio y el manejo silvicultural, son factores que afectan la producción cualitativa y cuantitativa de biomasa del rodal (Sixel, 2012; Elesbao & Schneider, 2011), siendo el manejo de la densidad la principal causa que afecta la producción de biomasa. En Misiones, Argentina, el *P. taeda* manejado bajo diferentes intensidades de raleo a lo largo del turno de rotación, acumuló 323 Mg.ha⁻¹ de biomasa aérea en manejo sin raleo a partir de los 8 años de edad, mientras que solo acumuló 161 Mg.ha⁻¹ donde fue manejado con el 33% del AB remanente respecto de la situación anterior (Pinazo *et al.*, 2007). Esto expresa el efecto de los sucesivos raleos sobre la acumulación total de biomasa en el sitio. El *P. taeda* posee menor exigencia nutricional que otras especies, mientras que algunos investigadores lo mencionan de baja exigencia nutricional (Reissmann & Wisniewski, 1999). No obstante, la calidad de sitio condiciona el crecimiento y la producción de biomasa de la plantación (capítulo 2 de esta Tesis; Morales, 2007). En Brasil, en ocho sitios diferentes cultivados con *P. taeda*, se constató que las proporciones de biomasa de raíces disminuyen en la medida que se incrementa la calidad de sitio, lo cual sugiere que los árboles invierten menos recursos en raíces en sitios de mejor calidad respecto de los más pobres (Bizon, 2005). Ante la mejor calidad de sitio la planta acumula mayor proporción de la biomasa en la parte aérea, situación que es de la preferencia del silvicultor. En otras especies, también se puede observar la mayor acumulación de biomasa aérea en sitios de mejor calidad respecto de sitios pobres (Ferrere *et al.*, 2008; Goya *et al.*, 1997). El mayor cociente de biomasa aérea/subterránea en sitios de mejor calidad es un fenómeno ampliamente conocido y difundido en las plantas (Lambers *et al.*, 2006). El cociente biomasa aérea / biomasa subterránea suele depender de la disponibilidad de agua, ya que a medida que aumenta la escasez de agua aumenta la inversión en tejidos de absorción; asimismo depende de la fertilidad de los suelos.

En la zona de plantación de *P. taeda* en las provincias de Misiones y Corrientes hay algunos antecedentes en el ajuste de ecuaciones para estimar los pesos secos individuales de los diferentes compartimentos arbóreos del *P. taeda*, no obstante, esas ecuaciones solo se ha realizado para un conjunto de sitios que no cubren la totalidad de la variabilidad. Fernández *et al.* (2011) presentan ecuaciones para estimar el peso de fuste y de hojas, ambas corresponden a ecuaciones logarítmicas en la que usan como variables independientes el DAP y Ht, ecuaciones que fueron ajustadas en la EEA Montecarlo de INTA. Si bien los indicadores de precisión de estas ecuaciones son satisfactorios, las mismas fueron ajustadas sin considerar las diferencias de crecimiento existentes entre las diferentes condiciones de sitio, por lo cual bajo ciertas circunstancias podrían sobrestimar o subestimar las variables dependientes de acuerdo con el sitio en que sean aplicadas, ya que el crecimiento, y por ende la masa de los individuos, son distintas bajo diferentes situaciones de sitio (capítulo 2 de esta Tesis). Por ello, el objetivo de este capítulo El objetivo de este capítulo fue desarrollar funciones para estimar la biomasa de los compartimientos arbóreos de *P. taeda* y determinar el efecto de las variables edafoclimáticas sobre sus tasas de acumulación.

METODOLOGÍA

Determinación de la biomasa arbórea aérea

Se utilizaron 31 rodales seleccionados, correspondientes a los tres agrupamientos edafoclimáticos descriptos (capítulo 2 de esta Tesis) e identificados como Ron, Ros y Pe. La estructura de esos rodales se describe en la Tabla 2.1. En ellos se aparearon en total 233 árboles, distribuidos 89 en Ron, 102 en Pe y 42 en Ros. Con las mediciones registradas en cada una de las parcelas de cada rodal (véase Capítulo 2), se clasificaron los árboles en clases diamétricas. En cada uno de los sitios se seleccionaron y aparearon, por lo menos, 6 árboles. Los mismos correspondieron 4 a las clases diamétricas centrales con mayor frecuencia de árboles, mientras que los dos restantes correspondieron 1 a la clase diamétrica inferior y el restante a la clase diamétrica superior, cuyo objetivo fue captar la variabilidad del rodal. El peso seco de los mismos se obtuvo por medio de técnicas de análisis dimensional (Whittaker & Woodwell, 1968). El material de cada árbol se separó en los compartimentos fuste (sin corteza), corteza (sólo de fuste), ramas < 5 cm de diámetro, ramas > 5 cm de diámetro, ramas secas, hojas y conos (Figura 3-1 y Figura

3-2). La separación en compartimentos responde a que cada uno de ellos posee concentración de nutrientes diferente. Cada compartimento de cada árbol recibió el siguiente tratamiento:

Fuste sin corteza: el mismo fue cortado en un número variable de trozas en función de los requerimientos de cada empresa propietaria del sitio donde se desarrollaron los trabajos. Cada una de las trozas fue medida y cubicada por medio de la fórmula de Smalian (Mackay, 1968), a través de la cual se obtuvo el volumen de la misma. De cada troza se extrajeron secciones transversales (rodajas) a diferentes distancias desde la base y se llevaron a laboratorio, donde 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 del peso de las trozas, el peso total del fuste. La determinación de la densidad básica de la madera se realizó por medio de probetas según indican las normas IRAM 9544 (1965). De cada una de las secciones del fuste que se llevaron a laboratorio se extrajo un listón que atravesaba de lado a lado la sección en forma tangencial a la médula. A partir de la médula y hacia los extremos externos del listón se obtuvieron consecutivamente probetas para la determinación de la densidad de cada una de ellas. En cada árbol adulto se extrajeron aproximadamente 60 probetas; ese número disminuyó en la medida que el árbol fue de menor edad. El valor final de la densidad en cada troza se obtuvo promediando los valores obtenidos a lo largo del listón correspondiente.

Corteza del fuste: de cada una de las secciones transversales de fuste llevadas a laboratorio, sobre la media rodaja no alterada durante la determinación de la densidad básica de la madera, se calculó la relación fuste-corteza. Para ello, se separó la corteza de la madera y se secaron ambos materiales en estufa a 70 °C hasta peso constante. Con el peso seco de ambos, se calculó la fracción de peso de corteza respecto al fuste. Con esta fracción se determinó el peso seco total de la corteza de cada uno de los árboles multiplicando dicha fracción por el peso seco total del fuste.

Hojas, frutos, ramas secas, ramas >5 cm y ramas <5 cm: el total del material de cada uno de estos compartimentos se separó y pesó húmedo en el campo con una balanza electrónica de 300 kg de capacidad cuyo error estimado como consecuencia de la graduación podría alcanzar el 0,02%. Del material de cada compartimento, se extrajo una alícuota compuesta por cada árbol, para determinar el peso seco final de cada uno. Para la determinación del peso seco del compartimento se pesaron las alícuotas en húmedo, y luego, en seco para lo cual se colocaron en estufa a 70° C hasta peso constante (Figura

3-2 y Figura 3-3). Con esos datos se calculó la relación peso seco / peso húmedo y se obtuvo un coeficiente de razón para cada compartimento de cada árbol, el cual se aplicó a la totalidad de material húmedo pesado en campo, lo que permitió obtener el peso seco total del compartimento.



Figura 3-1. Actividades de muestreo de biomasa en campo, A) selección de árboles, B) apeo de árboles, C) cubicación de fuste y, D) trozado de fuste.



Figura 3-2. Actividades de muestreo de biomasa en campo, A) separación por compartimentos, B) pesado del compartimento ramas secas y, C) pesado del compartimento hojas.



Figura 3-3. Recolección y procesamiento de muestras, A) selección de ramas para extracción de muestras, B) extracción de muestras, C) secado de muestras de los compartimentos de la copa y, D y E) trozado y procesamiento de muestras de fuste.

Ajuste de ecuaciones

Se aplicaron modelos lineales mixtos utilizando la totalidad de los datos de peso seco de cada compartimento como variables dependientes (fuste, hojas, corteza y ramas), mientras que las variables independientes fueron el DAP (diámetro a la altura del pecho), Ht (altura total), la edad (efectos fijos del modelo) y la zona geográfica representada por los agrupamientos edafoclimáticos (efecto aleatorio del modelo). A los efectos del ajuste de los modelos el compartimento ramas comprendió la suma de ramas < 5 cm de diámetro, ramas > 5 cm de diámetro y ramas secas, no obstante como se mencionó previamente, el pesado en campo y el secado y, el posterior análisis de concentración de nutrientes fue realizado en forma independiente para cada compartimento de cada uno de los 233 árboles apeados; para ello, una vez ajustado el modelo se calculó el total de ramas y se multiplicó por la fracción original de peso seco correspondiente a cada uno de los compartimentos constituyentes. La ausencia de frutos en edades jóvenes y la presencia intermitente en edades intermedias no permitió ajustar un modelo para el compartimento frutos que se adapte a dicha situación.

Mediante la aplicación de los modelos mixtos es posible analizar si la ordenada al origen y la pendiente de cada efecto fijo requiere valores específicos correspondientes a los diferentes niveles del factor aleatorio comparándose los modelos mediante su valor de AIC (Akaike Information Criterion) (West *et al.*, 2007). Un menor valor de AIC refleja un modelo más apropiado y la comparación de valores de AIC se llevó a cabo mediante la prueba de L ratio (West *et al.*, 2007). A partir de los resultados obtenidos se decidió si resultaba necesaria la aplicación de modelos individuales para cada compartimento arbóreo de cada agrupamiento edafoclimático para estimar el peso seco de los mismos. Este procedimiento solo se llevó a cabo para la biomasa de fuste que representa más del 70% de la biomasa total (Pinazo *et al.*, 2007).

El valor esperado de los modelos individuales para cada sitio (Ron, Pe y Ros), estuvo dado por la regresión lineal entre el peso seco del respectivo compartimento y las variables DAP, Ht y edad del árbol. Los parámetros estimados fueron β_0 como ordenada al origen y β_1 , β_2 y β_3 como pendientes de la estimación. El modelo incluyó también un efecto aleatorio de sitio y el término de error aleatorio como se observa en la ecuación 1. Los supuestos del modelo son la distribución normal para el peso seco, que las componentes aleatorias (μ y e) se distribuyen normalmente con media cero y varianzas σ_μ^2 y σ_e^2 . Las componentes aleatorias se suponen no correlacionadas.

$$\text{Log peso seco} = \beta_0 + \beta_1 * \log(\text{DAP}) + \beta_2 * \log(\text{Ht}) + \beta_3 * \text{Edad} + \beta_4 * \text{sitio} + \epsilon$$

(Ecuación 1)

donde:

DAP: diámetro a la altura de pecho (cm)

Ht: altura total (m)

Edad: edad de la plantación (años)

El ajuste de modelos en cada sitio requirió la transformación de las variables, por medio de logaritmos. El motivo de dicha transformación se debió a que el resultado de las ecuaciones sin transformación de las variables arrojó resultados negativos de peso seco, principalmente debido a la alta variabilidad etaria de los rodales.

En segunda instancia, sobre la misma estructura de los modelos, se agregaron variables predictoras como la edad de la plantación, el índice de sitio (IS) y la densidad de rodal (N). Mediante un procedimiento de selección de variables de a pasos (“stepwise”) se obtuvo la combinación de variables que debían utilizarse para la obtención del modelo con mejor resultado.

Se evaluaron las diferencias en la biomasa estimada a nivel del rodal con modelos basados sólo en el DAP y la Ht con los que incluyeron, además, otras variables. Con esa finalidad se calcularon los límites de confianza inferior y superior de cada predicción a nivel de árbol y así se obtuvieron los valores mínimos y máximos esperables para la biomasa a nivel de rodal para cada modelo. La necesidad de agregar más variables a los modelos basados en DAP y Ht se evaluó a partir de la superposición de los intervalos de confianza calculados.

Con la ecuación seleccionada se estimó la biomasa para cada sitio y se calculó el incremento medio anual de biomasa (IMAB) a nivel de rodal, de acuerdo con la ecuación 2:

$$\text{IMAB} = \text{biomasa} / \text{edad} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde:

IMAB: incremento medio anual de biomasa

biomasa: biomasa del rodal ($\text{Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$)

edad: edad de la plantación (años)

Se calculó el incremento medio anual a nivel de árbol individual (IMAB_i), realizando el cociente del IMAB por la densidad del rodal.

Determinación de coeficientes asociados a variables meteorológicas

Las estaciones meteorológicas de las cuales fueron utilizados los registros para los cálculos se encuentran ubicadas, cuatro en la provincia de Misiones y una en la provincia de Corrientes. Las localidades fueron Puerto Esperanza (26°01' S y 54°38' O), Eldorado (26°24' S y 54°37' O), Montecarlo (26°33' S y 54°45' O) y Santo Pipó (27°07' S y 55°25' O) en Misiones y, Gobernador Virasoro (28°05' S y 56°01' O) en Corrientes. Los valores fueron registrados en el período 1986 a 2009, utilizando luego para cada plantación, los datos correspondientes al período de crecimiento de cada una de ellas. Se observa en la Figura 3-4, las isohietas correspondientes para las provincias de Misiones y Corrientes, la ubicación de las estaciones meteorológicas y cada uno de los rodales correspondientes a los agrupamientos Ron, Pe y Ros.

Con los datos de temperatura media mensual y precipitación media mensual, se calculó el coeficiente P/ETP (Precipitación/Evapotranspiración potencial) para el período de las respectivas plantaciones de cada región. El coeficiente P/ETP anual se determinó por sumatoria de los cocientes mensuales.

El coeficiente anual se calculó para el año biológico, suponiendo que las plantaciones fueron establecidas en el mes de Julio, mes central de la época de plantación; esto se debió a que no existen registros precisos de la fecha de plantación de cada uno de los rodales estudiados. En definitiva, para el primer año de crecimiento de una plantación determinada, su coeficiente P/ETP corresponde a los registros del período Julio del año en curso a Junio del año siguiente. La ETP se calculó con la fórmula de Thornthwaite como indica la ecuación 3:

$$ETP_{sin\text{corregir}} \left(\frac{mm}{año} \right) = 16 * \left(\frac{10*t}{I} \right)^a \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Donde:

t: temperatura media mensual (°C)

I: índice de calor anual y se obtiene por sumatoria de los índices mensuales (i)

$$i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1.514} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

a: coeficiente

$$a = (0.000000675 * I^3) - (0.0000771 * I^2) + (0.01792 * I) + 0.49239 \quad (\text{Ecuación 5})$$

El valor obtenido de ETP es afectado por la cantidad de horas de sol en cada región de acuerdo con su latitud y por la cantidad de días de cada mes, por lo que dicho valor debe ser corregido, para lo cual se utiliza la ecuación 6:

$$ETP_{\text{corregida}} \left(\frac{mm}{\text{año}}\right) = ETP_{\text{sin corregir}} * \left(\frac{N}{12}\right) * \left(\frac{d}{30}\right) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

N: número máximo de horas de sol

d: días del mes

La comparación de la relación P/ETP se efectuó por medio de análisis de variancia con los valores correspondientes a dicha relación para cada una de las plantaciones, cuyo valor correspondió a la estación meteorológica mas cercana.

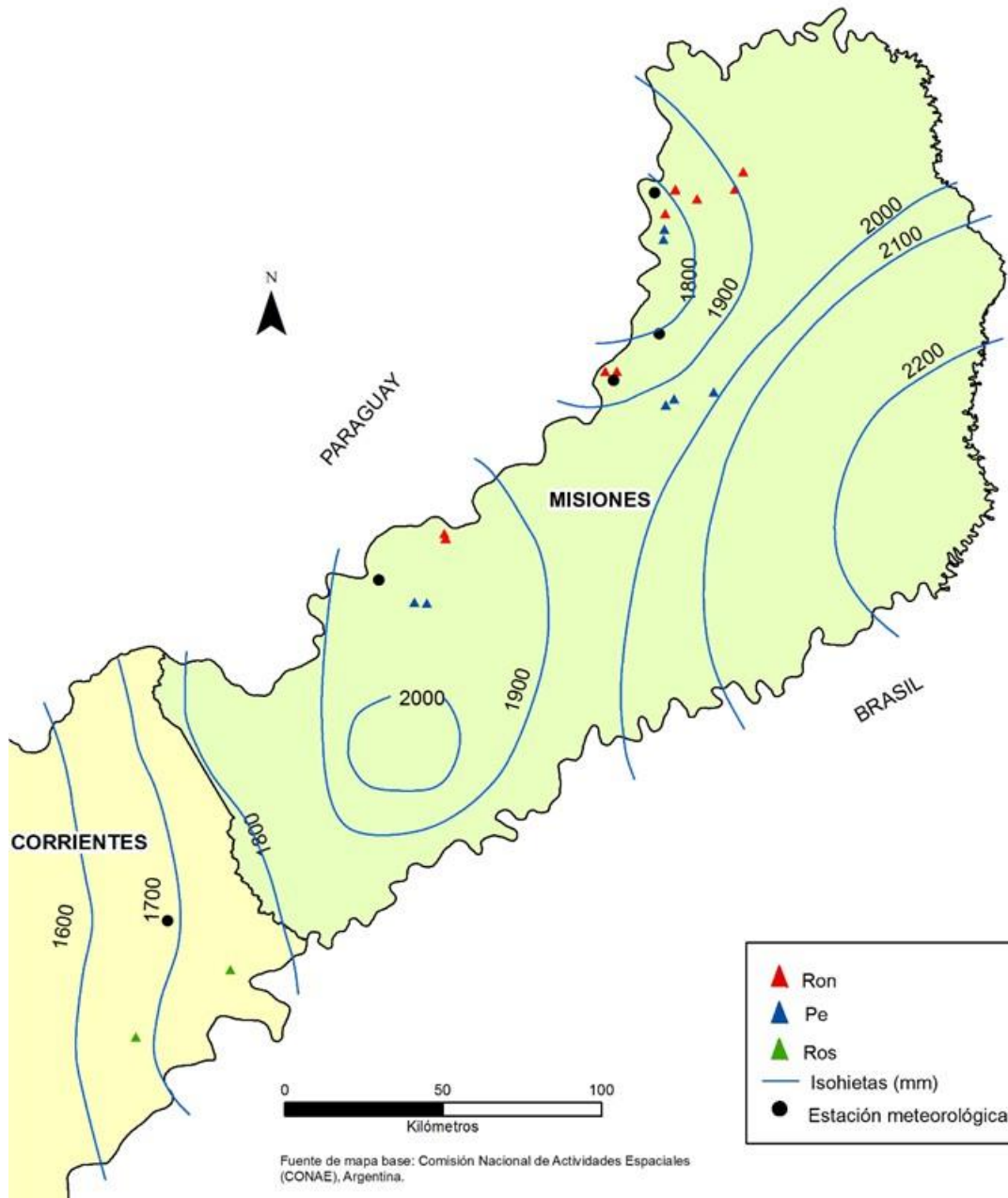


Figura 3-4. Ubicación de las estaciones meteorológicas y plantaciones utilizados en esta Tesis con las respectivas isohietas para su área de influencia.

Determinación de índices asociados con el manejo de las plantaciones

Para determinar un coeficiente relacionado al manejo de las plantaciones estudiadas se determinó la densidad máxima del rodal y se calculó el IDR máximo para cada edad de las plantaciones de *P. taeda* a partir de datos precedentes para la zona de cultivo (Martíarena, 2008). La densidad máxima del rodal es la densidad alcanzada por un rodal que no recibió raleos. Se determina en plantaciones con alta competencia intraespecífica que hayan alcanzado mortalidad natural. Para el presente estudio el insumo se obtuvo en una plantación de *P. taeda* de 20 años de edad (Martíarena, 2008). Con los datos pertinentes de esa plantación se calculó el IDR máximo de acuerdo con la ecuación 7:

$$IDR_{max} = N * \left(\frac{Dg}{25.4}\right)^r \quad \text{(Ecuación 7)}$$

Donde:

IDR: índice de densidad de Reineke

N: densidad arbórea del rodal (pl.ha⁻¹)

Dg: diámetro cuadrático medio (cm)

r: -1.605 y corresponde al valor de la pendiente de la línea de autoraleo

El diámetro cuadrático medio, presente en la ecuación 7, se calculó de acuerdo con la ecuación 8:

$$Dg = \sqrt{\left(\frac{4}{\pi}\right) * \left(\frac{G}{N}\right)} \quad \text{(Ecuación 8)}$$

Donde:

G: área basal de la plantación (m².ha⁻¹)

A partir del IDR y del criterio basado en que el régimen maderero de las plantaciones debe encontrarse en el rango de 38 a 55% del IDR máximo (Santiago García *et al.*, 2013), se definieron 3 rangos de manejo: 1) plantaciones con alta densidad (manejo suave), cuyo IDR es mayor del 55% del IDR máximo, 2) plantaciones con manejo intermedio, con IDR entre 38 y 55% del IDR máximo y, 3) plantaciones con baja densidad (manejo intensivo), con IDR menor a 38% del IDR máximo. Las plantaciones de 3 años de edad

fueron clasificadas como excepción de lo establecido en el párrafo precedente. El motivo por el cual se clasificaron por separado se debe a que a dicha edad recién comienza el cierre de copas, con lo cual no se puede considerar que alcanzaron un IDR máximo, lo que se evidencia debido a que bajo las densidades que se planta en la región no existe mortalidad natural por competencia a esa edad. Los rangos de manejo para esta edad fueron los siguientes: 1) plantaciones con alta densidad (manejo suave), cuyo IDR corresponde al de densidad inicial de plantación, tolerando un 10% por mortalidad durante el establecimiento, 2) plantaciones con manejo intermedio, cuyo IDR es entre 90 y 55% del IDR máximo y, 3) plantaciones con baja densidad (manejo intensivo), de IDR menor a 55% del IDR máximo.

Ajuste de modelos para identificar las variables que inciden sobre el IMAB

Se ajustaron modelos de regresión múltiple para evaluar la incidencia del índice de sitio, la edad, el número de árboles por hectárea, la variación latitudinal y el cociente P/ETP sobre el IMAB en biomasa de hojas, ramas, corteza y fuste, a nivel del rodal (variables dependientes del modelo). Las variantes de ajuste se realizaron en 3 pasos: 1) se incluyó como variables predictoras el índice de sitio, la edad, la densidad (número de árboles por ha) y la latitud, 2) se incluyó las mismas variables reemplazando la latitud por el cociente P/ETP y, 3) se incluyó solo la latitud y el cociente P/ETP como variables predictoras. Los dos primeros pasos tuvieron la finalidad de analizar, además del efecto de cada variable, si la latitud y P/ETP se comportaban de manera similar en combinación con las demás variables. En el tercer paso, se evaluó si los efectos de la latitud y del cociente P/ETP eran redundantes, es decir, si la variación latitudinal quedaba explicada por la variación en el cociente P/ETP. En ese caso, ambas variables darían resultados no significativos, aun cuando en los modelos 1 y 2 hayan dado significativas. Si, en cambio, alguna o ambas variables presentaban efectos significativos en el paso 3, se interpretó como la existencia de una variación latitudinal no relacionada con la variación del cociente P/ETP.

Estadística

Los ajustes de modelos se realizaron con el paquete estadístico del Software R. Las comparaciones de modelos también se efectuaron con el mismo software y se realizaron

a través del análisis de varianza, con la cual se comparó la varianza residual de los modelos (Faraway, 2006). Los niveles de significancia utilizados fueron del 95%.

La comparación de la cantidad de biomasa acumulada en las plantaciones de cada agrupamiento edafoclimático se efectuó por medio de análisis de variancia de las cantidades en los compartimentos aéreos y se aplicó el Test de Tukey con significancia de 0.05 para determinar diferencias entre agrupamientos edafoclimáticos. En dicho análisis se utilizó la variable edad como covariable. El compartimento ramas agrupó la totalidad de biomasa de los 3 compartimentos de ramas (ramas < 5 cm; ramas > 5 cm y, ramas secas).

También se aplicó análisis de variancia con nivel de significancia de 0.05 para comparar la relación P/ETP entre zonas geográficas y se aplicó el test de Tukey para comparar los agrupamientos. La comparación se efectuó entre los coeficientes calculados para los rodales agrupados en Pe y Ron respecto de los coeficientes calculados para los rodales Ros.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Registros meteorológicos durante el período de crecimiento de las plantaciones

La temperatura media anual para el período 1986-2009 mostró el mayor valor en la localidad de Puerto Esperanza con 21.9° C, mientras que el valor más bajo se registró en la localidad de Santo Pipó con 20.8° C. La precipitación media anual, para el mismo período, registró su mayor valor en la localidad de Eldorado con 2041 mm, mientras que el menor registro se dio en la localidad de Gobernador Virasoro con 1723 mm. Puede observarse en la Figura 3-4 la ubicación de las 5 estaciones meteorológicas, ubicadas de Norte a Sur respectivamente, Puerto Esperanza, Eldorado, Montecarlo, Santo Pipó y Gobernador Virasoro.

En todas las localidades, las temperaturas medias mensuales siguieron un patrón de variación sinusoidal acorde con la latitud de las estaciones meteorológicas. Con la excepción de parte del verano, las temperaturas medias mensuales para el citado período, alcanzaron valores superiores en la localidad más norteña de la región de estudio (Figura

3-5A). Las precipitaciones para el mismo período tuvieron un patrón de distribución bastante similar en todas las localidades, donde los meses menos lluviosos fueron los del invierno (Julio y Agosto), y los más lluviosos los de primavera, a los que se asocia un pico otoñal menor (Figura 3-5B).

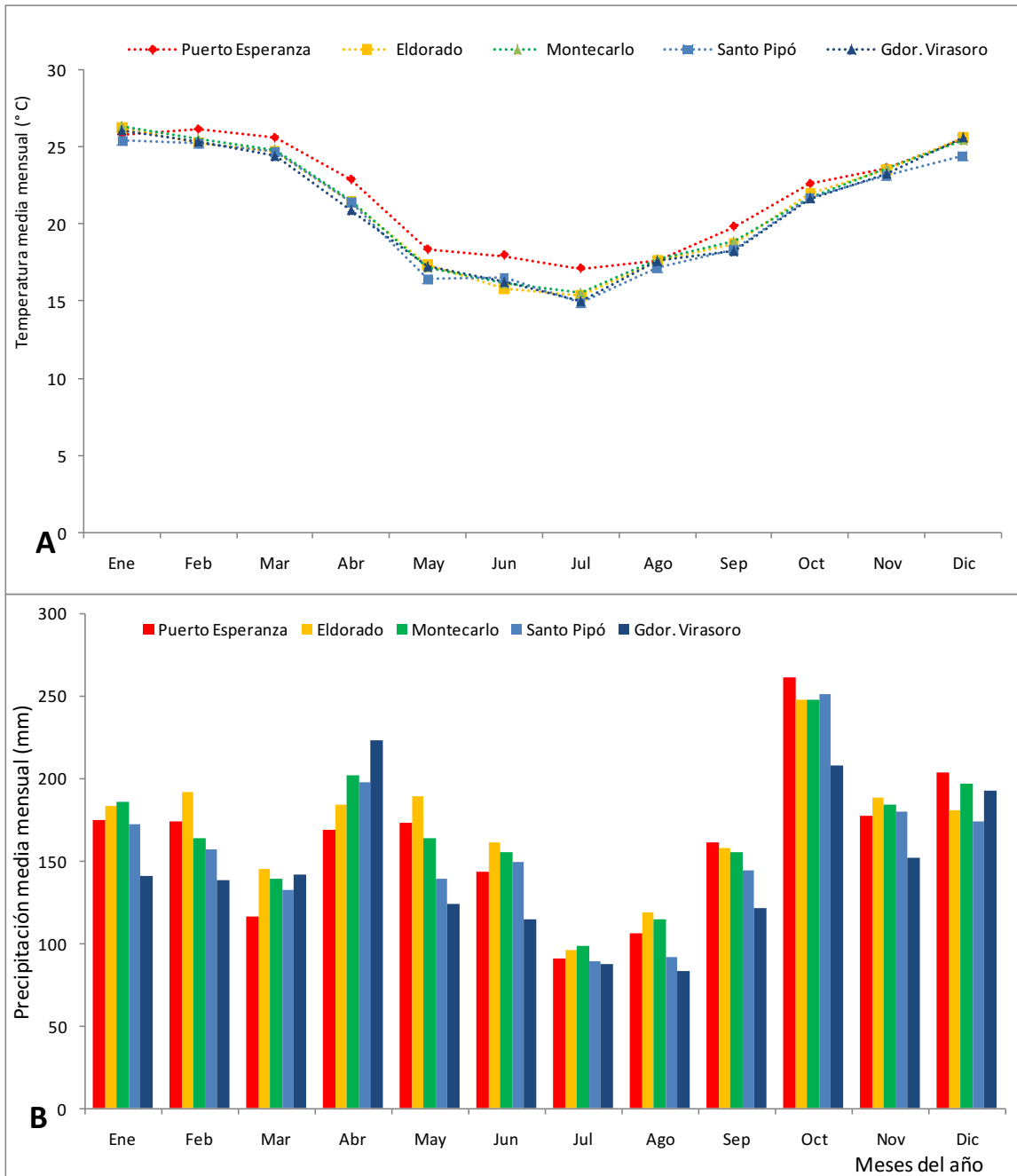


Figura 3-5. Registros meteorológicos para el período 1989 - 2009 para las localidades de Puerto Esperanza, Eldorado, Montecarlo, Santo Pipó y Gobernador Virasoro, secuencia de localidades según su ubicación latitudinal creciente; (A) temperatura media mensual y, (B) precipitación media mensual.

Los registros citados por la bibliografía para los periodos 1921/50, 1951/80 y 1988/2002, indican para la localidad de Gobernador Virasoro, precipitaciones medias anuales de 1419, 1563 y 1841 mm respectivamente (ECOS / GEF-PNUD, 2002), cuyo valor del último período es similar con los registros hallados en la presente tesis para el agrupamiento edafoclimático Ros. El creciente aumento de las precipitaciones con el avance del tiempo se debe al cambio climático global, situación que está generando cambios de uso de la tierra (FAO, 2012). El incremento de precipitaciones en la provincia de Corrientes podría favorecer el aumento de las forestaciones en campos que tradicionalmente fueron agrícola ganaderos.

Determinación del peso seco total y por compartimento de los individuos arbóreos

La aplicación de modelos mixtos sobre el peso individual de los diferentes compartimentos de la totalidad de árboles apeados, con efectos fijos DAP, Ht y edad de la plantación, y efecto aleatorio el agrupamiento edafoclimático, indicó la necesidad de ajustar modelos por zonas debido a que se hallaron diferencias significativas entre modelos (Tabla 3-1) y, el menor valor de AIC correspondió al modelo con ordenada y pendiente específicos para cada agrupamiento edafoclimático.

Tabla 3-1. Comparación de los modelos con parámetros de los efectos fijos (DAP y Edad) específicos para cada nivel del factor aleatorio "Zona" mediante la prueba de cociente de probabilidad (likelihood ratio) con la biomasa de fuste como variables dependientes en cada caso.

Compartimento	Modelo	AIC	L Ratio	P	
Fuste	M1	2687.900	--	--	
	DAP	M2	2892.693	208.8	<.0001
	M3	2689.732	5.816514	0.0546	
	M1	2896.693	--	--	
	Edad	M2	2892.693	4.023555e ⁻⁰⁷	1
	M3	2689.732	202.9613	<.0001	

Referencias: M1: con pendiente y ordenada al origen específicos, M2: con ordenada al origen común, M3: con pendiente común, AIC: criterio de información de Akaike, P: significancia en la comparación de M2 y M3 vs. M1.

Los modelos ajustados para los agrupamientos Ron, Pe y Ros, de los compartimentos arbóreos fuste, hojas, ramas y corteza, arrojaron resultados altamente significativos, cuyo valor de significancia fue $P < 0.000$ en la totalidad de los ajustes. Puede observarse en la

Tabla 3-2, los resultados del estadístico R^2 , para los modelos ajustados solo con variables predictoras DAP y Ht (modelo 1) y los resultados del estadístico R^2 para los modelos ajustados con variables predictoras que se desprendieron a partir del procedimiento de selección de variables de a pasos (“stepwise”). Las variables predictoras utilizadas en el modelo 2 fueron DAP, Ht, IS, N y Edad.

Tabla 3-2. Valores de R^2 obtenidos con el ajuste de ecuaciones para cada compartimento y en cada agrupamiento edafoclimático para el modelo 1 (variables predictoras DAP y Ht) y modelo 2 de acuerdo por lo determinado a través del procedimiento stepwise (variables predictoras densidad del rodal, índice de sitio y edad).

Compartimento	Sitio					
	Ron		Pe		Ros	
	Modelo1	Modelo2	Modelo1	Modelo2	Modelo1	Modelo2
Fuste	0.9569*	0.9630*	0.9847*	0.9919*	0.9793*	0.9813*
	(DAP, Ht, IS, N)		(DAP, Ht, Edad, IS, N)		(DAP, Ht, IS)	
Hojas	0.7815*	0.7860*	0.8731*	0.8874*	0.7243*	0.8375*
	(DAP, Ht, Edad)		(DAP, Ht, Edad, IS)		(DAP, Edad, IS, N)	
Ramas	0.8711*	0.8711*	0.9440*	0.9510*	0.8463*	0.8680*
	(DAP, Ht)		(DAP, Edad)		(DAP, Ht, Edad, IS, N)	
Corteza	0.9299*	0.9397*	0.9412*	0.9468*	0.9648*	0.9746*
	(DAP, Ht, Edad, N)		(DAP, Ht, Edad, IS)		(DAP, Ht, Edad, IS, N)	

Referencias: Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso. Entre paréntesis variables predictoras seleccionadas por el procedimiento *stepwise* con las cuales se ajustó el modelo 2. *: Significa valor de $p < 0.000$.

Los valores obtenidos de R^2 en el presente trabajo dejan ver que la precisión en el ajuste es elevada, independientemente de la incorporación o no de variables adicionales a DAP y Ht.

Los modelos que solo utilizan variables predictoras DAP y Ht son los modelos más sencillos. Al comparar los valores de R^2 , para un mismo agrupamiento y un mismo compartimento, entre los modelos más sencillos y los de mayor número de variables predictoras se observan mínimas diferencias entre ellos (Tabla 3-2). A partir de ello, se decidió utilizar el modelo con menor cantidad de variables independientes para la estimación del valor esperado (modelo 1).

En la Tabla 3-3 se pueden observar los coeficientes de las 12 ecuaciones para estimar el peso seco de individuos arbóreos correspondiente para cada agrupamiento edafoclimático (Ron, Pe y Ros) y, los respectivos compartimentos arbóreos (fuste, hojas, ramas y corteza).

Tabla 3-3. Valores de los coeficientes de las ecuaciones del modelo 1 ($\text{Log}Y=\beta_0+\beta_1*\log(\text{DAP})+\beta_2*\log(\text{Ht})+\epsilon$), para cada compartimento arbóreo de *P. taeda* y su respectivo agrupamiento edafoclimático.

Compartimento		Coeficientes		
		Sitio		
		Ron	Pe	Ros
Fuste	Intercepto	-5.3612	-3.7741	-4.2681
	DAP	1.6017	1.6320	1.5005
	Ht	1.8085	1.2425	1.4642
Hojas	Intercepto	-1.6123	-1.4468	-1.9068
	DAP	2.5398	1.8534	3.4150
	Ht	1.2559	-0.6113	-2.3343
Ramas	Intercepto	-2.5216	-3.741	-3.9572
	DAP	2.1936	2.434	3.7721
	Ht	-0.3157	-0.1207	-1.6858
Corteza	Intercepto	-4.8337	-4.0184	-6.0370
	DAP	0.9817	1.4822	1.6639
	Ht	1.4580	0.6344	1.1043

Referencias: Ron: suelo rojo de la zona norte; Pe: suelo pedregoso; Ros: suelo rojo de la zona sur; DAP: diámetro a la altura de pecho; Ht: altura total

Relación P/ETP y biomasa acumulada en cada agrupamiento edafoclimático

La relación P/ETP fue significativamente mayor para los sitios de los agrupamientos edafoclimáticos Ron y Pe respecto del agrupamiento Ros. La biomasa total en las plantaciones de *P. taeda* fue significativamente diferente entre agrupamientos edafoclimáticos. La mayor acumulación de biomasa total se registró en el agrupamiento Ros, el cual se diferenció del agrupamiento Pe, mientras que no se diferenció del agrupamiento Ron. Entre los agrupamientos Pe y Ron no se detectaron diferencias significativas respecto del agrupamiento de biomasa. Los mismos resultados entre agrupamientos fueron detectados para los compartimentos fuste y corteza, mientras que no se observaron diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos para los compartimentos hojas y ramas.

Biomasa acumulada por rangos de edades en los compartimentos aéreos

El análisis de rodales individuales o agrupados por rangos de edades, mostró que, en los rodales de 3 años de edad (aquellos aún sin manejo silvicultural, crecidos libres de competencia intraespecífica), los valores absolutos de biomasa foliar de los sitios de suelos rojos (rodales 1, 2, 5 y 6), fue 2.2 veces mayor que la biomasa de hojas de los sitios con suelos pedregosos (rodales 4 y 5), cuyos promedios fueron de 5.9 y 2.7 Mg.ha⁻¹,

respectivamente en las plantaciones con suelos rojos y plantaciones con suelos pedregosos (Tabla 3.5). Para las ramas los sitios Ron y Ros, en promedio, acumularon 3.3 veces más biomasa de ramas, que los sitios con suelos pedregosos, lo que correspondió a 5.2 y 1.6 Mg.ha⁻¹, respectivamente. Como se describió en el capítulo 2, los sitios con suelos pedregosos, si bien poseen mayor concentración de nutrientes en el suelo, tienen menor capacidad de retención de agua, factor que puede haber influenciado la acumulación de biomasa de estos compartimentos.

En el mismo grupo de rodales de 3 años de edad, la proporción de hojas respecto de las ramas, también fue diferente en los sitios con diferentes tipos de suelo. En los rodales con suelos rojos (Ron y Ros) la proporción hojas : ramas fue de 1.2, mientras que en los sitios con suelos pedregosos fue de 1.8. La suma de menor cantidad de hojas y mayor proporción de este compartimento respecto de las ramas, muestra que las plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos tardarán más tiempo en comenzar con la competencia del espacio aéreo, lo que muestra en lo práctico para el silvicultor, que probablemente se deba retrasar el primer raleo, como así también establecer nuevas áreas basales óptimas para la especie sobre suelos pedregosos, ya que las existentes son para suelos rojos (Crechi *et al.*, 2001). La menor biomasa de hojas parece destacar las mayores limitaciones de los sitios pedregosos, y en éstos, la mayor proporción foliar respecto de las ramas sugiere que las plantas de esa edad requieren un menor sistema de soporte y distribución espacial de su biomasa foliar, y privilegian su sistema fotosintético por sobre la formación de estructuras no productivas.

La biomasa de fuste, si bien no responde de la misma manera en los diferentes sitios, en promedio de los sitios rojos respecto de los sitios pedregosos en las plantaciones de 3 años de edad, las plantaciones de los sitios con suelos rojos fue 37% mayor.

La acumulación de biomasa aérea a los 3 años de edad es mayor en sitios con suelos rojos respecto de los pedregosos. No obstante, la comparación de datos de crecimiento en altura total reportados hasta los dos años de edad de las plantaciones de suelos pedregosos del presente trabajo, no reflejan diferencias en el crecimiento en altura total, comparadas con otras plantaciones en suelos pedregosos (Faustino *et al.*, 2011), como en suelos rojos de las provincias de Corrientes (Lupi *et al.*, 2005) y Misiones (Martiarena *et al.*, 2004).

Tabla 3-4. Biomasa estimada y límites de confianza de la estimación de los compartimentos fuste y corteza de las plantaciones de *P. taeda* en cada rodal de muestreo.

Biomasa (Mg.ha ⁻¹)								
Rodal	Edad	Sitio	Fuste			Corteza		
			Li	Best	Ls	Li	Best	Ls
1	3	Ron	1.21	2.86	6.79	0.30	0.68	1.51
2	3	Ron	1.10	2.60	6.17	0.21	0.66	1.48
3	3	Pe	0.99	1.70	2.92	0.21	0.47	1.07
4	3	Pe	1.85	3.17	5.45	0.33	0.75	1.71
5	3	Ron	1.28	3.04	7.24	0.37	0.82	1.84
6	3	Ros	2.96	4.55	7.01	0.37	0.61	1.03
7	5	Ron	3.96	9.30	21.87	0.59	1.30	2.87
8	5	Ron	10.14	23.89	56.26	1.57	3.47	7.69
9	5	Ros	13.33	20.18	30.56	1.47	2.41	3.95
10	7	Ron	9.07	21.30	50.07	1.07	2.36	5.21
11	7	Ron	10.02	23.58	55.46	1.17	2.58	5.71
12	7	Pe	25.60	43.61	74.30	2.35	5.24	11.72
13	7	Ron	19.52	45.86	107.70	2.10	4.65	10.26
14	7	Ros	17.92	27.13	41.07	1.88	3.09	5.06
15	10	Ron	25.22	59.55	140.61	1.69	3.75	8.32
16	10	Pe	19.01	32.39	55.16	1.37	3.07	6.85
17	10	Pe	35.91	61.23	104.42	2.43	5.43	12.15
18	10	Pe	36.36	61.92	105.45	2.63	5.88	13.14
19	10	Ros	56.39	85.78	130.49	5.51	9.08	14.98
20	10	Pe	55.02	93.25	158.52	3.74	8.30	18.60
21	13	Ron	45.16	106.45	250.95	3.69	8.18	18.11
22	16	Ros	163.03	248.29	378.16	13.34	22.01	36.33
23	16	Ros	112.50	171.64	261.88	9.18	15.17	25.09
24	16	Ros	111.29	169.56	258.37	9.11	15.04	24.83
25	18	Ron	59.89	141.38	333.75	3.83	8.50	18.85
26	19	Pe	67.44	115.16	196.66	2.96	6.64	14.89
27	20	Pe	58.11	99.09	168.95	2.97	6.64	14.85
28	20	Pe	73.86	126.04	215.08	3.71	8.31	18.61
29	20	Pe	67.44	115.16	196.66	2.96	6.64	14.89
30	23	Ron	154.16	367.13	874.34	10.39	23.26	52.04
31	25	Ron	67.96	160.75	380.27	3.91	8.68	19.28

Referencias: Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso. Li: límite de confianza inferior de la estimación; Best: biomasa estimada (Mg.ha⁻¹); Ls: límite de confianza superior de la estimación.

Tabla 3-5. Biomasa estimada y límites de confianza de la estimación de los compartimentos hojas y ramas de las plantaciones de *P. taeda* en cada rodal de muestreo.

Biomasa (Mg.ha ⁻¹)								
Rodal	Edad	Sitio	Hojas			Ramas		
			Li	Best	Ls	Li	Best	Ls
1	3	Ron	2.34	5.84	14.55	2.18	5.23	12.57
2	3	Ron	2.34	5.84	14.58	2.12	5.09	12.25
3	3	Pe	0.92	2.13	4.96	0.40	1.01	2.55
4	3	Pe	1.41	3.30	7.69	0.84	2.13	5.38
5	3	Ron	2.32	5.79	14.49	2.23	5.36	12.91
6	3	Ros	2.61	6.24	14.92	2.27	4.95	10.79
7	5	Ron	2.20	5.44	13.45	2.91	6.94	16.52
8	5	Ron	5.81	14.37	35.59	7.63	18.21	43.42
9	5	Ros	3.63	8.39	19.36	5.83	12.34	26.14
10	7	Ron	3.04	7.52	18.58	4.64	11.04	26.28
11	7	Ron	3.39	8.39	20.76	5.15	12.28	29.25
12	7	Pe	4.08	9.39	21.57	6.07	15.12	37.65
13	7	Ron	3.77	9.32	23.02	6.74	16.04	38.17
14	7	Ros	3.08	7.12	16.45	6.30	13.35	28.32
15	10	Ron	2.28	5.66	14.07	5.01	11.98	28.67
16	10	Pe	2.08	4.77	10.95	4.66	11.61	28.91
17	10	Pe	3.03	6.98	16.04	6.94	17.31	43.16
18	10	Pe	3.76	8.62	19.79	8.03	19.99	49.79
19	10	Ros	4.83	11.27	26.32	13.84	29.64	63.47
20	10	Pe	4.80	10.91	25.10	11.10	27.76	69.11
21	13	Ron	3.29	8.16	20.22	7.86	18.77	44.80
22	16	Ros	2.18	5.07	11.83	8.53	18.22	38.92
23	16	Ros	1.47	3.45	8.07	5.79	12.40	26.57
24	16	Ros	1.50	3.50	8.16	5.90	12.60	26.91
25	18	Ron	3.56	8.84	21.95	8.88	21.23	50.75
26	19	Pe	2.47	5.69	13.11	11.03	27.58	68.97
27	20	Pe	2.98	6.86	15.77	10.91	27.21	67.88
28	20	Pe	3.55	8.16	18.79	12.90	32.20	80.42
29	20	Pe	2.47	5.69	13.11	11.03	27.58	68.97
30	23	Ron	4.94	12.38	31.02	15.11	36.45	87.93
31	25	Ron	3.40	8.47	21.08	8.93	21.39	51.26

Referencias: Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso. Li: límite de confianza inferior de la estimación; Best: biomasa estimada (Mg.ha⁻¹); Ls: límite de confianza superior de la estimación.

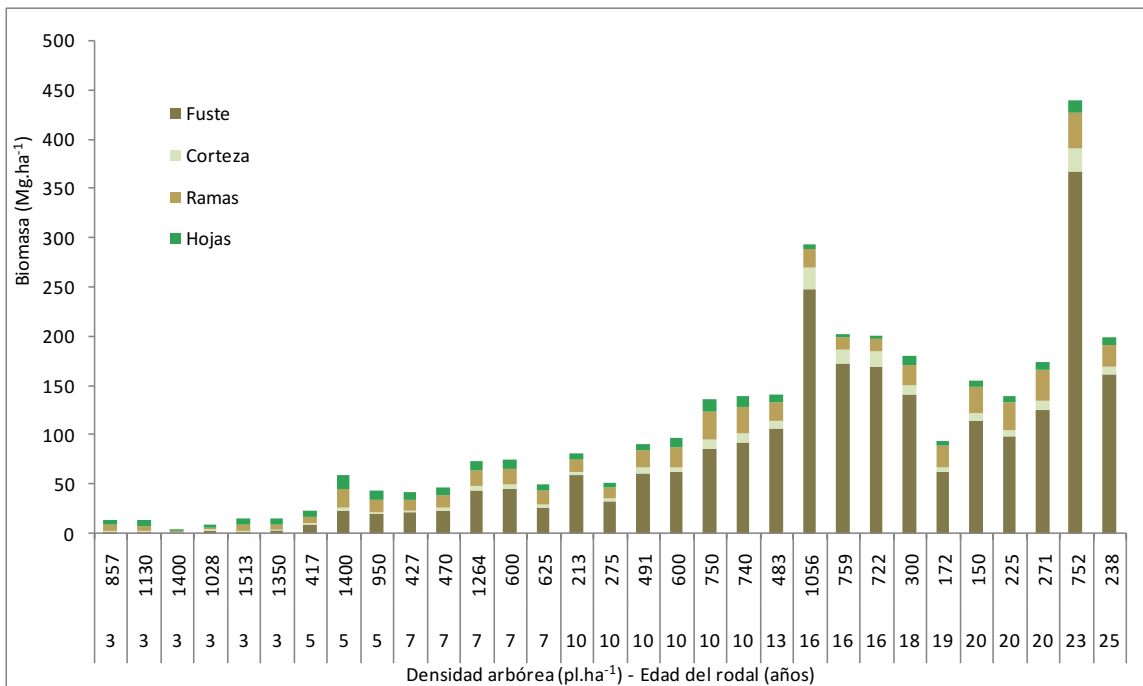


Figura 3-6. Biomasa estimada en los compartimentos arbóreos de las plantaciones de *P. taeda* en función de la densidad y la edad de la plantación.

La biomasa arbórea aérea de los compartimentos fuste y corteza en la totalidad de sitios mostraron que independientemente del agrupamiento edafoclimático al que corresponda, la biomasa de fuste y su respectiva corteza, incrementan su participación porcentual en la biomasa arbórea, en la medida que aumenta la edad. El compartimento hojas mostró la tendencia inversa (Figura 3-6 y Figura 3-7).

Los compartimentos hojas y fuste muestran una tendencia invertida y, los valores porcentuales de la compartimentalización en función de la edad, varía de acuerdo con el agrupamiento edafoclimático. Los valores porcentuales del compartimento hojas disminuye con el aumento de la edad, cuyo porcentaje en edades adultas es mayor en los sitios de suelos pedregosos (4.8%) respecto de los dos agrupamientos de suelos rojos (2.9%). La mayor diferencia porcentual en edades adultas se observó en los compartimentos lignificados, ramas y fuste. En ambos compartimentos la diferencia entre suelos rojos y suelos pedregosos fue cercana al 11%. En el compartimento fuste el mayor porcentaje estuvo dado en los suelos rojos, mientras que en el compartimento ramas la diferencia porcentual estuvo dada en los suelos pedregosos. Estos valores muestran la mayor inversión en acumulación de biomasa de ramas en suelos pedregosos la cual no se destina al fuste, situación que no es beneficiosa para los productores de madera de calidad. Desde el punto de vista de la nutrición forestal, la mayor acumulación de biomasa de

ramas y, siempre y cuando esta quede como remanente en el sitio al momento de la cosecha, beneficia el mantenimiento de la capacidad productiva del sitio (González *et al.*, 2002).

Los resultados encontrados constatan que la compartimentalización de biomasa aérea en *P. taeda* tiene un patrón de acumulación que responde a la edad de la plantación. Ese patrón de acumulación muestra que en edades jóvenes la plantación acumula biomasa mayoritariamente en los órganos de la copa, ocupando gran parte del espacio aéreo, mientras que este patrón se invierte en la medida que la plantación crece en edad. También puede observarse (Tabla 3.5), que la biomasa de hojas alcanza su máximo en edades muy jóvenes (rodal 8) y podría mantenerse constante a lo largo del turno de rotación.

Los valores porcentuales encontrados en la presente tesis son coincidentes con reportes para la misma especie en nuestro país (Caldato, 2011; Fassola *et al.*, 2010; Pinazo *et al.*, 2007; Goya *et al.*, 2003). También en otras latitudes del mundo esta especie muestra similares tendencias a los resultados aquí presentados, de acuerdo con la edad de la plantación (López, 2013; Sixel, 2012; Rodrigues, 2004; Barros Filho, 2003).

El raleo de rodales comerciales posibilita el máximo incremento de la productividad de madera de calidad, respecto de una plantación no raleada. También el raleo, afecta el stock de biomasa de los compartimentos y, si los mismos se efectúan regularmente a lo largo del turno de rotación, permanentemente el espacio disponible será ocupado por la biomasa foliar de los árboles remanentes (Pinazo *et al.*, 2007). Similar a los presentado en esta tesis, otras investigaciones muestran el elevado porcentaje de biomasa de fuste en edades adultas próximas al turno de rotación, independientemente del manejo recibido a lo largo del ciclo forestal y la edad de la plantación (Schumacher *et al.*, 2013; Pinazo *et al.*, 2007; Bizon, 2005).

Se mencionó que la calidad de sitio afecta el crecimiento de la plantación, por lo menos, a partir del tercer año de crecimiento de la misma. Esta afectación también se ve reflejada sobre la biomasa en cantidades absolutas y su participación porcentual de la biomasa aérea en edades adultas. Al observar los datos de la Figura 3-7, se interpreta que plantaciones adultas en sitios de mejor calidad acumulan mayor cantidad porcentual de biomasa en el fuste respecto de plantaciones en sitios de menor calidad. Coincidente con lo expresado, Schumacher *et al.*, (2013) trabajaron en suelos de baja fertilidad y escasa profundidad efectiva en Rio Grande Do Sul, Brasil, y encontraron en una plantación de *P. taeda* con 243 pl.ha⁻¹, que la biomasa aérea de plantaciones de 27 años de edad se

concentró 69% en la madera del fuste, 20% en las ramas, 7% en la corteza del fuste y 3% en las acículas, resultados coincidentes con los presentados para el agrupamiento de suelos pedregosos en esta tesis, mientras que si los mismos se comparan con la plantación de mayor edad (25 años de edad) en suelos rojos, los porcentajes de acumulación fueron 81% en la madera del fuste, 11 en las ramas, 4% en la corteza y 4% en hojas.

También, al comparar los rodales 30 y 31, respecto de los rodales 27, 28 y 29 (Tabla 3-4 y Tabla 3-5), se puede observar que en edades adultas los porcentajes de ramas, son mayores en plantaciones con suelos pedregosos que en suelos rojos. Esto hace suponer que, si bien las plantas de *P. taeda* responden a su modelo arquitectural que tiene base genética, la estructura de la biomasa aérea, refleja la influencia ambiental, como es de esperar en organismos modulares, de lo que resulta, en suelos pedregosos, una mayor proporción de ramas y una menor biomasa absoluta y relativa de fustes (Tabla 3-4 y Figura 3-7). Respecto de los valores absolutos de la cantidad de ramas entre los grupos de rodales Ron y Pe, se puede observar en la Figura 3-7, similitud entre ambos, ya que en suelo rojos la acumulación de biomasa de ramas sobre suelos rojos fue en promedio de 28.9 Mg.ha⁻¹, mientras que en las plantaciones con suelos pedregosos fue de 29.0 Mg.ha⁻¹. Estos resultados indicarían que debe ajustarse el manejo silvicultural de las plantaciones de *P. taeda* establecidas en suelos pedregosos. El manejo maderero para obtención de madera de calidad, orienta los esfuerzos para acumular la biomasa en el fuste, por lo que la mayor acumulación porcentual en los compartimentos de la copa no responde con los estándares buscado por el silvicultor. Por lo tanto, la forma que probablemente mejore estas relaciones y permita acumular mayor cantidad de biomasa en el fuste podría encontrarse en el manejo adecuado de la poda de las plantaciones, siempre y cuando esta poda haya considerado el mantenimiento del área foliar adecuada para no perder la captación de recursos.

Las cantidades relativas de corteza respecto de los restantes compartimentos en los sitios con suelos pedregosos (Pe), mostró disminución con el aumento de la edad, la cual varió en promedio para esas edades de 8% a los 3 años a 4.5% a los 20 años de edad de la plantación. Tendencia opuesta mostraron los rodales establecidos en suelos rojos en el sur (Ros), cuya variación fue gradualmente ascendente de 3.8% a 7.5% respectivamente de 3 a 16 años de edad de la plantación.

La tendencia general de compartimentalización de biomasa encontrada para *P. taeda* es coincidente con lo reportado para otras especies. Ferrere *et al.* (2008) trabajaron con

Eucalyptus viminalis de 4 a 14 años de edad en Argentina, quienes interpretan que la partición de la biomasa está relacionada con la edad. Peichl & Arain (2007) trabajaron con plantaciones de *Pinus strobus* de 2 a 65 años de edad en Canadá, quienes encontraron que la biomasa del fuste incremento de 25% a 69% entre los 2 y 65 años de edad, mientras que la biomasa de hojas y ramas decreció conforme aumentó la edad de la plantación.

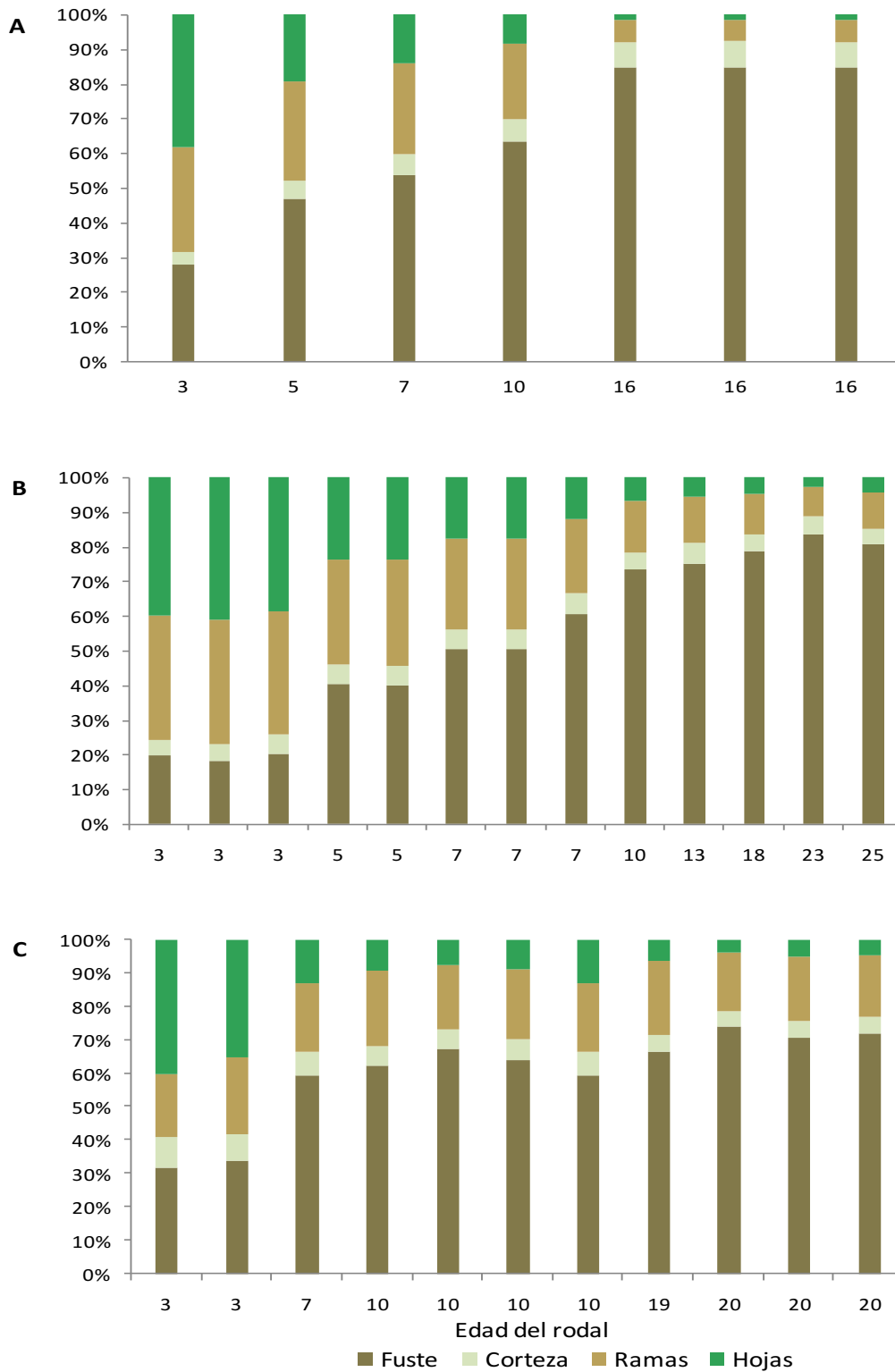


Figura 3-7. Porcentajes de biomasa estimada a nivel de rodal. A) agrupamiento de los sitios en la zona sur en suelos rojos (Ros); B) agrupamiento de los sitios en la zona norte en suelos rojos (Ron); C) agrupamiento de los sitios en la norte sur en suelos pedregosos (Pe).

Incremento medio de biomasa por compartimento en los rodales

Se puede observar que el incremento medio anual de biomasa (IMAB) de fuste en cada rodal, en líneas generales, aumenta con el aumento de la edad del rodal. Tendencia inversa muestra el compartimento hojas, mientras que el IMAB de las ramas y corteza varían sin un patrón definido (Tabla 3-6)

Tabla 3-6. Coeficiente P/ETP, coeficiente de manejo, e IMAB de los compartimentos fuste, hojas, ramas y corteza de cada una de las plantaciones de *P. taeda* en cada rodal de muestreo.

Rodal	Edad	N	Sitio	P/ETP	Manejo	IMAB (Mg.ha ⁻¹)			
						Fuste	Hojas	Ramas	Corteza
1	3	857	Ron	1.51	3	0.95	1.95	1.74	0.23
2	3	1130	Ron	1.54	2	0.87	1.95	1.70	0.22
3	3	1400	Pe	1.87	1	0.57	0.71	0.34	0.16
4	3	1028	Pe	1.87	2	1.06	1.10	0.71	0.25
5	3	1513	Ron	1.54	1	1.02	1.93	1.79	0.27
6	3	1350	Ros	1.33	1	1.52	2.08	1.65	0.20
7	5	417	Ron	1.87	3	1.87	1.09	1.39	0.26
8	5	1400	Ron	1.54	1	4.78	2.88	3.64	0.69
9	5	950	Ros	1.51	2	4.04	1.68	2.47	0.48
10	7	427	Ron	1.73	3	3.04	1.07	1.58	0.34
11	7	470	Ron	1.54	3	3.37	1.20	1.75	0.37
12	7	1264	Pe	1.65	1	6.23	1.34	2.16	0.75
13	7	600	Ron	1.98	2	6.55	1.33	2.29	0.66
14	7	625	Ros	1.46	2	3.88	1.02	1.91	0.44
15	10	213	Ron	1.73	2	5.96	0.57	1.20	0.37
16	10	275	Pe	1.85	3	3.24	0.48	1.16	0.31
17	10	491	Pe	1.85	1	6.12	0.70	1.73	0.54
18	10	600	Pe	1.61	2	6.12	0.86	1.99	0.59
19	10	750	Ros	1.59	1	8.58	1.13	2.96	0.91
20	10	740	Pe	1.70	1	1.59	0.34	0.55	0.19
21	13	483	Ron	1.94	1	8.19	0.63	1.44	0.63
22	16	1056	Ros	1.66	1	1.56	0.32	1.14	1.38
23	16	759	Ros	1.66	1	10.73	0.22	0.77	0.95
24	16	722	Ros	1.66	1	10.60	0.22	0.79	0.94
25	18	300	Ron	1.90	2	7.85	0.49	1.18	0.47
26	19	172	Pe	1.91	3	3.31	0.30	1.12	0.24
27	20	150	Ron	1.91	3	5.76	0.28	1.38	0.33
28	20	225	Pe	1.87	2	4.95	0.34	1.36	0.33
29	20	271	Pe	1.87	2	6.30	0.41	1.61	0.42
30	23	752	Ron	1.54	1	15.97	0.54	1.58	1.01
31	25	238	Ron	1.90	3	6.43	0.34	0.86	0.35

Referencias: N: densidad del rodal (pl.ha⁻¹); Ron: suelo rojo de la zona norte; Ros: suelo rojo de la zona sur; Pe: suelo pedregoso

El manejo de la plantación afecta la acumulación de biomasa, por lo que el IMAB también es afectado por las prácticas silviculturales, principalmente afectado por el raleo de la plantación. Este efecto también se notó a nivel de árbol individual (IMABi).

Al comparar los IMABi correspondientes a las plantaciones de tres años, para los distintos agrupamientos edafoclimáticos, se constató que los mayores incrementos en biomasa de fuste, hojas, ramas y corteza a nivel de árbol individual, ocurrieron en sitios con suelos rojos, respecto de los sitios con suelos pedregosos. Los mismos resultados fueron encontrados para las plantaciones de 7 años de edad, mientras que en plantaciones adultas las establecidas en suelos pedregosos invirtieron esta tendencia y fueron las de mayor incremento en todos los compartimentos arbóreos.

Identificación de variables que afectan la acumulación de biomasa

Tabla 3-7. Coeficientes de los modelos lineales ajustados para determinar las variables que afectan el IMAB de los compartimentos hojas, ramas, fuste y corteza de las plantaciones de *P. taeda*.

	Variable	Compartimento			
		Hojas	Fuste	Corteza	Ramas
Modelo 1	IS	7.47 ()	732.14 (**)	49.74 (*)	13.30 ()
	Edad	-54.70 (***)	476.81 (***)	27.16 (**)	-25.09 ()
	N	0.59 (*)	2.59 (.)	0.31 (*)	0.21 ()
	Latitud	-150.01 ()	977.03 (.)	114.21 (*)	-35.92 ()
	R ²	0.63 (***)	0.67 (***)	0.49 (***)	-0.03 ()
Modelo 2	IS	-5.79 ()	833.58 (**)	61.38 (*)	11.91 ()
	Edad	-51.10 (**)	481.22 (***)	27.28 (**)	-20.95 ()
	N	0.35 ()	1.93 ()	0.26 (.)	-0.11 ()
	P/ETP	-1014.38 (.)	-4062.31 ()	-324.16 ()	-1500.22 (.)
	R ²	0.65 (***)	0.65 (***)	0.41 (**)	0.08 ()
Modelo 3	Latitud	-273.20 (*)	1438.00 ()	142.45 (*)	-144.80 ()
	P/ETP	-2801.60 (***)	3348.70 ()	-0.53 ()	-1967.00 (*)
	R ²	0.43 (***)	0.019 ()	0.11 (.)	0.15 (*)

Referencias: (***) : nivel de probabilidad de significancia < 0.000, (**): nivel de probabilidad de significancia < 0.001; (*): nivel de probabilidad de significancia < 0.01; (.): nivel de probabilidad de significancia < 0.05; (): nivel de probabilidad de significancia > 0.05; IS: índice de sitio; P/ETP: cociente precipitación evapotranspiración.

Se observa en la Tabla 3-7 que los modelos 1 y 2 se comportaron de manera similar indicando un efecto positivo del IS y la edad sobre el IMAB de fuste y corteza, lo cual muestra que a mayor valor de IS y mayor edad las plantaciones incrementan la biomasa en estos compartimentos. En cambio la Edad tuvo un efecto negativo sobre el IMAB de hojas. El número de árboles por hectárea tuvo un efecto positivo sobre el IMAB de hojas, fuste y corteza en los modelos 1, aunque esos efectos casi no se observan en los modelos 2. La Latitud presentó un efecto positivo sobre el IMAB de corteza y una tendencia similar sobre el IMAB de fuste en el modelo 1. En el modelo 2, el cociente P/ETP

reemplaza a la variable Latitud, cuyo resultado mostró solo una tendencia negativa con el IMAB de hojas. En los modelos 1 y 2, las ramas no presentaron ajustes significativos. En los modelos 3 se observó un efecto negativo de la latitud y el cociente P/ETP sobre el IMAB de hojas indicando un efecto independiente de estas variables. El efecto positivo de la latitud sobre el IMAB de corteza resultó independiente del cociente P/ETP.

CONCLUSIONES

El cálculo del peso de los diferentes compartimentos de individuos de *P. taeda* para la estimación de las biomásas de cada compartimiento vegetal y total en rodales de distinta edad de la región del Noroeste de Argentina, requiere del ajuste de modelos matemáticos con ecuaciones específicas para cada agrupamiento edafoclimático.

Esto se debe a que la inclusión del agrupamiento edafoclimático como variable aleatoria en los modelos mixtos determinó diferencias entre sitios. La generación de ecuaciones para cada agrupamiento edafoclimático mejora la precisión en la estimación de biomasa en cada uno de los compartimentos.

Si bien la incorporación de variables ambientales mejoró los indicadores estadísticos respecto del ajuste realizado sólo con DAP y Ht, los niveles de mejora no justifican la incorporación de otras variables como índice de sitio, densidad del rodal y edad de la plantación, ya que, salvo alguna excepción, los valores de R^2 difirieron en menos de 1% en las diferentes ecuaciones de los diferentes compartimentos arbóreos. Los modelos de regresión con variables independientes DAP y Ht, para estimar el peso seco de los árboles de *Pinus taeda* provistas por este trabajo resultan ser los de mayor facilidad de aplicación para los distintos actores del sector

La calidad de sitio donde se establecen las plantaciones afecta, en valores absolutos, la acumulación de biomasa en los diferentes compartimentos aéreos de las plantaciones de *P. taeda* en el NEA Argentino. Esta diferencia de acumulación de biomasa es un indicador de que los silvicultores deberán emplear un período más prolongado de tiempo para efectuar el primer raleo en las plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos. Además, sería conveniente que se ajuste una nueva área basal óptima respecto de la vigente para suelos rojos, ajustando también los intervalos de las intervenciones de los raleos.

En edades adultas la acumulación porcentual de biomasa en el fuste de las plantaciones de sitios con suelos pedregosos disminuyó respecto de la acumulación de biomasa de fuste de las plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos. Esto proporciona útil información para los silvicultores que deban manejar plantaciones en suelos pedregosos, ya que independientemente del análisis financiero de la rentabilidad de las plantaciones, les indica que las plantaciones deben permanecer más tiempo en pie para seguir acumulando biomasa en el fuste e igualar la productividad y las proporciones de las plantaciones de suelos rojos. Además, proporciona un insumo para que a futuro se aborden investigaciones que busquen la maximización de biomasa de fuste a partir de las podas.

Las diferencias de crecimiento y acumulación de biomasa se asociaron al agrupamiento edafoclimático. Esa acumulación de biomasa podría deberse a las diferencias en la disponibilidad de agua en el suelo y no a los registros de precipitaciones de cada región geográfica.

El crecimiento y la biomasa a nivel de rodal de las plantaciones de *P. taeda* del NEA Argentino indicaría que son superiores a las plantaciones de la misma especie de otras latitudes. Este potencial diferencial de crecimiento hace que el cultivo de *P. taeda* avance sobre las superficie aptas para tal fin en nuestra región, con gran interés por parte de capitales nacionales e internacionales, por ello, es necesario generar información referente al impacto nutricional que éstas ocasionan en el sitio y que sea utilizado como herramienta por los silvicultores para generar un manejo silvicultural responsable.

BIBLIOGRAFÍA

Balbinot R, Valério A, Sanquetta C, Winckler Caldeira M & Silvestre R. 2008. Estoque de carbono em plantações de *Pinus* spp. em diferentes idades no sul do estado do Paraná. *Floresta* 38 (2):317-324.

Barros Filho N. 2003. Produção e partição de biomassa e de nutrientes e recomendação de fertilizantes para o *Pinus taeda* L. (NUTRIPINUS). Dissertação Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.

- Bellote A & Silva H. 2004. Sampling techniques and nutritional evaluations in Eucalypts plantations. Chapter 5, P 113-140, En: Gonçalves L, Benedetti V & McNabb K. (eds.) *Forest Nutrition and fertilization*. 2. ed. Piracicaba: IPEF.
- Bizon J. 2005. Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de *Pinus taeda* L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes. Dissertação Mestrado em Recursos Florestais, – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, Brasil.
- Calama R. 2004. Modelo interregional de Selvicultura para *Pinus pinea* L. aproximación mediante funciones con componentes aleatorios. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Castañeda-Mendoza A, Vargas-Hernández J, Gómez-Guerrero A, Valdez-Hernández J & Vaquera-Huerta H. 2005. Acumulación de carbono en la biomasa aérea de una plantación de *Bambusa oldhamii*. *Agrociencia* 39: 107-116.
- Crechi E, Friedl R, Fassola H, Fernández R & Falher J. 2001. Efecto de la intensidad y oportunidad de raleo en *Pinus taeda* L. sobre el crecimiento y la producción en el Noroeste de Misiones. Informe Técnico N° 25. EEA, INTA Montecarlo, Misiones, Argentina.
- ECOS - GEF-PNUD. 2002. Proyecto ARG/02/G35, Provincia de Corrientes, Argentina: 172 p.
- Elesbão P & Schneider R. 2011. Produção do *Pinus taeda* L. empovoamento desbastado na região dos campos de cima da Serra, Rio Grande do Sul. *Ciência Florestal* 21 (1): 119-124.
- FAO.2012. Forest management and climate change: a literature review. Forests and climate change working paper 10. 45 p.
- Faraway J. 2006. Extending the Linear Model with R. Generalized Linear, Mixed Effects and Nonparametric Regression Models. Boca Raton, FL.: Chapman & Hall/CRC.
- Fassola H, Crechi E, Barth S, Keller A, Winck A, Martiarena R, Von Wallis A, Pinazo M & Knebel O. 2010. Modelos regionales de biomasa aérea de *Pinus taeda* para Misiones y NE de Corrientes, Argentina. XIV Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales. Eldorado, Misiones, Argentina.

- Faustino L, Bulfe N, Pinazo M, Goya J, Martiarena R, Knebel O & Graciano C. 2011. Crecimiento inicial de *Pinus taeda* L. en suelo pedregoso de la provincia de Misiones, en respuesta a la fertilización con P y N. *Yvyrareta* 18: 52-57.
- Fernández M, Fernández Tschieder E, Letourneau F & Gyenge J. 2011. Why do *Pinus* species have different growth dominance patterns than *Eucalyptus* species? A hypothesis based on differential physiological plasticity. *Forest Ecology and Management* 261: 1061–1068.
- Ferrere P, Lupi A, Boca R, Nakama V & Alfieri A. 2008. Biomasa en plantaciones de *Eucalyptus viminalis* Labill. de la provincia de Buenos Aires, Argentina. *Ciência Florestal* 18 (3): 291-305.
- Gómez-Díaz J, Etchevers-Barra J, Monterrosos-Rivas A, Campo-Alvez J & Tinoco-Rueda J. 2011. Ecuaciones alométricas para estimar biomasa y carbono en *Quercus magnoliaefolia*. *Revista Chapingo, Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 17(2): 261-272.
- Goncálves L, Stape J, Wichert M & Gava J. 2002. Manejo de resíduos vegetais em preparo de solo. Capítulo 3, P 131-219. En: Goncalvez L & Stape J (Eds) *Conservacao e cultivo de solos para plantacao florestais*. . Piracicaba, IPEF: 498 p.
- Goya J, Frangi J & Dalla Tea F. 1997. Biomasa y área foliar de plantaciones de *Eucalyptus grandis* sobre distintos tipos de suelos. *Revista de la Facultad de Agronomía de La Plata*, 102(1): 21-31.
- Goya J, Pérez C, Frangi J & Fernández R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral* 13:139-150.
- IRAM 9544. 1965. Maderas. Método de determinación de la densidad aparente.
- Lambers H, Chapin III F & Pons T. 2006. *Plant Physiological Ecology*. Springer: 540 p.
- Lopes V. 2013. Dinâmica nutricional em um povoamento de *Pinus taeda* L., Rio Grande do Sul, Brasil. Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, RS, Brasil.
- Lupi A, Fernández R, Pahr N, Martiarena R, Pezzuti R & Hernández A. 2005. Pinos en tierras bajas. *IDIA XXI* 8: 92-96.

- Mackay E. 1968. *Dasometría. Teoría y técnica de las mediciones forestales*. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid: 760 p.
- Martiarena R. 2008. Cuantificación y evaluación del contenido de fósforo exportado en plantaciones de *Pinus taeda* conducido con diferentes intensidades de raleo y alternativos sistemas de cosecha. Tesis de la Maestría en Ciencias Forestales, Orientación Silvicultura y Manejo Forestal, Universidad Nacional de Misiones. Eldorado, Misiones, Argentina.
- Martiarena R, Frangi J, Pinazo M, Von Wallis A & Fernández R. 2011a. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L. plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*. Volume 2011:10 p, Article ID 761532, doi:10.1155/2011/761532.
- Martiarena R, Pinazo M, Von Wallis A, Knebel O & Pahr N. 2011b. Alternativas de manejo para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Revista Ciencia del Suelo*, 29 (1): 39-48.
- Martiarena R, Fernández R, Aguilar M & Falher J. 2004. Efecto de la aplicación de distintos sistemas de preparación del terreno sobre el crecimiento del *Pinus taeda* y la conservación de la capacidad productiva del suelo. 11^{as} Jornadas Técnicas Forestales. 07, 08 y 09 de Octubre de 2004. Eldorado, Misiones, Argentina.
- Morales C. 2007. Relação entre atributos do solo coma produtividade de *Pinus taeda*. Dissertação Mestre em Ciência do Solo, Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil.
- Morhart C, Sheppard J & Spiecker H. 2013. Above Ground Leafless Woody Biomass and Nutrient Content within Different Compartments of a *P. maximowiczii* × *P. trichocarpa* Poplar Clone. *Forests* 2013(4): 471-487; doi:10.3390/f4020471.
- Newbould P. 1970. *Methods for estimating the primary productivity of forests*. IBP Handbook 2. Blackwells.
- Pare D, Pierre B, Benoit L, Titus B, Thiffault E, Maynard D & Guo X. 2013. Estimating stand-scale biomass, nutrient contents, and associated uncertainties for tree species of Canadian forests. *Can. J. For. Res.* 43: 599–608. dx.doi.org/10.1139/cjfr-2012-0454.
- Pedrosa T, Mascarenhas A, Melo R & Stangerlin D. 2013. Estimativa da biomassa em um plantio de *Eucalyptus grandis* na região Centro-Oeste. *Scientia Plena*, 9(5): 1-7.

- Peichl M & Arain M. 2007. Allometry and partitioning of above- and belowground tree biomass in an age –sequence of White pine forest. *Forest Ecology and Management*, 253: 68-80.
- Pinazo M, Martiarena R, Von Wallis A, Crechi E, Pahr N & Knebel O. 2007. Efecto de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. de 20 años en el norte de la provincia de Misiones. *RIA* 36(1): 5-20.
- Popescu S. 2007. Estimating biomass of individual pine trees using airborne lidar. *Biomass and Bioenergy* 31: 646–655
- Porté A, Trichet P, Bert D & Loustau D. 2002. Allometric relationship for branch and tree woody biomass of Maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.). *Forest Ecology and Management* 158: 71-83.
- Pritchett W. 1986. *Suelos Forestales. Propiedades, Conservación y Mejoramiento*. Editorial Limusa: 634 p.
- R Development Core Team. 2008. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>
- Radtke P, Amateis R, Pringle S, Copenhaver C, Chojnacky D, Pittman J & Burkhardt H. 2009. Modeling production and decay of coarse woody debris in loblolly pine plantations. *Forest Ecology and Management* 257: 790–799.
- Reissmann B & Wisniewski C. 1999. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. Seminário de Fertilização e Nutrição Florestal - PTSM/IPEF - 26, 27 e 28 de Maio de 1999. Piracicaba, SP. Brasil.
- Rodríguez C. 2004. Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do *Pinus taeda* L. Dissertação de Mestre em Agronomia. Curso de Pós- Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo, Depto de Solos e Eng. Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- Santa Regina I. 2000. Biomass estimation and nutrient pools in four *Quercus pyrenaica* in Sierra de Gata Mountains, Salamanca, Spain. *Forest Ecology and Management* 132: 127-141. DOI:10.1016/S0378-1127(99)00219-4

- Santiago-García W, De Los Santos-Posadas H, Pérez G, Valdez-Lazalde J, Del Valle-Paniagua D & Corral-Rivas J. 2013. Self-thinning and density management diagrams for *Pinus patula* fitted under the stochastic frontier regression approach. *Agrociencia* 47: 75-89.
- Schumacher M, Witschoreck R, Calil F, Lopes V & Viera M. 2011. Produção de biomassa no corte raso em plantio de *Araucaria angustifolia* (bertol.) Kuntze de 27 anos de idade em quedas do Iguaçu, PR. *Ciência Florestal* 21(1): 53-62.
- Schumacher M, Witschoreck R, Calil F & Lopes V. 2013. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul – RS. *Ciência Florestal* 23 (2): 321-332.
- Sixel R. 2012. Sustentabilidade da produtividade de madeira de *Pinus taeda* com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes. Dissertação de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em Silvicultura e Manejo Florestal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Brasil.
- Vanclay J. 1994. *Modeling forest growth and yield: applications to mixed tropical forests*. CAB International, Wallingford, UK: 312 p.
- Vieira S, Alves L, Aida M, Araújo L, Baker T, Batista J, Campos M, Camargo P, Chave J, Delitti W, Higuchi N, Honório E, Joly C, Keller M, Martinelli L, De Mattos E, Metzker T, Phillips O, Santos F, Shimabukuro M, Silveira M & Trumbore S. 2008. Estimation of biomass and carbon stocks: the case of the Atlantic Forest. *Biota Neotropical* 8(2): <http://www.biotaneotropica.org.br/v8n2/en/abstract?point-of-view+bn00108022008>.
- Viera M, Schumacher M & Bonacina D. 2011. Biomassa e nutrientes removidos no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em Cambará do Sul, RS. *Revista Árvore* 35(3): 371-379.
- Vismara E. 2009. Mensuração da biomassa e construção de modelos para construção de equações de biomassa. Dissertação de Mestre em Recursos Florestais, com opção em Silvicultura e Manejo Florestal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Wang C. 2006. Biomass allometric equations for 10 co-occurring tree species in Chinese temperate forests. *Forest Ecology and Management* 222: 9–16

Wendling J. 1998. Modelos matemáticos de crescimento e de produção em biomassa para árvores de *Euterpe edulis* Mart. plantadas a céu aberto. Dissertação de Mestre em Ciências florestais. Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Brasil.

West B, Welch K & Galecki T. 2007. Linear Mixed Models: A Practical Guide Using Statistical Software. Chapman y Hall, 440 p.

Whittaker R & Woodwell G. 1968. Dimension and production relations of trees and shrubs in the Brookhaven forest, New York. *Journal of Ecology* 56: 1-25.

Capítulo 4

**EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS SOBRE LA
CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN LOS COMPONENTES ARBÓREOS
DE LAS PLANTACIONES DE *P. taeda* L. Y SU RELACIÓN CON EL
CRECIMIENTO**

EFFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE RECURSOS SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE NUTRIENTES EN LOS COMPONENTES ARBÓREOS DE LAS PLANTACIONES DE *P. taeda* L. Y SU RELACIÓN CON EL CRECIMIENTO

INTRODUCCIÓN

La creciente presión ambiental sobre los recursos naturales indujo al sector forestal a incrementar la productividad, con lo cuál se acrecentó el empleo de especies forestales de rápido crecimiento; ese aumento de productividad generó una mayor demanda de nutrientes de las plantaciones (Lopes, 2013). En pos de mantener la capacidad productiva del sitio donde están establecidas estas plantaciones, es imprescindible conocer los factores relacionados al desarrollo de las plantaciones (Caldato, 2011). Según Linderholm (2001), el crecimiento de una plantación es regulado por la disponibilidad de luz, agua y nutrientes, cuya disponibilidad, principalmente agua y nutrientes, puede ser manipulada y modificar la productividad del rodal (Albaugh *et al.*, 1998). Mejorar la disponibilidad de nutrientes y agua permite a las plantaciones localizar una menor biomasa en las raíces y por ende aumenta la proporción en los compartimentos aéreos (Vogt *et al.*, 1986; Chapin III *et al.*, 1987). Los nutrientes son uno de los principales factores que limitan el crecimiento de las plantaciones forestales en el mundo, siendo la disponibilidad de N la principal limitante en el hemisferio Norte (Rennenberg *et al.*, 2009), mientras que en regiones tropicales los principales elementos limitantes son el P (Vitousek *et al.*, 2010) y K (Wright *et al.*, 2011; Santiago *et al.*, 2012). En el lugar de origen de *P. taeda*, los nutrientes principales que limitan el crecimiento son el nitrógeno y fósforo (Adams & Allen 1985; Aerts & Chapin 2000; Fox *et al.*, 2007; Albaugh *et al.*, 2010; Kiser *et al.*, 2013). En Argentina, en las zonas que tradicionalmente se plantó *P. taeda*, los principales elementos limitantes del crecimiento para esta especie son el P y K (Goya *et al.*, 2003; Ibáñez *et al.*, 2004; Martiarena *et al.*, 2011a).

Importantes cambios en la biomasa ocurren a lo largo del ciclo de vida de un árbol, en donde la tasa de acumulación de la misma es mayor en etapas intermedias de su vida. Por lo tanto, dependiendo de la duración de la rotación para la especie en cuestión, irá cambiando y alcanzará distintos valores, tanto la tasa de acumulación de biomasa, como la distribución porcentual de biomasa en las distintas partes de las plantas. Dichos

cambios se asocian con cambios concomitantes en las concentraciones de nutrientes y en la mineralomasa. También el manejo puede afectar los cambios de biomasa y concentración de nutrientes en la plantación a lo largo del turno de rotación. Los raleos intensos en las plantaciones producen mayores crecimientos, aumento de biomasa y mineralomasa, a nivel de árbol individual (Barron Gafor *et al.*, 2003; Crechi *et al.*, 2005; Martiarena *et al.*, 2011a). En plantaciones de *P. taeda* de 20 años de edad en el norte de Misiones, con distinta densidad arbórea, la concentración foliar de N, P, K y Ca no se vio afectada por la densidad del rodal (Martiarena *et al.*, 2011a,b). La similar concentración foliar de nutrientes en plantaciones con distinta densidad y tasa de crecimiento indicaría que estas plantaciones no estarían limitadas por la disponibilidad de nutrientes en esos suelos.

La concentración de nutrientes, principalmente en las hojas ha sido utilizada para diagnosticar el estado nutricional de la plantación (Adams & Allen, 1985), o bien, puede utilizarse como un indicador de la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Grubb, 1998). No obstante, la concentración de nutrientes en los órganos arbóreos no siempre tiene relación directa con la disponibilidad de nutrientes en el suelo, ya que, en un suelo relativamente mejor provisto en nutrientes, pueden presentarse concentraciones comparativamente menores en las hojas por un efecto de dilución debido al rápido crecimiento (Goya *et al.*, 2008), o bien, ser afectado por otros factores ambientales o propios de la especie en cuestión (Pritchett, 1986).

Las concentraciones de la mayoría de los nutrientes principales decrecen, en líneas generales, en la secuencia hojas > corteza > ramas > fuste (Goya *et al.*, 2003; Lambers *et al.*, 2006; Pérez *et al.*, 2006; Martiarena *et al.*, 2011b). Esa secuencia muestra que la mayor concentración está en los tejidos finos, fotosintéticos, como las hojas, y los tejidos de almacenaje como la corteza; los tejidos leñosos, cuya función es sostén y conducción, poseen concentración de nutrientes inversamente decreciente con el diámetro del órgano leñoso. Si bien las hojas poseen la mayor concentración de la mayoría de los nutrientes esenciales, y es el tipo de información más frecuentemente empleada para calcular diferentes aspectos vinculados con procesos del ciclo de nutrientes y con el estado nutricional de los cultivos, un conocimiento de las concentraciones y almacenajes del total de compartimientos aéreos, y si es posible los subterráneos, permite realizar un análisis integrado de los ciclos de nutrientes a nivel de rodal, a través del cálculo de las principales vías de circulación de nutrientes en las etapas del ciclo de cultivo, bajo

diferentes condiciones de manejo y también evaluar el impacto nutricional de los mismos (Bellote & Silva, 2000; Frangi *et al.*, 2005; Pérez *et al.*, 2006; Goya *et al.*, 2009).

Los factores ambientales, tales como la luz, la temperatura, la humedad del aire, la disponibilidad hídrica y de nutrientes minerales en el suelo, afectan la tasa fotosintética de los vegetales (Samuelson *et al.*, 2001; Taiz & Zieger, 2006; Azcon Bieto *et al.*, 2008). La falta de agua tiene un efecto inhibitorio de la fotosíntesis, ya que afecta el transporte de electrones, la actividad de enzimas y la regulación estomática (Lambers *et al.*, 2006). La variación de los factores ambientales también afecta la concentración de nutrientes y, algunos de ellos, tienen relación directa con los parámetros fotosintéticos (Samuelson *et al.*, 2001; Gough *et al.*, 2004; Lambers *et al.*, 2006). A su vez, algunas investigaciones reportan que la capacidad fotosintética en especies arbóreas es alterada por la variación hídrica del suelo, principalmente, relacionan la disminución de la Rubisco cuando las plantaciones transcurren períodos de poca disponibilidad de agua en el suelo (Parry *et al.*, 2002; Flexas *et al.*, 2006). Grassi *et al.*, (2005) midieron la respuesta fotosintética en plantaciones de *Fraxinus angustifolia* Vahl. y *Quercus robur* L. durante tres estaciones de crecimiento, cuya disponibilidad de agua en el suelo tuvo grandes variaciones como consecuencia de los registros pluviométricos. Estos investigadores encontraron que durante la estación de crecimiento en que el suelo dispuso menor cantidad de agua, disminuyeron marcadamente los parámetros fotosintéticos. Por lo tanto, la disminución de los parámetros fotosintéticos, cuya disminución podría estar asociada a la variación de los factores ambientales, estaría asociado con la disminución del crecimiento.

El nitrógeno es el elemento mineral que las plantas requieren en mayor cantidad (Taiz & Zieger, 2006). La concentración de nitrógeno en las hojas es dependiente de la disponibilidad de dicho elemento en el suelo (Natali *et al.*, 2009). En la planta se almacena como nitrógeno libre (nitrato y amonio), aminoácidos libres o proteína. El almacenaje que predomina en plantas arbóreas es en forma de proteínas y luego de aminoácidos (Warren *et al.*, 2003). En las coníferas, la concentración de aminoácidos puede ser afectada por diversos factores ambientales (Durzan & Steward, 1983). El almacenaje de nitrógeno puede ser en exceso si la disponibilidad de este elemento supera la demanda (Warren *et al.*, 2003), exceso que se acumula en forma de aminoácido (Nasholm & Ericsson, 1990). En la mayoría de las plantas perennes la concentración de nitrógeno se asocia positivamente con los parámetros fotosintéticos (Samuelson 2001; Ripullone *et al.* 2003; Manter *et al.* 2005), no obstante, algunas investigaciones en *P. taeda* muestran

pobre relación entre dichos parámetros (King *et al.*, 2008). Según Stovall *et al.* (2011), en los sitios con plantaciones de *P. taeda* en que se mejora la disponibilidad de N en el suelo, ya sea mediante fertilización o manejo de residuos de cosecha, mejora el crecimiento de las plantaciones y la concentración de nitrógeno en las hojas.

El fósforo es absorbido por las plantas como ion fosfato (PO_4^{3-}). Mengel & Kirkby (2000) indican que desde el punto de vista fisiológico son importantes tres fracciones del fosfato del suelo: 1) fosfato en la solución del suelo, 2) fosfato fácilmente disponible o lábil y, 3) fosfato no disponible. Los mismos autores indican que la planta es capaz de absorber fosfato de soluciones de concentraciones muy bajas, ya que la concentración de fosfato en las células de la raíz y la savia del xilema, es entre 100 y 1000 veces más alta que la concentración en la solución del suelo. Una vez dentro de la raíz, el P puede quedarse almacenado en esta área o puede ser transportado a las partes superiores de la planta. Si bien el P tiene múltiples funciones, cuando se trata de plantas perennes no hay certeza de que este afecte la fotosíntesis (Warren, 2011). No obstante, la mejora de las condiciones nutricionales del sitio mediante la fertilización con fósforo, generalmente, incrementa el crecimiento de la plantación de *P. taeda* (Ibáñez *et al.*, 2004; Vogel *et al.*, 2005). Sin embargo, el incremento en crecimiento puede generar un efecto de dilución y no incrementar la concentración foliar de fósforo. En plantaciones de *P. taeda* cuyo sitio fue mejorado mediante fertilización con N, P y K durante el establecimiento, la concentración de P en las hojas fue 20% superior luego de seis años de establecido el rodal, respecto de las plantaciones no fertilizadas (Tiark & Harwood, 1986). Zhang & Allen (1996), en plantaciones de *P. taeda* fertilizadas con N a los 11 años de edad, detectaron una disminución en la concentración foliar de P. Estos autores atribuyen dichos resultados a un efecto de dilución, ya que el contenido total de P en las hojas no disminuyó. Faustino *et al.*, (2011) encuentran que, en una plantación de *P. taeda* fertilizada durante el establecimiento en Misiones, Argentina, la concentración foliar de fósforo no fue modificada como consecuencia de la fertilización.

La demanda de K en los ecosistemas forestales es elevada, ya que en las plantas, juega un importante rol en el mantenimiento del balance osmótico intracelular, apertura y cierre estomática, activación de enzimas involucradas en la respiración y la fotosíntesis, transporte y síntesis de proteínas, extensión celular y transporte floemático (Mengel & Kirkby, 2000; Taiz & Zieger, 2006; Tripler *et al.*, 2006). Algunos estudios en plantas anuales muestran que la concentración foliar de potasio se relaciona positivamente con la

asimilación de CO₂ y con mayor fotorespiración, como así también con menor respiración nocturna (Peoples & Koch, 1979). Las deficiencias de potasio se manifiestan mayoritariamente en suelos secos, ya que una mayor disponibilidad de agua en el suelo moviliza más rápidamente los iones K (Reissman & Wisnewski, 2000). Dedececk *et al.* (2008) trabajaron en plantaciones de *P. taeda* de 22 años de edad en diferentes sitios en Brasil. En estas plantaciones encontraron que la concentración de K fue significativamente diferente entre sitios en los compartimentos hojas, corteza y fuste. Dichos autores hallaron una relación positiva entre crecimiento, agua disponible en el suelo y concentración de K en las hojas de los árboles.

El calcio cumple un importante rol en el fortalecimiento de las paredes celulares en la formación de la madera, y su deficiencia puede causar la desintegración de las paredes celulares y el colapso de los tejidos afectados (Espinoza *et al.*, 2012). Dedececk *et al.* (2008) encontraron que la concentración de Ca se diferenció significativamente entre sitios en los compartimentos corteza y fuste. La concentración de Ca en la corteza se relacionó negativamente con el crecimiento de los árboles y la concentración de K fue significativamente mayor en las mismas parcelas, por lo que los investigadores atribuyen que la menor absorción de Ca puede haber contribuido a una mayor absorción de K. Los mismos investigadores encuentran que la concentración de Ca en las hojas se asoció positivamente con la mayor porosidad del suelo. Espinoza *et al.* (2012) aplicaron Ca en una plantación de *P. taeda* de 2 años de edad, quienes luego de un año no encontraron diferencias en la concentración de este elemento en el fuste.

El magnesio es absorbido por las plantas como ion Mg⁺⁺ y tiene papel específico en la activación de enzimas involucradas en la respiración, en la fotosíntesis y en la síntesis de DNA y RNA (Taiz & Zieger, 2006; Cakmak, 2013). El Mg ocupa el lugar central en la clorofila y es la función más conocida de este elemento en las plantas (Cakmak & Kirkby, 2008). Fisher & Binkley (2000) indican que el Mg de la clorofila es del 20 al 50 % del contenido de Mg de las hojas. El contenido de magnesio en las hojas puede afectar la fotosíntesis y el rango óptimo de concentración para el crecimiento es de 0.15 a 0.35%. La deficiencia o exceso de magnesio en las hojas puede ocasionar disminución de la actividad fotosintética (Shaul, 2002). Sun & Payn (1999) realizaron estudios bajo condiciones controladas con plantas de *Pinus radiata* y encontraron que la disminución de concentración de Mg en el fuste se asoció con la disminución de los parámetros fotosintéticos. Laing *et al.* (2000), también trabajaron con *P. radiata* y encontraron que

la disminución de la disponibilidad de Mg se asoció con la disminución de los parámetros fotosintéticos de las plantas de esta especie.

El azufre en las plantas se lo encuentra en dos aminoácidos y es constituyente de diversas coenzimas y vitaminas esenciales para el metabolismo (Taiz & Zieger, 2006). La concentración de S en las hojas es del 7 al 10% de la concentración de N, no obstante, cuando la disponibilidad excede la demanda de las plantas, se acumula como sulfato inorgánico en las hojas (Binkley, 1993).

El hierro en las plantas es un componente importante de enzimas involucradas en la transferencia de electrones y es un constituyente de proteínas involucradas en la fotosíntesis, fijación de nitrógeno y respiración (Taiz & Zieger, 2006).

El manganeso es un nutriente esencial para el crecimiento de las plantas y participa en la estructura de proteínas y enzimas en la fotosíntesis (Taiz & Zieger, 2006). En exceso se transforma en tóxico para las plantas (Kochian *et al.*, 2004; Pittman, 2005), lo que es un problema de las regiones de suelos ácidos (Millaleo *et al.*, 2010). En cultivos anuales está demostrado que la aplicación de calcio inhibe la translocación de Mn entre las raíces y el fuste sin afectar la absorción de Mn por las raíces (Alam *et al.*, 2006). Por lo tanto, suelos con mayor concentración de Ca podrían prevenir la toxicidad de este elemento en los órganos de las plantas sin afectar su absorción, sin conocerse antecedentes respecto del límite máximo de concentración de Mn en el suelo para ser considerado como tóxico o al menos que restrinja el crecimiento del pino. La excesiva concentración de Mn en las plantas puede alterar varios procesos como la actividad enzimática y la absorción, translocación y utilización de Ca, Mg, Fe y P, cuyo exceso puede causar stress oxidativo (Ducic & Poll, 2005). Pocos estudios hacen referencia a la relación de condiciones de sitio con concentración de Mn en los órganos de plantas superiores. Dedecek *et al.* (2008), estudiaron las concentraciones foliares en plantaciones de *P. taeda* de 22 años de edad, procedentes de diferentes sitios. Estos investigadores encontraron diferencias significativas de concentración en las hojas, corteza y fuste de las diferentes plantaciones. Las mayores concentraciones foliares de Mn se asociaron con las plantaciones que crecieron en los sitios de mayor productividad para *P. taeda*. Lei *et al.* (2007) estudiaron poblaciones de *Populus* bajo condiciones controladas en vivero y detectaron que en condiciones de mayor disponibilidad de agua, las plantas acumularon más Mn en los tejidos, principalmente en las hojas, respecto de tratamientos en que crecieron bajo condiciones de menor disponibilidad de agua.

El ion cinc es requerido por muchas enzimas para cumplir su actividad y puede ser requerido por la clorofila en la biosíntesis en algunas plantas (Taiz & Zieger, 2006). Según (Reissman & Wisnewski, 2000), la disminución de la concentración de Zn en las hojas de *P. taeda* se asocia con disminución de la altura total de la plantación.

La determinación de concentraciones de nutrientes puede ser un indicativo del estado nutricional de las plantaciones y de la disponibilidad de nutrientes y agua en el suelo. No obstante, el valor de cada nutriente puede conducir a interpretaciones erróneas. Por ejemplo, fertilizaciones con determinados elementos producen aumento o disminución de la concentración foliar de otros elementos distintos al aplicado. De aquí que la correcta interpretación del estado nutricional de las plantaciones se debería realizar por medio de las proporciones de nutrientes en los órganos de las plantas. Por ejemplo, algunas investigaciones marcan que la fertilización nitrogenada disminuye la relación foliar P/N y K/N (Adams & Allen, 1985; Zhang & Allen, 1996; Blazier & Hennessey, 2008). El exceso de N en relación a K puede hacer más susceptible a plagas y enfermedades, cuya relación es un indicador de vitalidad de los árboles (Garrison *et al.*, 2000).

El objetivo principal del presente capítulo es determinar el efecto de las variables ambientales y de manejo forestal sobre la concentración de nutrientes en los diferentes órganos aéreos de *Pinus taeda*.

Este objetivo, se persiguió a través del análisis químico de un número significativo de elementos químicos, macro y micronutrientes, en los compartimientos aéreos de árboles de *P. taeda* que se encuentran en plantaciones del área núcleo de cultivo en el NE Argentino en suelos profundos y pedregosos.

En lo referente a la concentración de nutrientes se tuvo un objetivo derivado del principal, consistente en el desarrollo de modelos de regresión para cada uno de los compartimientos arbóreos y para cada nutriente, que abarque las variables que modifican la concentración de nutrientes en cada uno de los compartimientos. Se espera que estos modelos contribuyan como herramienta de fácil aplicación en la cuantificación de la extracción de nutrientes por cosecha, lo cual puede permitir, posteriormente, realizar evaluaciones de impacto nutricional.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo de árboles y determinación de concentraciones de elementos químicos

Se apearon 233 árboles en 31 sitios, seleccionados y procesados de acuerdo como se describió en el capítulo 3 de esta Tesis. De cada uno de esos árboles se compuso una muestra de cada órgano con material proveniente de diferentes partes del mismo, la cual se pesó en fresco, y se secó en horno a 70 °C hasta peso constante. Dichas muestras fueron molidas en un molino Wiley y tamizadas con malla 18 (1mm) (

Figura 4-1).

De cada una de esas muestras se extrajeron alícuotas de 0.1 g para la determinación de carbono total y nitrógeno total mediante el método macro de combustión seca en un LECO TruSpec CN Analyzer. En el método de combustión seca, cada alícuota pequeña, pesada y encapsulada en una hoja de estaño, fue combustionada mediante calentamiento a alta temperatura (950 °C) y obligada a fluir en una corriente de oxígeno purificado. Los gases de combustión fueron colectados en un recipiente denominado balasto. El carbono total fue medido como CO₂ mediante un detector infrarrojo, y el nitrógeno total fue determinado como N₂ mediante una celda de conductividad térmica. Los valores de carbono total y nitrógeno total fueron informados en porcentaje y mg.g⁻¹. Materiales de referencia vegetales de concentración conocida provistos por el fabricante del equipo LECO citado se utilizaron para generar una curva de calibración. Blancos y materiales de referencia (Pine std 1575, tobacco std 1012, tobacco std 1014 y otros) de concentración conocida, fueron analizados con cada grupo de 20 muestras para asegurar la calidad de los análisis. Cada 10 muestras se duplicó una de ellas (dos alícuotas) al efecto de asegurar la precisión de los análisis, manteniendo la desviación estándar relativa por debajo del 5%.

Para la determinación de los totales de Ca, K, P, Mg, Fe, Al, Mn, S y Zn se extrajeron alícuotas de 0.5 g (compartimentos finos) y 1.0 g (compartimentos leñosos) de cada muestra de tejidos vegetales. Las mismas fueron dispuestas en recipientes de teflón, graduados dentro de un bloque de digestión con control automático de temperatura y digeridas usando una modificación del método recomendado por Chao-Yong (Luh & Schulte, 1985). Esta oxidación húmeda usa HNO₃ concentrado (se agregan 10 ml del ácido, se deja toda la noche a temperatura ambiente, y luego se calienta a 60 °C durante 30 minutos), H₂O₂ al 30 % (se agregan 4 ml a 100 °C durante 1 hora, se deja enfriar, y se

repite la operación anterior), HCl concentrado (se agregan 2 ml, y se calienta a 100 °C durante 15 minutos), y se diluye a 50 ml con agua deionizada. Los digeridos fueron analizados en un Espectrómetro de Inducción de Plasma de la marca Spectro utilizando el modelo Spectro Blue ICP Emission Spectrometer, calibrado con una mezcla química de composición conocida de los elementos de interés. Los resultados fueron informados en mg.g⁻¹. Un blanco y un material de referencia (Pine std 1575a) certificado por el NIST (National Institute of Standards and Technology, de los EEUU) fueron analizados por cada grupo de 46 alícuotas para asegurar la completa recuperación de los elementos analizados en las muestras vegetales. En el caso del K y el S en que esto no se verificó de manera estadísticamente significativa, se aplicaron coeficientes de ajuste para cada elemento, calculados como la relación entre los valores obtenidos y los certificados para el material de referencia; los resultados analíticos se multiplicaron por ese coeficiente y se obtuvieron así los resultados reportados de K y S correspondientes a una recuperación del 100 % de los elementos en las muestras.

Se realizaron un total de 11065 determinaciones químicas. Algunos ejemplares carecieron de ciertos compartimientos, por ejemplo ejemplares jóvenes carecían de fructificaciones, o de ciertas categorías de ramas vivas y secas, o bien en casos raros no se dispuso de una muestra para el análisis. Por ello, el total de muestras por compartimiento difieren del máximo posible (Tabla 4-1).

La concentración de Cinc (Zn) se determinó en una segunda instancia analítica, y solo en 54 muestras del compartimiento hojas. Veintidós muestras correspondieron a árboles en Ros, cuyas edades eran de 3, 5, 7, 10 y 23 años, 15 muestras en Pe, de 3, 7, 10 y 20 años de edad y, por último, 22 muestras en Ros de 3, 5, 7, 10 y 16 años de edad. En todos los casos el análisis foliar de Cinc comprendió, por lo menos, 3 muestras (árboles) por sitio.

Tabla 4-1. Número de unidades muestrales en las que se determinó la concentración de cada uno de los nutrientes en cada compartimento arbóreo.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	Zn
Acículas	225	225	219	219	219	219	219	219	219	54
Fuste	226	226	221	221	221	221	221	221	221	-
Corteza	226	226	226	226	226	226	226	226	226	-
Ramas < 5 cm	231	231	231	231	231	231	231	231	231	-
Ramas > 5 cm	74	74	74	74	74	74	74	74	74	-
Ramas Secas	144	144	144	144	144	144	144	144	144	-
Conos	112	112	112	112	112	112	112	112	112	-

Referencias: C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Zn: cinc.



Figura 4-1. Molienda de muestras, A) Molino procesador de muestras y, B) bolsas con muestras molidas para la determinación de la concentración de nutrientes.

Comparaciones estadísticas por agrupamientos

Para comparar el efecto edafoclimático entre agrupamientos se calculó la media de concentración de cada nutriente, en cada compartimento arbóreo y para cada uno de los 31 sitios. Se utilizaron 1620 valores medios. Previo a la comparación entre sitios se aplicó la prueba de Shapiro-Wilks para corroborar la normalidad de los datos. En algunos compartimentos y para algunos nutrientes no se obtuvieron evidencias para rechazar la hipótesis de distribución normal de los datos, no obstante, en otros casos se rechazó la hipótesis nula. Por tal motivo, se transformó la totalidad de los datos por medio de $\ln(x+1)$, donde x es el valor de la variable original. A partir de dicha transformación logarítmica de los datos se aplicó un ANOVA para cada agrupamiento edafoclimático. La comparación entre agrupamientos edafoclimáticos se realizó por medio del test de Tukey con nivel de significancia de 0.05. El análisis estadístico se realizó con INFOSTAT 2.0 (Balzarini *et al.*, 2008).

Para conocer el efecto de la edad de la plantación sobre las concentraciones de nutrientes en las plantaciones de *P. taeda* se realizó un agrupamiento por rangos de edades, contrastando la media del sitio. Ésta se determinó como la media de concentración de cada nutriente en cada compartimento arbóreo para cada clase de edad. Se establecieron 3 rangos. El primero comprendió a todas las plantaciones de hasta los 7 años de edad inclusive, el segundo las plantaciones de más de 7 y hasta los 14 años de edad inclusive, mientras que el tercero comprendió todas las plantaciones mayores a 14 años de edad. A estos tres agrupamientos se les aplicó ANOVA con los datos transformados con $\ln(x+1)$.

Ajuste de modelos para determinar la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos

Se ajustaron modelos lineales con la totalidad de valores individuales de concentración de cada nutriente para cada árbol y cada compartimento arbóreo (número de valores individuales indicado en la Tabla 4-1). Como variables independientes se utilizaron el DAP y Ht del árbol. Posteriormente, se ajustaron modelos lineales con los promedios de concentración de cada nutriente en cada uno de los 31 sitios, para los nutrientes C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en los compartimentos hojas, fuste, corteza y ramas < 5 cm; para el Zn se trabajó con datos de 14 sitios y únicamente con el compartimento hojas. Las variables del rodal utilizadas para el ajuste fueron: el número de árboles por hectárea (N),

el diámetro medio a la altura de pecho del rodal (DAP), la altura total del rodal (Ht), la altura dominante del rodal (Hdom), el área basal del rodal (G), el índice de sitio (IS), la latitud, la edad, el manejo, la zona (el correspondiente agrupamiento edafoclimático Ron, Pe o Ros), el suelo (suelo rojo o suelo pedregoso) y el coeficiente precipitación-evapotranspiración (P/ETP). El procedimiento se llevó a cabo en 3 pasos: 1) se incluyó como variables predictoras el índice de sitio, la edad, la densidad (número de árboles por hectárea) y la latitud, 2) se incluyó las mismas variables reemplazando la latitud por el cociente P/ETP y, 3) se incluyó solo la latitud y el cociente P/ETP como variables predictoras. Los dos primeros pasos tuvieron la finalidad de analizar, además del efecto de cada variable, si la latitud y P/ETP se comportaban de manera similar en combinación con las demás variables. En el tercer paso, se evaluó si los efectos de la latitud y del cociente P/ETP eran redundantes, es decir, si la variación latitudinal quedaba explicada por la variación en el cociente P/ETP. En ese caso, ambas variables darían resultados no significativos, aun cuando en los modelos 1 y 2 hayan dado significativas. Si, en cambio, alguna o ambas variables presentaban efectos significativos en el paso 3, se interpretó como la existencia de una variación latitudinal no relacionada con la variación del cociente P/ETP. Posteriormente, se aplicó el procedimiento paso a paso (step) donde, en cada caso particular, se establecieron las variables a ser usadas para el ajuste del modelo.

Cálculo de cocientes entre nutrientes

Las concentraciones foliares de elementos químicos de los 233 árboles se utilizaron para calcular los siguientes cocientes de concentración de nutrientes: C/N, C/P, N/P, N/K, K/Ca Fe/Mn. A partir de esos resultados se calculó el promedio para cada uno de los 31 sitios. Se aplicó ANOVA para determinar diferencias entre agrupamientos edafoclimáticos, mientras que los agrupamientos se compararon por medio del test de Tukey con nivel de significancia de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentraciones medias de nutrientes en los compartimentos arbóreos de los 233 árboles de *P. taeda*

La concentración de N, P, K, Ca, Mg, S y Mn registró el mayor valor en el compartimento hojas (Tabla 4-2). Esta tendencia coincide con resultados encontrados para *P. taeda* (Switzer & Nelson 1972; Goya *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2006; Dedecek *et al.*, 2008; Martiarena *et al.*, 2011b) y otras especies forestales (Leite *et al.*, 2011). A diferencia de los nutrientes anteriores, la mayor concentración de Fe se registró en el compartimento corteza.

La menor concentración de nutrientes se observó en los compartimentos lignificados, con mayor ocurrencia en el compartimento fuste. La menor concentración de Ca se registró en los conos, resultado coincidente con Pérez *et al.* (2006).

Los elementos que presentaron mayor coeficiente de variación en acículas fueron los micronutrientes (Fe y Mn) con valores cercanos al 80% de variación promedio, mientras que para los macronutrientes la variación máxima no superó el 35%. En los restantes compartimentos la tendencia fue similar, con mayor variación en los micronutrientes respecto de la variación encontrada en los macronutrientes.

Tabla 4-2. Concentración media y desvío estándar de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en cada compartimento arbóreo. Las unidades muestrales (véase Tabla 4-1), proceden de 233 árboles de 31 plantaciones de *P. taeda* de las provincias de Misiones y Corrientes.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
	--- (%) ---		------(mg.g ⁻¹)-----						
Acículas	56.92 (0.91) d	1.59 (0.28) f	1.11 (0.22) d	5.64 (1.54) e	4.07 (1.40) g	1.26 (0.36) e	1.32 (0.20) f	0.16 (0.11) c	0.45 (0.41) d
Fuste	54.78 (0.80) c	0.19 (0.11) a	0.13 (0.09) a	0.82 (0.40) a	1.10 (0.36) b	0.27 (0.07) a	0.19 (0.08) a	0.04 (0.12) a	0.06 (0.05) ab
Corteza	57.02 (0.96) d	0.49 (0.17) d	0.32 (0.14) b	1.72 (0.84) b	2.00 (0.85) d	0.46 (0.15) b	0.52 (0.22) d	0.28 (0.30) d	0.06 (0.04) a
Ramas < 5 cm	53.73 (0.95) a	0.35 (0.11) c	0.34 (0.17) b	2.00 (0.98) c	2.57 (0.83) e	0.63 (0.16) c	0.37 (0.11) c	0.10 (0.09) b	0.11 (0.08) c
Ramas > 5 cm	53.55 (0.58) a	0.21 (0.17) a	0.16 (0.21) a	0.76 (0.20) a	1.46 (0.41) c	0.41 (0.12) b	0.20 (0.05) a	0.04 (0.03) a	0.07 (0.05) ab
Ramas Secas	54.26 (0.71) b	0.30 (0.14) b	0.15 (0.08) a	0.75 (0.39) a	3.07 (1.08) f	0.70 (1.06) b	0.30 (0.12) b	0.17 (0.14) c	0.10 (0.08) bc
Conos	54.64 (0.65) c	0.90 (0.40) e	0.62 (0.44) c	4.77 (2.51) d	0.46 (0.14) a	0.76 (0.24) d	0.87 (0.36) e	0.16 (0.38) bc	0.04 (0.03) a

Referencias: Letras diferentes indican diferencias significativas entre compartimentos arbóreos de un mismo elemento. Valores entre paréntesis desvíos estándar. C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso.

La concentración media de nitrógeno encontrada en las hojas analizadas para el presente trabajo (1.59 %), fue 32% superior al límite inferior (1.20%) establecido por Jokela (2004) que podría reflejar la disminución de productividad para la especie. No obstante, fue similar a varios reportes para diferentes edades de *P. taeda* registrados en diferentes latitudes (Rodríguez, 2004; Bizon, 2005; Morales, 2007; Dedecek *et al.*, 2008). Similar a lo ocurrido con los valores de concentración de N en las hojas, los porcentajes registrados para los compartimentos fuste, corteza y ramas, fueron similares o superiores a los informados en otras investigaciones (Goya *et al.*, 2003; Rodríguez, 2004; Rubilar *et al.*, 2005; Bizon, 2005; Dedecek *et al.*, 2008; Caldato, 2011; Sixel, 2012; Lopes, 2013).

El valor promedio de concentración foliar de P fue 1.1 mg.g⁻¹, cuyo valor es similar a lo reportado por Jokela (2004) como adecuado para la especie (0.12 %). Cabe aclarar que los reportes establecidos por Jokela (2004), si bien están planteados a nivel general para *P. taeda*, fueron establecidos para una región geográfica cuyas condiciones ambientales

podrían diferir de las condiciones ambientales para las plantaciones estudiadas en esta Tesis. Los valores de concentración encontrados en esta tesis fueron superiores a los valores encontrados por Goya *et al.* (2003), Rodríguez (2004), Bellote *et al.* (2005) y Caldato (2011). No obstante fueron inferiores a los valores reportados por Morales (2007) y Piatek & Allen (2000). Probablemente las diferencias encontradas con otras investigaciones se deban a diferencias en las condiciones de sitio, las cuales generan diferencias de crecimiento y, por ende, diferencias en la concentración de este elemento en las hojas. En los compartimentos lignificados (fuste, ramas y corteza) los valores del presente trabajo, también se mantuvieron en el rango de valores encontrados en otras investigaciones, con reportes superiores y otros inferiores.

Los valores promedio encontrados de concentración de potasio en los diferentes compartimentos son superiores a los reportados en otras investigaciones (Rodríguez, 2004; Bizon, 2005; Morales, 2007; Dedecek *et al.*, 2008; Viera & Schumacher, 2009; Sixel, 2012; Lopes, 2013). Si bien en esta Tesis no fue medida la disponibilidad de agua en el suelo, la mayor concentración de potasio en las plantas de *P. taeda* en Argentina respecto de investigaciones en otras latitudes podría estar relacionado con la disponibilidad de agua en el suelo, dado que es uno de los factores que afecta la concentración de nutrientes en las hojas (Reissmann & Wisniewski, 2000).

Los valores de concentración de Ca, Mg y S en los compartimentos arbóreos también fueron superiores a los reportados en otras investigaciones (Goya *et al.*, 2003; Bizon, 2005; Sixel, 2012; Lopes, 2013). La concentración de Ca en las ramas secas fue superior a la concentración del mismo elemento en las ramas vivas, coincidente con los resultados encontrados por Lúcio *et al.* (2010) y Londero *et al.* (2011) para la misma especie.

La concentración de Fe presentó su mayor valor en la corteza (0.28 mg.g^{-1}), único elemento que no mostró su mayor concentración en las hojas. La mayor concentración de Fe en la corteza de *P. taeda* respecto de la concentración encontrada en las hojas es coincidente con los resultados encontrados por Lúcio *et al.* (2010). La concentración de Fe en las hojas de *P. taeda* mostró valores 5 veces superiores a los considerados adecuados por Jokela (2004), siendo también superiores a otros reportes para la misma especie (Bellote *et al.*, 2005; Viera & Schumacher, 2009; Caldato, 2011). En los compartimentos fuste, ramas y corteza la concentración de Fe también superó a otros informes para la misma especie (Dedecek *et al.*, 2008; Caldato, 2011; Lopes, 2013). Si bien la concentración de Mn en hoja superó el límite mencionado por Jokela (2004), los

valores de concentración de Mn encontrados en las hojas, son inferiores a los de otras investigaciones (Morales, 2007; Viera & Schumacher, 2009; Lopes, 2013).

La concentración de Zn en las hojas, promedio de los 54 árboles analizados, fue de 0.053 (± 0.01) mg.g⁻¹, valor que triplicó el límite establecido por Jokela (2004) para el adecuado crecimiento de la especie y superó los reportes de concentración de otras investigaciones (Rubilar *et al.*, 2005; Bellote *et al.*, 2005; Caldato, 2011; Lopes, 2013).

El empleo de la concentración de nutrientes en las hojas como indicador del estado nutricional de las plantaciones puede conducir a un diagnóstico erróneo, si algunos elementos son enmascarados por el efecto de dilución (Mayvorme Paim, 2007). Más allá de la salvedad precedente, los datos y comparaciones efectuadas apoyan la hipótesis de que, en promedio, las plantaciones estudiadas de *P. taeda* en Argentina, no carecen de nutrientes a partir de la oferta nutricional en el sitio. Esto genera un desafío en los forestadores y manejadores forestales a mantener la capacidad productiva del sitio para continuar con estos niveles de concentración de nutrientes en las plantaciones, lo que permitirá mantener los altos niveles productivos que ofrece esta especie en nuestra región.

Concentración media de nutrientes en los compartimentos arbóreos en función de la edad de las plantaciones

La concentración de nutrientes en los agrupamientos etarios fue significativamente diferente en 17 de los 63 agrupamientos. A nivel de compartimento arbóreo, las ramas > a 5 cm fue el compartimento más afectado por la edad de la plantación, con significancia en 6 de los 9 nutrientes. Posteriormente, los compartimentos más afectados fueron el fuste y las ramas < a 5 cm, con diferencias significativas en 3 de los 9 nutrientes en cada uno de ellos (Tabla 4-3). Tampoco se hallaron diferencias significativas en la concentración media de Zn (Tabla 4-4).

Tabla 4-3. Concentración media de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en cada compartimento arbóreo en plantaciones de *P. taeda* agrupados por rangos etarios (n=233).

Comp.	Grupo	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
		--- (%) ---		----- (mg.g ⁻¹) -----						
Acículas	1	56.95a (0.20)	1.53a (0.20)	1.13a (0.17)	5.89a (1.43)	4.46a (1.22)	1.20a (0.36)	1.28a (0.16)	0.18a (0.11)	0.70b (0.44)
	2	56.98a (0.82)	1.58ab (0.13)	1.13a (0.17)	5.35a (1.18)	3.34a (0.71)	1.28a (0.26)	1.32a (0.14)	0.13a (0.03)	0.29a (0.28)
	3	56.92a (0.82)	1.78b (0.24)	1.12a (0.17)	5.69a (1.27)	3.75a (1.14)	1.32a (0.26)	1.45a (0.19)	0.13a (0.06)	0.29a (0.16)
Fuste	1	55.06a (0.88)	0.20a (0.05)	0.16b (0.09)	0.97b (0.42)	0.98a (0.19)	0.27a (0.05)	0.21a (0.06)	0.04a (0.03)	0.09b (0.05)
	2	54.68a (0.55)	0.20a (0.05)	0.14ab (0.07)	0.78ab (0.19)	1.13a (0.44)	0.30a (0.10)	0.21a (0.09)	0.08a (0.14)	0.04a (0.03)
	3	54.41a (0.36)	0.18a (0.03)	0.08a (0.01)	0.55a (0.06)	1.12a (0.40)	0.25a (0.04)	0.15a (0.03)	0.02a (0.01)	0.05ab (0.03)
Corteza	1	57.31a (0.93)	0.45a (0.06)	0.36b (0.10)	1.97b (0.78)	2.12a (0.63)	0.45a (0.12)	0.44a (0.11)	0.32a (0.15)	0.08a (0.04)
	2	56.93a (0.70)	0.45a (0.13)	0.31ab (0.11)	1.67ab (0.63)	1.69a (0.52)	0.47a (0.11)	0.50a (0.18)	0.20a (0.10)	0.04a (0.03)
	3	53.96a (9.06)	0.53a (0.12)	0.24a (0.06)	1.17a (0.26)	2.01a (0.70)	0.43a (0.11)	0.59a (0.17)	0.28a (0.19)	0.04a (0.02)
Ramas < 5 cm	1	53.58a (0.97)	0.37a (0.09)	0.40b (0.14)	2.43b (0.82)	2.59a (0.49)	0.66a (0.12)	0.37a (0.08)	0.12a (0.05)	0.16b (0.09)
	2	54.05a (0.55)	0.28a (0.10)	0.31ab (0.14)	1.72a (0.56)	2.12a (0.25)	0.60a (0.14)	0.34a (0.11)	0.10a (0.04)	0.08a (0.05)
	3	52.49a (4.02)	0.37a (0.07)	0.25a (0.06)	1.49a (0.30)	2.63a (0.98)	0.58a (0.13)	0.36a (0.10)	0.08a (0.03)	0.09ab (0.04)
Ramas > 5 cm	1	54.12a (0.64)	0.53b (0.48)	0.61b (0.66)	0.97b (0.01)	1.59a (0.63)	0.62b (0.23)	0.19a (0.01)	0.08b (0.03)	0.14b (0.02)
	2	53.53a (0.04)	0.13a (0.06)	0.14ab (0.02)	0.83ab (0.14)	1.52a (0.32)	0.43ab (0.02)	0.19a (0.02)	0.06b (0.01)	0.09ab (0.06)
	3	53.88a (1.14)	0.23ab (0.10)	0.12a (0.02)	0.76a (0.11)	1.33a (0.35)	0.38a (0.03)	0.20a (0.04)	0.03a (0.01)	0.06a (0.03)
Ramas Secas	1	54.49a (0.84)	0.51a (0.50)	0.26a (0.23)	0.87a (0.43)	2.68a (1.37)	0.56a (0.18)	0.23a (0.02)	0.13a (0.02)	0.15a (0.12)
	2	54.47a (0.50)	0.28a (0.10)	0.17a (0.07)	0.90a (0.24)	3.18a (0.84)	0.46a (0.11)	0.34a (0.12)	0.17a (0.10)	0.09a (0.08)
	3	54.07a (0.62)	0.30a (0.06)	0.13a (0.02)	0.66a (0.13)	2.89a (0.89)	0.42a (0.05)	0.28a (0.05)	0.18a (0.17)	0.10a (0.05)
Conos	1	54.67a (0.30)	0.81a (0.30)	0.69a (0.35)	6.23b (2.19)	0.40a (0.10)	0.65a (0.20)	0.75a (0.23)	0.08a (0.01)	0.06a (0.04)
	2	54.79a (0.50)	1.00a (0.45)	0.75a (0.33)	6.22b (0.56)	0.40a (0.12)	0.83a (0.18)	1.02a (0.37)	0.12a (0.08)	0.04a (0.01)
	3	54.55a (0.41)	0.89a (0.30)	0.55a (0.33)	3.79a (1.80)	0.48a (0.07)	0.74a (0.17)	0.84a (0.28)	0.19a (0.14)	0.04a (0.01)

Referencias: promedios y desvíos estándar (entre paréntesis). Letras diferentes indican diferencias significativas entre agrupamientos etarios de un mismo compartimento. Comp.: compartimento arbóreo; grupo: agrupamiento por fajas etarias, correspondiendo 1 a las plantaciones hasta 7 años de edad, 2 a las plantaciones mayores a 7 años y hasta 14 años y, 3 plantaciones mayores a 14 años de edad. C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso.

La edad de la plantación no afectó a todos los elementos de la misma manera, para lo cual la concentración de P, K y Mn, mantuvieron un patrón común, diferenciándose en 4 compartimentos lignificados con mayor concentración promedio en el agrupamiento de menor rango de edad (<7 años).

La concentración de N en las hojas resultó significativamente mayor en las plantaciones mayores de 14 años de edad, mientras que la concentración de N en las ramas > 5 cm fueron mayores en las plantaciones de menos de 7 años de edad. Los restantes compartimentos no presentaron un patrón definido de concentración de N.

Las concentraciones de Mg y Fe fueron significativamente diferentes en el compartimento ramas > 5 cm, con mayores valores en las plantaciones de menor edad. Los elementos C, Ca y S, no presentaron concentraciones con diferencias significativas entre los diferentes grupos de edades en ninguno de los compartimentos, como así tampoco un patrón definido de las tendencias. Similares resultados mostró la concentración de Zn en el compartimento hojas (Tabla 4-4).

Los resultados de concentración de N encontrados en el presente estudio son coincidentes con los reportados por Goya *et al.*, (2008), quienes analizaron la concentración de macronutrientes en una cronosecuencia de tres rangos de edades de *P. taeda* entre 7 y 21 años de edad. Estos investigadores, que diferenciaron las hojas jóvenes de las hojas maduras, encontraron que la concentración de N disminuyó con el aumento de la edad de la plantación en ambos tipos foliares. Para la concentración de fósforo no encontraron diferencias significativas respecto del aumento de la edad de la plantación, lo mismo que muestran los resultados de esta Tesis (Tabla 4-3). En la citada investigación la concentración foliar de K, Ca y Mg, tampoco mostró diferencias significativas, solo que la tendencia fue negativa respecto del incremento de la edad, tendencia que en esta Tesis solo fue observada para la concentración de Mg.

Tabla 4-4. Concentración media de Zn en el compartimento hojas en plantaciones de *P. taeda* agrupados por rangos etarios (n=54).

Grupo	Zn (mg.g ⁻¹)
1	0.052a (0.014)
2	0.052a (0.021)
3	0.050a (0.016)

Referencias: promedios y desvíos estándar (entre paréntesis). Letras diferentes indican diferencias significativas entre agrupamientos etarios de un mismo compartimento. Grupo: agrupamiento por fajas etarias, correspondiendo 1 a las plantaciones hasta 7 años de edad, 2 a las plantaciones mayores a 7 años y hasta 14 años y, 3 plantaciones mayores a 14 años de edad. Zn: Cinc

Concentraciones medias de nutrientes en función de los agrupamientos edafoclimáticos de las plantaciones de *P. taeda*

El análisis de varianza de las concentraciones promedio de nutrientes en los diferentes compartimentos arbóreos para el conjunto de rodales de cada uno de los agrupamientos edafoclimáticos, detectó diferencias significativas en 13 de las 63 comparaciones realizadas entre grupos (Tabla 4-5). A nivel de compartimento, las hojas se diferenciaron significativamente en 4 de los 9 nutrientes estudiados, mientras que a nivel de nutrientes la concentración de Mn se diferenció en 6 de los 7 compartimentos arbóreos.

Tabla 4-5. Valores medios y desvíos estándar de concentración de nutrientes encontrados en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para cada compartimento arbóreo de *P. taeda* en las provincias de Corrientes y Misiones (n=233).

Compartimento		C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
		--- (%) ---			----- (mg.g ⁻¹) -----					
Acículas	Ron	57.21a (0.85)	1.59ab (0.14)	1.03a (0.16)	5.85a (1.48)	3.59a (0.83)	1.02a (0.16)	1.35a (0.15)	0.16a (0.11)	0.64b (0.43)
	Pe	56.83a (0.59)	1.53a (0.20)	1.12a (0.08)	5.15a (0.63)	4.20a (0.87)	1.37b (0.22)	1.26a (0.14)	0.14a (0.08)	0.18a (0.08)
	Ros	56.64a (0.70)	1.79b (0.30)	1.31b (0.14)	6.28a (1.56)	4.62a (1.58)	1.55b (0.26)	1.40a (0.17)	0.18a (0.03)	0.71b (0.28)
Fuste	Ron	54.79a (0.92)	0.18a (0.05)	0.10a (0.05)	0.71a (0.31)	0.93a (0.23)	0.23a (0.05)	0.18a (0.04)	0.04a (0.02)	0.08b (0.04)
	Pe	54.71a (0.69)	0.19a (0.04)	0.15a (0.09)	0.88a (0.40)	1.20a (0.29)	0.29b (0.03)	0.21a (0.06)	0.02a (0.33)	0.02a (0.01)
	Ros	54.81a (0.47)	0.22a (0.03)	0.14a (0.08)	0.78a (0.31)	1.13a (0.40)	0.32b (0.07)	0.18a (0.11)	0.09a (0.13)	0.10b (0.04)
Corteza	Ron	57.36a (0.95)	0.49a (0.07)	0.32a (0.09)	1.53a (0.64)	2.36a (0.59)	0.49a (0.09)	0.52b (0.13)	0.36a (0.14)	0.08b (0.04)
	Pe	56.95a (0.56)	0.51a (0.51)	0.33a (0.06)	1.93a (0.56)	1.90a (0.33)	0.50a (0.09)	0.57b (0.15)	0.23a (0.11)	0.03a (0.01)
	Ros	56.78a (0.57)	0.43a (0.13)	0.29a (0.15)	1.41a (0.92)	1.71a (0.64)	0.44a (0.13)	0.35a (0.14)	0.23a (0.17)	0.08b (0.03)
Ramas < 5 cm	Ron	53.83a (1.00)	0.33a (0.11)	0.31a (0.12)	2.00a (0.79)	2.51a (0.66)	0.58a (0.13)	0.37a (0.10)	0.11a (0.04)	0.16b (0.08)
	Pe	53.53a (0.62)	0.35a (0.06)	0.38a (0.16)	2.08a (0.92)	2.70a (0.60)	0.66a (0.06)	0.39a (0.09)	0.10a (0.05)	0.06a (0.02)
	Ros	53.93a (0.34)	0.40a (0.05)	0.32a (0.10)	1.73a (0.31)	2.32a (0.68)	0.68a (0.11)	0.31a (0.05)	0.10a (0.03)	0.16b (0.06)
Ramas > 5 cm	Ron	53.85a (0.67)	0.39a (0.46)	0.43a (0.62)	0.86a (0.13)	1.30a (0.30)	0.52a (0.25)	0.16a (0.11)	0.04a (0.03)	0.10b (0.03)
	Pe	53.45a (0.09)	0.19a (0.02)	0.12a (0.02)	0.72a (0.10)	1.46a (0.25)	0.39a (0.03)	0.20a (0.03)	0.04a (0.02)	0.03a (0.01)
	Ros	54.28a (1.35)	0.26a (0.13)	0.17a (0.06)	0.88a (0.12)	1.50a (0.60)	0.44a (0.05)	0.18a (0.02)	0.06a (0.04)	0.12b (0.03)
Ramas Secas	Ron	54.82b (0.81)	0.55a (0.48)	0.23a (0.24)	0.91a (0.32)	2.56a (1.21)	0.45a (0.20)	0.25a (0.17)	0.16a (0.09)	0.10a (0.03)
	Pe	54.07a (0.29)	0.27a (0.08)	0.14a (0.06)	0.80a (0.26)	3.20a (0.96)	0.47a (0.08)	0.29a (0.10)	0.12a (0.08)	0.05a (0.02)
	Ros	53.90 (0.19)a	0.30a (0.03)	0.17a (0.03)	0.61a (0.17)	2.89a (0.89)	0.49a (0.09)	0.27a (0.03)	0.26a (0.19)	0.21b (0.07)
Conos	Ron	54.59a (0.40)	0.74a (0.35)	0.63a (0.27)	5.79a (1.65)	0.40a (0.04)	0.64a (0.20)	0.74ab (0.22)	0.14a (0.14)	0.05a (0.02)
	Pe	54.68a (0.50)	1.08a (0.30)	0.71a (0.31)	4.97a (1.67)	0.45a (0.14)	0.85a (0.14)	1.06b (0.18)	0.16a (0.13)	0.03a (0.01)
	Ros	54.68a (0.30)	0.78a (0.29)	0.56a (0.44)	4.88a (2.94)	0.44a (0.07)	0.67a (0.16)	0.69a (0.18)	0.11a (0.04)	0.06a (0.04)

Referencias: Valor entre paréntesis corresponde al desvío estándar; Letras diferentes significa diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos para las concentraciones de un mismo compartimento; Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte y, Ros: Suelos rojos del sur.

La concentración de N fue significativamente diferente, respecto de los agrupamientos edafoclimáticos, solo en el compartimento hojas, con mayor valor en el sitio Ros respecto del sitio Pe, sin diferenciarse ambos del sitio Ron. Estos resultados se asociaron

negativamente con la concentración de nitrógeno en los primeros 30 cm de espesor de suelo, ya que la concentración de N fue significativamente mayor en Pe, respecto de Ron y Ros (Tabla 2-2), en el citado espesor de suelo. Estos resultados son contradictorios con otras investigaciones que marcan que la mayor disponibilidad de nitrógeno en el suelo se manifiesta como mayor concentración foliar de este elemento (Natali *et al.*, 2009). Sin embargo, el agrupamiento Ros mostró mayor crecimiento de las plantaciones respecto del agrupamiento Pe (capítulo 2 de esta Tesis), coincidente con otras investigaciones que marcan que la mayor concentración de nitrógeno foliar se asocia con mayor cantidad de enzima Rubisco en las hojas, que a su vez ésta, se asocia con mayor crecimiento de la plantación dado que mejora los parámetros fotosintéticos (Samuelson 2001; Ripullone *et al.*, 2003; Manter *et al.*, 2005). Más allá que en la presente Tesis no fueron medidos los parámetros fotosintéticos, podría inferirse que el mayor crecimiento de la plantación a nivel de rodal está asociado con los mismos. A diferencia de lo encontrado en esta Tesis, investigaciones realizadas en Brasil en plantaciones de *P. taeda* de 6 años de edad, establecidas bajo diferentes condiciones de sitio, muestran mayor concentración foliar de nitrógeno en los sitios de mayor oferta de nitrógeno (Morales, 2007). También Piatek & Allen (2000) realizaron trabajos de fertilización en plantaciones de *P. taeda* de 13 años de edad en EEUU y encontraron que la concentración de N foliar fue de 11 mg.g⁻¹ en las parcelas que no fueron fertilizadas, mientras que alcanzó valores de 15 mg.g⁻¹ en las parcelas fertilizadas con N en combinación con otros macro y micronutrientes. Dicus & Dean (2008) encontraron resultados similares en una plantación de *P. taeda* de 17 años de edad en su zona de origen. Más allá que los resultados aquí encontrados, en líneas generales no coinciden con otras investigaciones, los valores promedio de concentración de N en las hojas fueron 1.59, 1.53 y 1.79%, respectivamente en los sitios Ron, Pe y Ros, cuyos valores superan el límite inferior que se ha propuesto podría disminuir la productividad de las plantaciones de *P. taeda* (Jokela, 2004). Estos valores marcan que la disponibilidad de nitrógeno de los suelos de esta región no sería un elemento limitante para el crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina. También, el incremento en la concentración de nitrógeno foliar puede originarse por la interacción de otros nutrientes. Mayvorme Paim (2007) trabajó en plantaciones de *P. taeda* a las que fertilizó con potasio y calcio durante la fase de establecimiento de la misma. Los muestreos posteriores para determinar la concentración de nutrientes en las hojas de las plantas mostraron un incremento significativo en la concentración de N en los tratamientos donde había agregado mayor cantidad de los fertilizantes mencionados. En nuestro estudio, la

concentración de Ca hasta los 60 cm de espesor fue superior en las plantaciones del agrupamiento Pe, mientras que la mayor concentración foliar de N fue hallada en las plantaciones de los sitios Ros, por lo que se debe descartar que la mayor concentración foliar de nitrógeno sea debido a la mayor presencia de Ca en el suelo.

La concentración foliar de P fue significativamente mayor en el agrupamiento Ros, diferenciándose de los agrupamientos Ron y Pe. La mayor concentración de P en el agrupamiento Ron no coincide con la mayor concentración de P en el suelo, ya que la misma fue significativamente mayor en el agrupamiento Pe hasta los 60 cm de espesor del suelo. Dado que las plantaciones de mayor crecimiento y menor concentración de P en el suelo, mostraron mayor concentración foliar de P, la diferencia de concentración de P foliar entre agrupamientos no puede atribuirse a un efecto de dilución, como así tampoco a la mayor oferta de este elemento en el suelo. Estos resultados son disímiles a los registrados en otras investigaciones. Morales (2007) encontró en plantaciones de *P. taeda* de 6 años de edad, mayor concentración foliar de P en plantaciones de menor crecimiento. Zhang & Allen (1996), en plantaciones de *P. taeda* de 11 años que fueron fertilizadas con nitrógeno, registraron menor concentración foliar de P en las parcelas fertilizadas con mayor crecimiento, respecto de plantaciones no fertilizadas y con similar absorción de fósforo en ambas, atribuyendo la menor concentración de P en las parcelas no fertilizadas a un efecto de dilución. Por otro lado, plantaciones de *P. taeda* cuya disponibilidad de P en el suelo se mejora mediante fertilización, registraron mayores crecimientos que aquellas que no fueron fertilizadas (Ibáñez *et al.*, 2004; Vogel *et al.*, 2005). Tiark & Harwood (1986) aumentaron la concentración de P en el suelo mediante fertilización en plantaciones de *P. taeda* y, la concentración foliar de P en dichas plantaciones fue superior. Por lo tanto, los resultados encontrados en esta Tesis indicarían que el P disponible en el suelo no es el responsable del diferencial de crecimiento entre plantaciones de los diferentes agrupamientos. Por otro lado, la concentración foliar de P no se asoció con la disponibilidad en el suelo.

La concentración de Mg en las hojas fue superior en los agrupamientos Ros y Pe. El crecimiento en los vegetales depende de la tasa fotosintética que ellos puedan realizar y ésta, es dependiente de la cantidad de clorofila existente en ellos. El átomo central de la clorofila es ocupado por un átomo de magnesio (Cakmak & Kirkby, 2008) y, ante iguales cantidades de masa seca de hojas, las plantaciones del sitio Ron tendrían menor capacidad fotosintética, y por ende, menor capacidad de crecimiento. No obstante, las plantaciones

de los sitios Pe fueron las de menor crecimiento, lo cual indicaría que el menor crecimiento de estas plantaciones no se debió, exclusivamente, a la disminución de la concentración de Mg asociado con menor cantidad de clorofila. La concentración de Mg en el suelo fue superior en el agrupamiento Pe respecto de Ron y Ros, hasta los 60 cm de espesor, lo cual podría estar asociado con la mayor concentración foliar de este elemento. No obstante, la concentración de Mg en el suelo no se asoció con el menor crecimiento de los sitios Pe.

La concentración de Mn se diferenció estadísticamente en 6 de los siete compartimentos arbóreos respecto de los agrupamientos edafoclimáticos. La significancia se marcó a favor de los sitios con suelos rojos respecto de los sitios con suelos pedregosos en los compartimentos hojas, fuste, ramas < 5 cm, ramas > 5 cm y corteza. La menor concentración foliar de manganeso en los sitios Pe, estuvo inversamente relacionada con la concentración de este elemento en el suelo, ya que hasta los 60 cm de espesor la mayor concentración se observó en los sitios Pe (capítulo 2 de esta Tesis). Resultados coincidentes encontraron Dedecek *et al.* (2008), quienes trabajaron con plantaciones de *P. taeda* de 22 años de edad en sitios de diferentes productividades. Estos investigadores encontraron que las plantaciones de mayor productividad presentaron mayor concentración de Mn en las hojas, fuste y corteza. No obstante, los resultados encontrados en esta Tesis se asocian negativamente con la concentración de Mn hasta los 60 cm de espesor de suelo. También Reissmann & Wisniewski (2000), quienes trabajaron en plantaciones de *P. taeda* de 15 años de edad en diferentes clases de sitios, encontraron una correlación positiva entre la altura de las plantaciones y la concentración de Mn en las hojas.

La tendencia no significativa hacia una mayor concentración de K en las hojas en los sitios de suelos rojos, coincide con lo reportado por otros investigadores, quienes indican que la concentración de K en hoja está, como ya se dijera, directamente relacionada con la disponibilidad de agua en el suelo (Dedecek *et al.* 2008), lo cual se asocia con los resultados encontrados en el capítulo 1 de esta Tesis, ya que los suelos rojos presentarían mayor disponibilidad de agua en el suelo.

La concentración de Fe, a diferencia de los restantes compartimentos, tuvo su mayor valor en la corteza. La concentración de azufre se mostró significativamente mayor en el compartimento conos a favor de los sitios con suelos pedregosos. La fracción de carbono

en todos los compartimentos se mostró muy estable, con poca variación entre compartimentos, a diferencia de los restantes nutrientes.

La concentración foliar de Zn no se diferenció entre agrupamientos edafoclimáticos (Tabla 4-6), no obstante, el valor promedio hallado (0.051 mg.g^{-1}) supera 2.5 veces el valor de mínima concentración (0.020 mg.g^{-1}) que podría causar insuficiencia de Zn para el crecimiento de la especie (Jokela, 2004). Dedecek *et al.* (2008) en plantaciones de *P. taeda* de 22 años de edad encontraron mayores valores de concentración foliar de Zn en sitios de mayor productividad, mientras que los valores de la mencionada investigación, son inferiores a los reportados en la presente Tesis. Estos resultados indican que la concentración foliar de Zn se encuentra en el rango de valores adecuados que requiere la especie para su normal desarrollo. Además, no se asoció con la mayor disponibilidad encontrada en el agrupamiento Pe de este elemento en el suelo, lo que mostraría que el Zn disponible para estas plantaciones no sería limitante para su crecimiento.

Tabla 4-6. Valores medios y desvíos estándar de concentración de Zn encontrado en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para el compartimento arbóreo hojas de *P. taeda* en las provincias de Corrientes y Misiones (n=54).

Grupo	Zn (mg.g^{-1})
Ron	0.058a (0.013)
Pe	0.048a (0.009)
Ros	0.047a (0.019)

Referencias: Valor entre paréntesis corresponde al desvío estándar; Letras diferentes significa diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos para las concentraciones de un mismo compartimento; Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte y, Ros: Suelos rojos del sur.

Relación de concentraciones de nutrientes foliares en las plantaciones de *P. taeda*

Como se destacó anteriormente en éste capítulo, conceptualmente, la disponibilidad de potasio se espera que aumente donde la oferta de agua es mayor, dado que el agua es esencial para la movilidad del potasio (Reissmann & Wisniewski, 2000). En el capítulo 2 de ésta Tesis quedó demostrado que los agrupamientos edafoclimáticos podrían diferir en cuanto a la disponibilidad de agua en ellos, ya que difiere la cantidad de agua almacenada. Sin embargo, la tendencia al aumento de la concentración de potasio en las hojas no resultó estadísticamente significativa en las plantaciones estudiadas. Debido a que el

análisis foliar, principalmente de algunos elementos, podría ser enmascarado por el efecto de dilución y efectuar una interpretación errónea, se ha propuesto que se debería usar el conjunto de los nutrientes y analizar la relación entre ellos (Mayvorme Paim, 2007). En ésta Tesis se han calculado, a tal fin, las relaciones de concentración foliar de los elementos C/N, C/P, N/P, N/K, K/Ca y Fe/Mn para los 31 sitios estudiados (Tabla 4-7).

Tabla 4-7. Relación de concentración de nutrientes foliares en 31 sitios con diferentes condiciones edafoclimáticas (Ron, Pe y Ros) de *P. taeda*.

Agrupamiento	C/N	C/P	N/P	N/K	K/Ca	Fe/Mn
Ron	36.6 ab (3.6)	574 b (98)	15.7 a (2.6)	2.8 a (0.5)	1.8 a (0.5)	0.3 a (0.1)
Pe	38.8 b (6.0)	521 ab (41)	13.7 a (2.3)	3.0 a (0.5)	1.3 a (0.3)	0.9 b (0.3)
Ros	32.6 a (4.8)	445 a (47)	13.9 a (2.4)	3.00 a (0.6)	1.7 a (0.9)	0.3 a (0.2)

Referencias: Valor entre paréntesis corresponde al desvío estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos para las concentraciones de un mismo compartimento. Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte y, Ros: Suelos rojos del sur; C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Fe: hierro; Mn: manganeso.

La relación C/N mostró diferencias significativas entre los agrupamientos edafoclimáticos Pe y Ros (Tabla 4-7). La mayor relación se observó para los sitios con suelos pedregosos (Pe) y la relación más baja fue en el Ros. El cociente C/N parece estar afectado principalmente por las diferencias en las concentraciones de N en las hojas, ya que la fracción de C se mantuvo sin diferencias significativas entre sitios (Tabla 4-5). Más allá de la comparación entre sitios, los valores obtenidos son superiores a los de otras investigaciones (Goya *et al.*, 2003; Caldato, 2011). Caldato (2011) realizó estudios de concentración de nutrientes en plantaciones de *P. taeda* de 12 años de edad y analizó la relación de concentración foliar C/N. Encuentra resultados de la relación superiores a 30 y hace referencia a que esos valores superan el rango de valores óptimos (25 a 30) y podría ocasionar mayor tiempo para su descomposición e inmovilizar N y P en el piso forestal por un mayor período de tiempo. No obstante, los valores encontrados en la presente Tesis, son de hojas en plena actividad fisiológica, cuyas concentraciones probablemente varíen al momento de la senescencia. Goya *et al.*, (2003) trabajaron con plantaciones adultas de *P. taeda* y encontraron relación C/N de 30.9, mientras que en las hojas que componen el piso forestal hallaron relación C/N de 46.8.

La relación C/P mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambos suelos rojos profundos. Los suelos rojos del sur fueron los de cociente más bajo mostrando una mayor abundancia de P por unidades de carbono, en tanto los rojos profundos del norte fueron los de cociente más alto, que demuestran una mayor escasez relativa de P. En tanto los suelos pedregosos, no difirieron significativamente de los suelos rojos, presentando un valor intermedio de C/P medio. La relación de concentración foliar C/P para ambos agrupamientos (Ron y Ros), también es coincidente con los valores obtenidos por Caldato (2011) y Goya *et al.* (2003) respectivamente.

La relación de concentración foliar N/P no mostró diferencias significativas entre agrupamientos, fluctuando entre 14 y 16. El valor encontrado para el agrupamiento Ros es coincidente con el valor encontrado por Caldato (2011) para una plantación de *P. taeda* de 12 años de edad en la misma zona geográfica a las plantaciones agrupadas bajo el agrupamiento Ros de nuestro trabajo. La misma relación (N/P) para el agrupamiento Ron fue algo disímil con los valores obtenidos por Goya *et al.* (2003) quienes trabajaron en una plantación de *P. taeda* de 20 años de edad en el Norte de la provincia de Misiones y obtuvieron una relación N/P de 18.9. Los valores encontrados en el presente trabajo son superiores al encontrado por Syper (2006). Este investigador determinó la relación N/P para plantaciones de *P. taeda* en EEUU y consideró para esas plantaciones que el valor óptimo es 10.

El cociente N/K estuvo cercano a 3 en todos los agrupamientos y no mostró diferencias significativas entre ellos (Tabla 4-7). Según Reissmann & Wisniewski, (2000) la relación de concentración N/K en las hojas de *P. taeda* depende de la calidad de sitio, siendo la relación cercana a 5.3 en sitios pobres, mientras que para sitios de mejor calidad ese valor disminuye aproximándose a 3.0. En cambio, Syper (2006) establece que la relación óptima para la especie es 5.0. Binkley (1993) indica que la concentración de K en las hojas de los árboles está comprendida entre el 50 y 75% de la concentración de N. Respecto a los requerimientos de la planta debe considerarse también que el nitrógeno permanece gran parte de la vida de la hoja (suele decrecer mediante retranslocación al final de la vida útil foliar), mientras que un porcentaje del potasio absorbido se pierde mediante lavado, por lo que el requerimiento es mayor que la masa de K presente en el follaje en un momento dado. En esta Tesis pudo observarse que las calidades de sitio no afectaron estadísticamente la relación N/K (Tabla 4-7) y, los valores encontrados estuvieron próximos a los considerados para un sitio de buena calidad según lo

establecido por Reissmann & Wisniewski (2000). No obstante, el valor promedio no respondió a lo indicado por Binkley (1993), ya que la concentración de potasio fue inferior al 35% de la concentración de N.

Los cocientes foliares de K/Ca de las plantaciones estudiadas oscilaron entre 1.3 y 1.8 y no mostraron diferencias significativas entre grupos edafoclimáticos. Reissmann & Wisniewski (2000) indicaron que la relación K/Ca es cercana a 1 en sitios pobres y mayor a 3 en sitios de mejor calidad. En esta Tesis la falta de diferencias estadísticamente significativas no permite conclusiones definitivas, pero el rango observado de valores del cociente K/Ca sugiere que todos los grupos edafoclimáticos estuvieron próximos al rango establecido por aquellos autores para sitios pobres.

La relación de concentraciones foliares Fe/Mn claramente diferencia estadísticamente a los suelos rojos profundos con valores más bajos, que no difieren entre sí, de los suelos pedregosos con cocientes medios que triplican el de los suelos profundos. Los cocientes Fe/Mn dista mucho de los valores encontrados por Reissmann & Wisniewski (2000), ya que estos investigadores hallaron como mayor valor 0.13 para plantaciones de *P. taeda* de 15 años de edad correspondiente a los sitios más pobres, mientras que en la presente Tesis el promedio en los sitios con suelos pedregosos el valor ascendió a 0.95, en tanto el de los sitios con suelos rojo profundos estuvieron cerca de 0.30. Esta gran diferencia se debe a que el valor de Mn encontrado en las hojas de las plantaciones de suelos pedregosos en este trabajo de tesis, es relativamente bajo. Esta cuestión hace pensar en la necesidad de profundizar la investigaciones acerca de este elemento, ya que en todos los compartimentos estudiados presentó diferencias entre agrupamientos edafoclimáticos, por lo que podría ser uno de los elementos claves a estudiar para mejorar la nutrición de *P. taeda* en esta región.

Si bien varios investigadores establecen rangos de valores de relación de concentraciones como óptimos, o bien, valores puntuales como óptimos, los valores óptimos deben ser establecidos para especies determinadas y para una región determinada. Las plantaciones de *P. taeda* en Argentina mostraron diferentes productividades bajo diferentes agrupamientos edafoclimáticos (capítulo 2 de esta Tesis), no obstante, las concentraciones foliares de nutrientes muestran similares relaciones de concentraciones bajo diferentes IS y, diferentes relaciones de concentraciones ante similares IS (Figura 4-2). A pesar de ello, algunas relaciones (C/N, C/P y Fe/Mn) presentaron diferencias estadísticas significativas entre agrupamientos edafoclimáticos (Tabla 4-7). Estos

resultados indican que las concentraciones foliares de nutrientes, en la región de estudio, responderían a factores asociados con la absorción de los mismos por la planta, como por ejemplo disponibilidad de agua, y no a la disponibilidad de los mismos en el suelo.

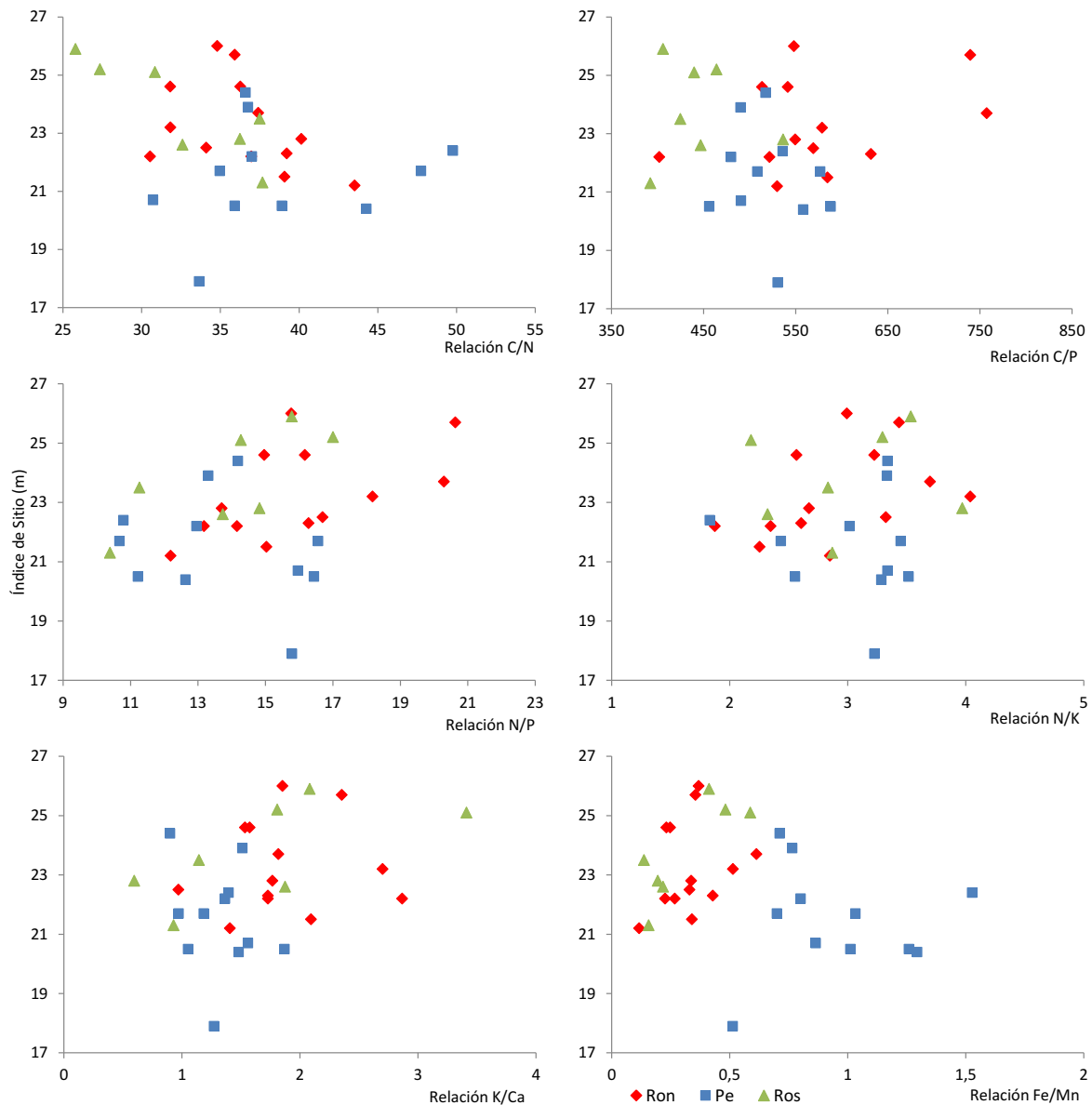


Figura 4-2. Relación de concentraciones de nutrientes en función de índice de sitio de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina.

Los resultados de la Figura 4-2 muestran un amplio rango de dispersión en la relación de concentración de nutrientes en función del IS, cuya dispersión se observa independientemente del agrupamiento edafoclimático al cual corresponde la plantación. Además, se observa amplio rango de dispersión para similares valores de IS. Estos

resultados permiten suponer que, los valores óptimos de relación de concentraciones mencionados en otras investigaciones, son solo orientativos.

Ajuste de modelos para la determinación de la concentración de nutrientes en función de variables ambientales y del rodal

Los modelos efectuados con la concentración de nutrientes por compartimento a nivel de rodal, resultaron con diferente significancia y nivel de explicación de la variabilidad observada (Tabla 4-8). La incorporación de las variables de rodal como variables independientes y, la aplicación del procedimiento *step*, permitió mejorar los parámetros de ajuste de los modelos, respecto de los resultados obtenidos con las variables de árbol individual.

Tabla 4-8. Valores de R² de los modelos lineales ajustados (Concentración de nutriente (y) = a + b.DAP + c.Ht + d.Hdom + e.N + f.G + g.Edad + h.IS + i.Latitud + j.Manejo + k.Zona + l.Suelo + m.P/ETP), para la determinación de la concentración de nutrientes en plantaciones de *P. taeda* a partir de variables ambientales y de manejo forestal.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Acículas	0.13 (0.104)	0.54 (2.75e ⁻⁴)	0.60 (4.81e ⁻⁵)	0.15 (0.067)	0.75 (1.77e ⁻⁶)	0.71 (3.85e ⁻⁶)	0.44 (0.008)	0.29 (0.016)	0.64 (2.99e ⁻⁶)
Fuste	0.33 (0.019)	0.59 (2.67e ⁻⁴)	0.56 (3.27e ⁻³)	0.64 (6.78e ⁻⁶)	0.40 (0.005)	0.45 (0.001)	0.33 (0.006)	0.41 (0.006)	0.58 (5.86e ⁻⁶)
Corteza	0.47 (0.003)	0.37 (0.015)	0.63 (2.39e ⁻⁵)	0.69 (1.20e ⁻⁶)	0.28 (0.027)	0.06 (0.166)	0.55 (1.80e ⁻⁴)	0.41 (0.006)	0.60 (4.01e ⁻⁶)
Ramas < 5 cm	0.14 (0.046)	0.70 (1.81e ⁻⁶)	0.76 (1.27e ⁻⁶)	0.65 (4.70e ⁻⁵)	0.73 (3.52e ⁻⁶)	0.62 (6.11e ⁻⁵)	0.56 (3.30e ⁻³)	0.51 (5.37e ⁻⁴)	0.63 (2.38e ⁻⁵)

Referencias: C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso. Entre paréntesis valores de probabilidad de los modelos

Se muestran, en la Tabla 4-9, las 21 ecuaciones con sus respectivos coeficientes para cada compartimento, cuyo ajuste fue significativo (p=0.05), valor de R² superior a 0.50 y distribución de residuos homogénea.

Tabla 4-9. Modelos de regresión de tipo lineal para el cálculo de la concentración de nutrientes en distintos compartimentos aéreos de *P. taeda* en el NE de Argentina.

Órgano	Nutriente	Ecuación	R ²	p
Acículas	N	$N (\%) = -4.3479305 + Hdom * 0.025673 + N * 0.0002446 - Suelo * 0.4667161 + Zona * 0.3868903 + Latitud * 0.2183812 - P/ETP * 0.4113793$	0.54	2.75e ⁻⁴
	P	$P (mg.g^{-1}) = -1.27417 - DAP * 0.01150 + Ht * 0.01622 + Suelo * 0.17338 + Latitud * 0.11020 + Manejo * 0.07028 - P/ETP * 0.54198$	0.60	4.81e ⁻⁵
	Ca	$Ca (mg.g^{-1}) = 2.2680 + DAP * 0.1576 - Hdom * 0.5469 + IS * 0.4013 + Suelo * 2.0802 - Zona * 1.0633 + Edad * 0.3639 - Manejo * 0.3081 - P/ETP * 3.3832$	0.75	1.77e ⁻⁶
	Mg	$Mg (mg.g^{-1}) = -2.86380 + DAP * 0.01628 - Ht * 0.02890 + Suelo * 0.29830 + Latitud * 0.19562 + Edad * 0.02475 - Manejo * 0.11426 - P/ETP * 0.88614$	0.71	3.85e ⁻⁶
	Mn	$Mn (mg.g^{-1}) = 2.65558 + DAP * 0.01682 - Ht * 0.03629 - Suelo * 0.40166 - P/ETP * 0.84463$	0.64	2.99e ⁻⁶
Fuste	N	$N (\%) = 1.587858 + Ht * 0.028657 - Hdom * 0.025978 - G * 0.003177 - IS * 0.007589 - Suelo * 0.137647 - Zona * 0.123814 - Latitud * 0.037590 - Manejo * 0.043104$	0.59	2.67e ⁻⁴
	P	$P (mg.g^{-1}) = 1.707241 - Hdom * 0.007661 + Suelo * 0.242092 - Zona * 0.187357 - Latitud * 0.060011 + P/ETP * 0.137715$	0.56	3.27e ⁻³
	K	$K (mg.g^{-1}) = 0.26624 - Hdom * 0.08163 + IS * 0.05256 + Suelo * 0.19596 + Edad * 0.05930 - Manejo * 0.12064$	0.64	6.78e ⁻⁶
	Mn	$Mn (mg.g^{-1}) = 0.3115415 - G * 0.0007218 - P/ETP * 0.0970156$	0.58	5.86e ⁻⁶
Corteza	P	$P (mg.g^{-1}) = -0.180908 - G * 0.007595 + IS * 0.016831 + Zona * 0.063408 + Latitud * 0.023831 + Edad * 0.006022 - P/ETP * 0.327462$	0.63	2.39e ⁻⁵
	K	$K (mg.g^{-1}) = 2.544655 + Ht * 0.052036 + N * 0.001031 - G * 0.047593 + Suelo * 0.622488 - P/ETP * 1.298071$	0.69	1.20e ⁻⁶
	S	$S (mg.g^{-1}) = 0.302209 - Ht * 0.086453 + Hdom * 0.092555 - G * 0.008105 - Suelo * 0.169594 + Zona * 0.126617 + Edad * 0.014531$	0.64	1.80e ⁻⁴
	Mn	$Mn (mg.g^{-1}) = 0.266066 - Hdom * 0.001348 - Suelo * 0.032260 - P/ETP * 0.082440$	0.60	4.01e ⁻⁶
Ramas < 5 cm	N	$N (\%) = 1.75311 - Ht * 0.02872 + IS * 0.01203 + Suelo * 0.20161 - Zona * 0.19384 - Latitud * 0.05336 + Edad * 0.03235$	0.70	1.81e ⁻⁶
	P	$P (mg.g^{-1}) = 4.0088802 - DAP * 0.0121348 - Hdom * 0.0269657 - N * 0.0002358 + IS * 0.0207415 + Suelo * 0.4599177 - Zona * 0.3229346 - Latitud * 0.1292612 + Edad * 0.0262642$	0.76	1.27e ⁻⁶
	K	$K (mg.g^{-1}) = 14.17741 - DAP * 0.04931 - Hdom * 0.10808 + IS * 0.11702 + Suelo * 1.42879 - Zona * 0.92073 - Latitud * 0.50829 + Edad * 0.11471 + Manejo * 0.27357$	0.65	4.70e ⁻⁵
	Ca	$Ca (mg.g^{-1}) = 9.31593 + DAP * 0.05576 - Hdom * 0.30206 + IS * 0.15947 + Suelo * 0.86995 - Zona * 0.65579 - latitud * 0.29810 + Edad * 0.27517 - P/ETP * 0.80702$	0.73	3.52e ⁻⁶
	Mg	$Mg (mg.g^{-1}) = 0.910707 - Ht * 0.038748 - N * 0.000185 + IS * 0.027838 + Suelo * 0.217970 - Zona * 0.107554 + Edad * 0.034263 - P/ETP * 0.361365$	0.62	6.11e ⁻⁵
	S	$S (mg.g^{-1}) = 0.0912564 - Ht * 0.0797137 + Hdom * 0.0461480 - N * 0.0001344 + IS * 0.0222628 + Edad * 0.0309968$	0.56	3.30e ⁻³
	Fe	$Fe (mg.g^{-1}) = 0.2101567 - Ht * 0.0373752 - N * 0.0001541 + IS * 0.0328724 + Suelo * 0.0818976 + Edad * 0.0368297 - P/ETP * 0.3031924$	0.51	5.37e ⁻⁴
	Mn	$Mn (mg.g^{-1}) = 0.340224 + DAP * 0.004325 - Ht * 0.015511 + IS * 0.010454 - Suelo * 0.086189 + Edad * 0.008510 - P/ETP * 0.168703$	0.63	2.38e ⁻⁵

Referencias: C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; DAP: diámetro medio del rodal (cm); Ht: altura media del rodal (m); Hdom: altura dominante del rodal (m); N: número de árboles por hectárea; G: área basal del rodal (m².ha⁻¹); Edad: Edad del rodal (años); IS: índice de sitio del rodal (m); Latitud: latitud del rodal (grados decimales); Manejo: ocupación del sitio de acuerdo con el IDR máximo; Zona: agrupamiento edafoclimático, cuya correspondencia se estableció en 1 al agrupamiento Ron, 2 al agrupamiento Pe y 3 al agrupamiento Ros; Suelo: 1 corresponde a suelo rojo y 2 a suelo pedregoso; P/ETP: coeficiente precipitación evapotranspiración.

En las Tabla 4-8 y Tabla 4-9 puede advertirse que el P y Mn son los elementos cuya mayor parte de la variabilidad de su concentración puede explicarse, en base a las variables independientes empleadas, en un mayor número de los compartimentos de *P. taeda* y, asimismo, puede estimarse su concentración en la mayor parte de la biomasa. También, la mayor variabilidad de la concentración de N puede explicarse satisfactoriamente para los dos compartimentos que mayor mineralomasa de N suelen presentar, como las hojas y el fuste. Asimismo, la variabilidad de concentración de K es también explicable en los tejidos leñosos de acuerdo con las variables independientes consideradas. El escaso valor de R^2 para algunos elementos, notoriamente para el C en todos los compartimentos, sugiere que estos elementos no varían sustancialmente en su concentración, o bien en algún caso no son adecuadamente explicados por las variables independientes consideradas.

Analizados por compartimento, los modelos permiten observar que las hojas muestran una variabilidad en la concentración de N, P, Ca, Mg y Mn, que en gran parte puede ser explicada por los cambios en las variables independientes consideradas en el estudio. En el caso del fuste, la mayor variabilidad de concentración de N, P, K y Mn, son satisfactoriamente explicadas. Además, las ramas <5 cm son las que mejores modelos explicativos presentan para todos los elementos considerados a excepción del C.

Puede observarse en la Tabla 4-9, que los modelos ajustados para los 5 nutrientes en el compartimento hojas, tuvieron como variables independientes comunes de ajuste, el tipo de suelo y el coeficiente P/ETP. Esto está mostrando que las variables ambientales relacionadas con la disponibilidad de agua para el crecimiento de las plantaciones, se asociaron con las concentraciones de nutrientes foliares. Las mismas variables independientes (suelo y P/ETP), también fueron variables comunes de ajuste en 17 y 14 ecuaciones respectivamente, de las 21 de ellas de ajuste satisfactorio. Las variables de crecimiento DAP y Ht, principales variables independientes utilizadas en las ecuaciones de biomasa, estuvieron presentes solo en 8 y 11 ecuaciones respectivamente.

Como se mencionó, P y Mn son los elementos que mostraron ajustes satisfactorios en los cuatro compartimentos arbóreos. Ambos elementos, también tuvieron como variable independiente común de ajuste, la variable P/ETP, mientras que a excepción del compartimento fuste, la variable suelo también fue variable común de ajuste. Estas tendencias muestran que la incorporación de variables ambientales en la ecuaciones permitieron aumentar la precisión del ajuste e interpretar los factores que afectan la

concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos de las plantaciones de *P. taeda*.

Ajuste de modelos para la identificación de la influencia de las variables ambientales y de manejo sobre la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos

Tabla 4-10. Coeficientes de los modelos lineales ajustados para las concentraciones de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en los compartimentos hojas, ramas, fuste y corteza de las plantaciones de *P. taeda*.

		Hojas								
Variable		Parámetro								
		C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Modelo 1	IS	0.13 (.)	0.03 (.)	-9.75e-3 0	0.08 0	-0.22 (*)	-0.06 (**)	3.54e-2 (*)	6.02e-3 0	0.01 0
	Edad	-0.02 0	0.02 (**)	-7.96e-4 0	-0.01 0	0.01 0	0.02 (*)	9.08e-3 0	-2.85e-3 0	-0.02 0
	N	-0.34e-3 0	0.16e-3 0	4.39e-5 0	0.68e-3 0	1.06e-3 0	0.27e-3 (.)	6.32e-6 0	7.47e-5 0	0.19e-3 0
	Latitud	-0.21 0	0.09 (*)	0.13 (***)	0.24 0	0.38 0	0.24 (***)	2.49e-2 0	-1.20e-2 0	0.07 0
	R ²	0.01	0.41	0.37	-0.01	0.16	0.44	0.25	0.19	0.19
Modelo 2	IS	0.11 0	0.04 (*)	6.32e-3 0	0.11 0	-0.17 (.)	-0.03 0	0.03 (*)	4.53e-3 0	0.02 0
	Edad	0.02 0	0.02 (**)	-6.63e-4 0	-1.08e-3 0	8.49e-3 0	0.02 (*)	8.80e-3 0	-2.74e-3 0	-0.02e-2 0
	N	-3.278e-5 0	7.06e-5 0	-5.43e-5 0	0.18e-3 0	0.61e-3 0	0.12e-3 0	9.35e-6 0	7.55e-5 0	-6.71e-5 0
	P/ETP	1.59 (.)	-0.49 (*)	-0.55 (**)	-2.55 0	-2.38 (.)	-0.87 (*)	-9.27e-4 0	1.13e-2 0	-1.28 0
	R ²	0.06	0.40	0.18	0.06	0.18	0.18	0.23	0.17	0.43
Modelo 3	Latitud	-0.04 0	0.10 (*)	0.10 0	0.16 0	0.09 0	0.17 (**)	0.06 0	-0.01 0	-0.01 0
	P/ETP	1.14 0	-0.12 0	-0.31 0	-2.59 (.)	-2.74 (*)	-0.34 0	0.21 0	-0.15 0	-1.49 (***)
	R ²	0.02	0.12	0.49	0.10	0.14	0.29	0.02	0.02	0.41
		Fuste								
Variable		Parámetro								
		C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Modelo 1	IS	-6.42e-3 0	-5.51e-3 0	-1.07e-2 0	-0.05 (.)	-5.85e-2 (.)	-1.05e-2 (.)	-1.07e-2 0	-3.01e-3 0	3.43e-3 0
	Edad	-0.04 0	-3.28e-4 0	-3.47e-3 0	-0.01 0	1.35e-2 0	3.70e-4 0	-1.90e-3 0	-5.70e-4 0	-1.97e-3 0
	N	0.14e-3 0	4.15e-5 0	6.09e-5 0	0.43e-3 (**)	1.09e-05 0	3.15e-5 0	5.08e-5 0	3.04e-5 0	1.50e-5 0
	Latitud	-0.05 0	1.36e-2 0	4.26e-3 0	-0.02 0	7.12e-2 0	3.17e-2 0	-5.40e-3 0	2.28e-2 0	1.25e-2 0
	R ²	0.05	0.14	0.31	0.50	0.04	0.13	0.19	0.01	0.17
Modelo 2	IS	-0.01 0	-3.84e-3 0	-1.03e-2 (.)	-0.05 (*)	-4.96e-2 0	-6.51e-3 0	-1.14e-2 (*)	-1.48e-4 0	5.04e-3 0
	Edad	-0.04 (.)	-4.99e-4 0	-3.85e-3 (.)	-0.016 (.)	1.36e-2 0	2.54e-4 0	-2.10e-3 0	-5.52e-4 0	-1.69e-3 0
	N	0.49e-3 0	4.48e-5 0	8.62e-5 (*)	0.50e-3 (**)	-4.62e-5 0	1.82e-5 0	6.92e-5 (.)	1.34e-5 0	-1.46e-5 0
	P/ETP	1.74 (*)	7.37e-3 0	1.19e-1 0	0.36 0	-3.18e-1 0	-8.33e-2 0	9.15e-2 0	-9.58e-2 0	-1.49e-1 (**)
	R ²	0.19	0.08	0.37	0.52	0.03	-0.02	0.24	-0.03	0.37
Modelo 3	Latitud	0.02 0	0.01 0	0.48e-3 0	-0.06 0	0.02 0	0.02 0	-0.01 0	0.02 0	6.161e-3 0
	P/ETP	0.43 0	-0.04 0	-0.05 0	-0.60 0	0.04 0	-0.06 0	-0.04 0	-0.09 0	-0.15 (***)
	R ²	-0.06	0.01	-0.06	0.02	-0.07	0.09	-0.05	0.07	0.36

Corteza										
Variable	Parámetro									
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	
Modelo 1	IS	0.08 (0)	-3.35e-3 (0)	-9.07e-3 (0)	-0.08 (0)	1.59e-2 (0)	-1.60e-2 (0)	-1.38e-2 (0)	0.02 (0)	1.36e-3 (0)
	Edad	-0.06 (*)	7.56e-3 (*)	-6.67e-3 (*)	-0.03 (.)	-4.74e-3 (0)	2.15e-3 (0)	9.32e-3(0) (*)	2.14e-3 (0)	-1.48e-3 (0)
	N	-0.54e-3 (0)	2.02e-5 (0)	2.28e-5 (0)	0.68 (*)	3.03e-5 (0)	2.37e-5 (0)	-2.64e-5 (0)	0.16e-3 (.)	2.66e-5 (0)
	Latitud	-0.11 (0)	-2.61e-2 (0)	-1.67e-2 (0)	-0.17 (0)	-0.19 (0)	1.19e-2 (0)	-7.87e-2 (**)	-0.06 (0)	5.52e-03 (**)
	R ²	0.04	0.17	0.27	0.43	-0.08	-0.05	0.42	0.16	0.19
Modelo 2	IS	0.07 (0)	-6.61e-3 (0)	-1.11e-2 (0)	-0.09 (.)	-7.06e-3 (0)	-1.45e-2 (0)	-2.36e-2 (.)	1.06e-2 (0)	2.10e-3 (0)
	Edad	-0.05 (.)	7.71e-03 (*)	-6.31e-03 (*)	-0.03 (0)	-2.17e-3 (0)	2.09e-03 (0)	9.74e-3 (.)	3.13e-3 (0)	-1.19e-3 (0)
	N	-0.75e-3 (0)	2.73e-5 (0)	7.53e-6 (0)	0.701 (.)	-3.13e-5 (0)	1.99e-5 (0)	-3.21e-6 (0)	1.29e-4 (0)	1.83e-6 (0)
	P/ETP	-0.93 (0)	5.03e-2 (0)	-6.27e-2 (0)	0.22 (0)	-1.79e-1 (0)	-2.53e-2 (0)	1.60e-1 (0)	-1.07e-1 (0)	-1.22e-01 (**)
	R ²	0.06	0.12	0.25	0.38	-0.15	-0.06	0.25	0.04	0.43
Modelo 3	Latitud	-0.14 (0)	-0.02 (0)	-0.03 (0)	-0.27 (.)	-0.21 (0)	0.25e-3 (0)	-0.08 (0)	-0.06 (.)	-1.54e-3 (0)
	P/ETP	-1.14 (0)	0.09 (0)	-0.23 (*)	-1.66 (*)	-0.55 (0)	-6.27e-3 (0)	0.19 (0)	-0.35 (0)	-0.15 (***)
	R ²	-0.01	0.04	0.11	0.12	0.01	-0.07	0.27	0.13	0.42

Ramas < 5 cm										
Variable	Parámetro									
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	
Modelo 1	IS	0.14 (0)	-1.88e-2 (*)	-2.48e-2 (*)	-0.08 (0)	-0.16 (**)	-3.04e-2 (**)	-1.76e-2 (*)	2.89e-3 (0)	3.29e-3 (0)
	Edad	1.12e-3 (0)	6.99e-3 (*)	-7.98e-3 (*)	-0.05 (0)	0.03 (0)	-9.06e-4 (0)	1.11e-3 (0)	-1.69e-3 (0)	-3.55e-3 (0)
	N	-0.30e-3 (0)	1.46e-4 (**)	5.77e-5 (0)	0.559e-3 (0)	0.42e-3 (0)	5.95e-5 (0)	3.50e-5 (0)	3.34e-5 (0)	3.50e-5 (0)
	Latitud	0.03 (0)	1.54e-2 (0)	-9.32e-3 (0)	-0.23 (0)	-0.12 (0)	4.19e-2 (.)	-2.87e-2 (0)	-1.45e-2 (0)	1.04e-2 (0)
	R ²	0.03	0.25	0.3814	0.44	0.21	0.22	0.19	0.22	0.12
Modelo 2	IS	0.15 (*)	-1.68e-2 (*)	-2.60e-2 (*)	-0.11 (.)	-0.17 (**)	-2.51e-2 (*)	-2.12e-2 (*)	1.06e-3 (0)	4.70e-3 (0)
	Edad	1.49e-3 (0)	7.10e-3 (*)	-8.04e-3 (*)	-0.05 (*)	0.03 (0)	-5.73e-4 (0)	1.39e-3 (0)	-1.71e-3 (0)	-2.92e-3 (0)
	N	-0.35e-3 (0)	1.28e-4 (*)	6.88e-5 (0)	0.69e-3 (.)	0.36e-3 (0)	5.91e-6 (0)	3.42e-5 (0)	4.46e-5 (.)	-1.91e-5 (0)
	P/ETP	-0.25 (0)	-9.99e-2 (0)	5.89e-2 (0)	0.81 (0)	-0.22 (0)	-0.283 (*)	1.36e-2 (0)	6.21e-2 (0)	-2.65e-1 (**)
	R ²	0.03	0.26	0.38	0.40	0.18	0.26	0.10	0.18	0.38
Modelo 3	Latitud	0.13 (0)	-2.53 (0)	-0.03 (0)	-0.31 (.)	-0.26 (.)	4.96e-3 (0)	-0.04 (*)	-0.01 (0)	-4.54e-3 (0)
	P/ETP	0.37 (0)	-0.14 (0)	-0.20 (0)	-1.31 (0)	-0.47 (0)	-0.27 (*)	-0.07 (0)	-0.05 (0)	-0.29 (***)
	R ²	-0.05	0.02	0.01	0.07	0.04	0.11	0.11	-0.01	0.39

Referencias: (**): nivel de probabilidad de significancia < 0.000, (*): nivel de probabilidad de significancia < 0.001; (*): nivel de probabilidad de significancia < 0.01; (.) : nivel de probabilidad de significancia < 0.05; (0) : nivel de probabilidad de significancia > 0.05; IS: índice de sitio; P/ETP: cociente precipitación evapotranspiración.

Los modelos 1 y 2 muestran que las concentraciones de N y Mg fueron afectadas, positivamente, por la edad de las plantaciones (Tabla 4-10). Además, las concentraciones foliares de N, P y Mg fueron afectadas positivamente por la latitud (modelo 1), mientras que fueron afectadas negativamente por la P/ETP en el modelo 2. Estos resultados indican que la concentración de N, P y Mg en las hojas, disminuye con el aumento del cociente P/ETP. Es decir, en la medida que las plantaciones disponen de mayor cantidad de agua, ya sea por aporte de precipitaciones o disminución de la evapotranspiración, las hojas de

las plantaciones de *P. taeda* poseen menor concentración de N, P y Mg. El modelo 3 muestra a las variables Latitud y P/ETP que afectan positivamente la concentración foliar de N y Mg, lo cual indica dependencia entre ambas variables.

En el compartimento fuste, la concentración de K fue afectada positivamente por la densidad del rodal (N), indicando que a mayor cantidad de árboles la concentración de este elemento aumenta, probablemente se deba a un efecto de dilución. La concentración de Mn en el fuste fue afectada negativamente por la P/ETP.

En el compartimento ramas, el IS afectó negativamente en ambos modelos las concentraciones de N, P, Ca, Mg y S. También la edad afectó negativamente la concentración de P, mientras que la misma variable afectó positivamente la concentración de N.

CONCLUSIONES

Los rangos medios de concentración de nutrientes encontrados en las plantaciones de *Pinus taeda* a lo largo de la zona de plantación en Argentina, indican que las localidades en las cuales se desarrolla la actividad forestal, cuyos sitios soportan en la actualidad hasta tercera rotación, aún son capaces de abastecer los niveles mínimos de nutrientes para el óptimo crecimiento de las plantaciones de esta especie.

El promedio de concentraciones para los agrupamientos etarios de las plantaciones de *P. taeda*, permitió identificar que las concentraciones de P y K disminuyeron en los compartimentos arbóreos lignificados en las plantaciones de mayor rango etario. Estos resultados indican que ante iguales cantidades de biomasa cosechada de productos madereros de plantaciones de *P. taeda* de diferentes edades, el impacto nutricional será menor cuando la cosecha se realice en plantaciones de mayor edad. Estos resultados son de gran relevancia para el sector forestal, ya que los elementos P y K son considerados carentes en los suelos rojos de esta región. Por otro lado, la mayor concentración de N se encuentra en plantaciones de mayor edad y, si bien en líneas generales, las hojas de la plantación quedan en el sitio durante la cosecha, la cosecha de la totalidad de la biomasa de plantaciones de mayor edad, repercutiría más intensamente al contenido de nitrógeno extraído del sitio. Considerando que regionalmente son de mayor importancia el P y K

respecto del N, se recomienda realizar la cosecha a la mayor edad posible para contribuir a mantener la capacidad productiva de los sitios de esta región.

Mediante el agrupamiento edafoclimático de las plantaciones de *P. taeda* se determinó que las condiciones de sitio no afectaron a las concentraciones de todos los compartimentos por igual, e incluso, a todos los nutrientes en un mismo compartimento. La relación de disponibilidad de nutrientes en el suelo, en líneas generales, no se asoció con la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos, no obstante, las relaciones de oferta y demanda de nutrientes entre el suelo y el estrato arbóreo, respectivamente, podría verse mejor reflejada a partir del cálculo de contenidos entre ambos estratos.

La menor concentración de algunos elementos nutritivos en las hojas de las plantaciones del agrupamiento Pe, si bien no se estudiaron los procesos fisiológicos, sería una consecuencia de la menor disponibilidad de agua en el suelo, ya que en este agrupamiento se encontró la mayor concentración de elementos nutritivos en el suelo y las plantaciones allí agrupadas son las que mostraron el menor crecimiento. Desde el punto de vista del manejo forestal, las plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos no deben ser fertilizadas, ya que el menor crecimiento respecto de las plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos se debe, principalmente, a la menor disponibilidad de agua en el suelo y no a la escasez de nutrientes. Por otro lado, la fertilización en estas plantaciones podría ocasionar efectos adversos durante períodos de carencia de lluvia.

La incorporación de variables ambientales para el ajuste de modelos para la determinación de la concentración de nutrientes mejoró los parámetros estadísticos de los modelos. Los 21 modelos resultantes con indicadores estadísticos confiables, facilitarán la tarea de evaluación de impacto nutricional por la cosecha forestal. Si bien los modelos poseen amplio número de variables ambientales, las mismas podrán ser de fácil obtención y relativamente de bajo costo respecto de los costos en que se incurre con la toma de muestras y la determinación de las concentraciones de nutrientes en laboratorio. Bajo estos conceptos y suponiendo similar escenario ambiental a futuro, estos modelos podrán ser utilizados con simuladores de crecimiento forestal para *P. taeda*, que en su conjunto podrán arrojar resultados de impacto nutricional a lo largo del turno de rotación.

Los resultados obtenidos por agrupamientos edafoclimáticos sugieren que las concentraciones de nutrientes en los compartimentos arbóreos del *P. taeda* dependen, en

mayor medida, de la disponibilidad de agua para las plantas. Además, las variables que mejor explicaron la variabilidad de los modelos para los diferentes nutrientes, son aquellas relacionadas directamente con la disponibilidad de agua para las plantaciones. El conjunto de resultados encontrados sugiere que las concentraciones de nutrientes en los compartimentos arbóreos de las plantas de *P. taeda* y, bajo las condiciones ambientales de estudio, dependen principalmente de la disponibilidad de agua con la que éstas cuentan durante el transcurso de su desarrollo.

Independientemente de la disparidad, principalmente física de los suelos de la región de estudio y, de la disponibilidad de agua con la que cuentan las plantaciones de *P. taeda* para su crecimiento en la República Argentina, de acuerdo con las concentraciones de nutrientes encontradas en las diferentes edades y en los diferentes agrupamientos edafoclimáticos, como así también las relaciones de concentraciones de nutrientes foliares, las plantaciones actuales de *P. taeda* no registran mayores deficiencias nutricionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Adams M & Allen L. 1985. Nutrient proportions in foliage of semi-mature Loblolly pine. *Plant Soil*, 86:27–33.
- Aerts R & Chapin III F. 2000. The mineral nutrition of wild plants revisited: a re-evaluation of processes and patterns. *Adv. Ecol. Res.*, 30:1–68.
- Alam S, Kodama R, Akiha F, Kamei S & Kawai S. 2006. Alleviation of manganese phytotoxicity in barley with calcium. *J. Plant Nutr.*, 29: 59-74.
- Albaugh J, Blevins L, Allen L, Albaugh T, Fox T, Stape J & Rubilar R. 2010. Characterization of foliar macro- and micronutrient concentrations and ratios in Loblolly pine plantations in the Southeastern United States. *South. J. Appl. For.*, 34(2): 53-64.
- Albaugh T, Allen L, Dougherty P, Kress L & King J. 1998. Leaf area and above-and belowground growth responses of Loblolly pine to nutrient and water additions. *For. Sci.*, 44(2): 317-328.

- Azcon-Bieto J, Fleck I, Aranda-Frattarola X & Gomez-Casanovas N. 2008. Fotosíntesis, factores ambientales y cambio climático. En: Azcon-Bieto J & Talon (Eds) *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. M. McGraw- Hill. Madrid, 2nd edition: 672 p.
- Balzarini M, Gonzalez L, Tablada M, Casanoves F, Di Rienzo J & Robledo C. 2008. *Manual del Usuario INFOSTAT*. Editorial Brujas, Córdoba, Argentina.
- Barron-Gafford G, Will R, Burkes E, Shiver B & Teskey R. 2003. Nutrient concentrations and contents, and their relation to stem growth, of intensively managed *Pinus taeda* and *Pinus elliottii* stands of different planting densities. *Forest Science*, 49(2): 293-300.
- Bellote A & Silva H. 2000. Sampling techniques and nutritional evaluations en Eucalyptus plantations. P135-166 En: Gonçalves J & Benedetti V (eds) *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF.
- Bellote A, Filho M & Dedecek R. 2005. Influência dos nutrientes minerais e do solo sobre a produtividade, a estrutura anatômica e a densidade da madeira de *Pinus taeda*. *Documentos / Embrapa Florestas* (ISSN 1517- 536X) 121: 94 p.
- Binkley D. 1993. *Nutrición Forestal*. Prácticas de manejo. Editorial LIMUSA: 340 p.
- Bizon J. 2005. *Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de Pinus taeda L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes*. Dissertação, Mestrado em Recursos Florestais – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil.
- Blazier M & Hennessey T. 2008. Seasonal soil and foliage nutrient dynamics of a juvenile loblolly pine plantation: Impacts of fertilizer formulation and vegetation suppression. *Forest Ecology and Management*, 255: 3404–3415.
- Cakmak I. 2013. Magnesium in crop production, food quality and human health. *Plant Soil*, 368:1–4. DOI 10.1007/s11104-013-1781-2.
- Cakmak I & Kirkby E. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133: 692–704.
- Caldato S. 2011. *Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de Pinus taeda L. no nordeste Argentino*. Dissertação, Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura. UFSM, RS, Brasil.
- Chapin III S, Bloom A, Field C & Waring R. 1987. Plant responses to multiple environmental factors. *BioScience*, 37(1): 49-57.

- Crechi E, Fassola H, Fernández R, Frield R & Falher J. 2005. Efecto del raleo en *Pinus taeda*. *IDIA Forestales*, 21:43-47.
- Dedecek R, Namikawa Fier I, Speltz R & Souza Lima L. 2008. Influência do sítio no desenvolvimento do *Pinus taeda* L. aos 22 años: estado nutricional das plantas. *Floresta*, 38(2): 351-359.
- Dicus C & Dean T. 2008. Tree-soil interactions affect production of loblolly and slash pine. *For. Sci.*, 54 (2): 134–139.
- Ducic T & Polle A. 2005. Transport and detoxification of manganese and copper in plants. *Braz. J. Plant Physiol.*, 17: 103-112.
- Durzan D & Steward F. 1983. Nitrogen metabolism. Chapter 2, 8: 55-265 En: Steward FC (Ed) *Plant Physiology, an Advanced Treatise*. Academic Press, Inc., New York.
- Espinoza J, Allen H, McKeand S & Dougherty P. 2012. Stem sinuosity in loblolly pine with nitrogen and calcium additions. *Forest Ecology and Management*, 265: 55–61.
- Faustino L, Bulfe N, Pinazo M, Goya J, Martiarena R, Knebel O & Graciano C. 2011. *Pinus taeda* L. initial growth in response to N and P fertilization, on a stony soil of Misiones province. *Yvyrareta*, 18:52–57.
- Fisher R & Binkley D. 2000. *Ecology and management of forest soils*. 3rd ed. John Wiley and Sons, Inc., New York, USA: 489 p.
- Flexas J, Ribas-Carbo M, Bota J, Galmés J, Henkle M, Martinez-Canellas S & Medrano H. 2006. Decreased Rubisco activity during water stress is not induced by decreased relative water content but related to conditions of low stomatal conductance and chloroplast CO₂ concentration. *New Phytol.*, 172: 73-82.
- Fox T, Jokela E & Allen L. 2007. The development of pine plantation silviculture in the southern US. *J. For.*, 105: 337–347.
- Frangi J, Barrera M, Puigdefábregas J, Yapura P, Arambarri A & Richter L. 2005. Ecología de los bosques de Tierra del Fuego. Cap 18 En: Arturi M, Frangi J & Goya J (eds.) *Ecología y Manejo de Bosques de Argentina*. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata, Libro electrónico. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/15915>.

- Garrison M, Moore J, Shaw T & Mika P. 2000. Foliar nutrient and tree growth response of mixed-conifer stands to three fertilization treatments in northeast Oregon and north central Washington. *Forest Ecology and Management*, 132: 183–198.
- Gough C, Seiler J Maier C. 2004. Short-term effects of fertilization on loblolly pine (*Pinus taeda* L.) physiology. *Plant, Cell and Environment*, 27: 876-886.
- Goya J, Frangi J, Denegri G & Larocca F. 2009. Simulación del impacto de diferentes regímenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *AUGMDOMUS*, 1:1-17.
- Goya JF, Pérez C & Fernández R. 2008. Concentración foliar de nutrientes en plantaciones de diferentes edades de *Pinus taeda* L. en el norte de Misiones, Argentina. *XIII Jornadas Técnicas Forestales y Ambientales*, Facultad de Ciencias Forestales, UNAM - EEA Montecarlo, INTA. Eldorado, Misiones, Argentina.
- Goya JF, Pérez C, Frangi J & Fernández R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral*, 13: 139-150.
- Grassi G, Vicinelli E, Ponti F, Cantoni L & Magnani F. 2005. Seasonal and inter annual variability of photosynthetic capacity in relation to leaf nitrogen in a deciduous forest plantation in northern Italy. *Tree Physiology*, 25: 349–360.
- Grubb P. 1998. A reassessment of the strategies of plants which cope with shortages of resources. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 1(1): 3–31.
- Ibañez C, Nuñez P, Pezzutti R & Rodriguez F. 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del Noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. *Bosque*, 25(2): 69-76.
- Jokela E. 2004. Nutrient management of southern pines. En: Dickens E, Barnett J, Hubbard G & Jokela E (eds) *Slash pine: still growing and growing!* Proceedings of the slash pine symposium. Gen. Tech. Rep. SRS-76. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 148 p.
- King N, Seiler J, Fox T & Johnsen K. 2008. Post-fertilization physiology and growth performance of loblolly pine clones. *Tree Physiology*, 28: 703–711.

Kiser L, Fox T & Carlson C. 2013. Foliage and litter chemistry, decomposition, and nutrient release in *Pinus taeda*. *Forests*, 4: 595-612. doi:10.3390/f4030595.

Kochian L, Hoekenga O & Piñeros M. 2004. How do crops plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorus efficiency. *Annu. Rev. Plant Biology*, 55: 459-493.

Laing W, Greer D, Sun O, Beets P, Lowe A & Payn T. 2000. Physiological impacts of Mg deficiency in *Pinus radiata*: growth and photosynthesis. *New Phytol.*, 146: 47:57

Lambers H, Chapin III S & Pons T. 2006. *Plant Physiological Ecology*. New York: Springer: 540 p.

Lei Y, Korpelainen H & Li C. 2007. Physiological and biochemical responses to high Mn concentrations in two contrasting *Populus cathayana* populations. *Chemosphere*, 68: 686–694.

Leite F, Silva I, Ferreira Novais R, Barros N, Lima Neves C & Albuquerque Villani E. 2011. Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. *Revista Brasileira de Ciencia do Solo*, 35:949-959.

Linderholm H. 2001. Climatic influence on scots pine growth on dry and wet soils in the central Scandinavian mountains, interpreted from tree-ring widths. *Silva Fennica*, 35(4): 415–424.

Londero E, Schumacher M, Szymczak D & Viera M. 2011. Exportação e reposição nutricional no primeiro desbaste de um povoamento de *Pinus taeda* L. em área de segunda rotação. *Ciência Florestal*, 21(3): 487-497.

Lopes V. 2013. *Dinâmica nutricional em um povoamento de Pinus taeda L., Rio Grande do Sul, Brasil*. Dissertação, Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, Universidade Federal de Santa Maria, UFSM, RS, Brasil.

Lúcio A, Rossato R, Schumacher M, Oliveira Fortes F, Storck L & Witschoreck R. 2010. Limites de precaução e de controle em análises nutricionais de espécies florestais. *Árvore*, 34(3): 529-537.

Luh C & Schulte E. 1985. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 16: 943- 958.

- Manter D, Kavanagh K & Rose C. 2005. Growth response of Douglas-fir seedlings to nitrogen fertilization: importance of Rubisco activation state and respiration rates. *Tree Physiology*, 25: 1015–1021.
- Martiarena R, Frangi J, Pinazo M, Von Wallis A & Fernández R. 2011a. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*, Volume 2011, Article ID 761532: 10 p. doi:10.1155/2011/761532.
- Martiarena R, Pinazo M, Von Wallis A, Knebel O & Pahr N. 2011b. Alternativas de manejo para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. *Ciencia del Suelo*, 29(1): 39-48.
- Mayvorme Paim R. 2007. *Efeito do uso de lama de cal e cloreto de potássio no solo, estado nutricional e crescimento do Pinus taeda L., sobre latossolo*. Dissertação, Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração Conservação da Natureza, Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- Mengel K & Kirkby E. 2000. *Principios de nutrición vegetal*. 4^{ta} edición, 1^{era} en español. Instituto Nacional de la Potasa. Basilea, Suiza: 607 p.
- Millaleo R, Reyes-Díaz M, Ivanov A, Mora M & Alberdi M. 2010. Manganese as essential and toxic element for plants: transport, accumulation and resistance mechanisms. *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, 10(4): 476 – 494.
- Morales C. 2007. *Relação entre atributos do solo com a produtividade de Pinus taeda*. Dissertação. Programa De Pós-Graduação em Agronomia Mestrado em Ciência do Solo. Centro de Ciências Agroveterinárias da Universidade do Estado de Santa Catarina, Brasil.
- Nasholm T & Ericsson A. 1990. Seasonal changes in amino acids, protein and total nitrogen in needles of fertilized Scots pine trees. *Tree Physiology*, 6: 267-281.
- Natali S, Sañudo-Wilhelmy S & Lerdau M. 2009. Effects of elevated carbon dioxide and nitrogen fertilization on nitrate reductase activity in sweetgum and loblolly pine trees in two temperate forests. *Plant Soil* DOI: 10.1007/s11104-008-9718-x.
- Parry M, Andralojc P, Khan S, Lea P & Keys A. 2002. Rubisco activity: effects of drought stress. *Ann. Bot.*, 89: 833-839.
- Peoples T & Koch D. 1979. Role of Potassium in carbon dioxide assimilation in *Medicago sativa* L. *Plant Physiol.*, 63: 878-881.

- Pérez C, Goya J, Bianchini F, Frangi J & Fernández R. 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*, 31(11): 794-801.
- Piatek K & Allen L. 2000. Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-years old *Pinus taeda*. *Forest Ecology and Management*, 129:143-152.
- Pittman J. 2005. Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis. *New Phytol.*, 167: 733–742.
- Pritchett W. 1986. *Suelos Forestales. Propiedades, Conservación y Mejoramiento*. Editorial Limusa: 634 p.
- Reissmann C & Wisniewski C. 2000. Aspectos nutricionais de plantios de *Pinus*. P 135-166 En: Goncalves J & Benedetti V. *Nutrição e fertilização florestal*. Piracicaba: IPEF
- Rennenberg H, Dannenmann M, Gessler A, Kreuzwieser J, Simon J & Papen H. 2009. Nitrogen balance in forests: nutritional limitation of plants under climate change stresses. *Plant Biology*, 11: S4–S23.
- Ripullone F, Grassi G, Lauteri M & Borghetti M. 2003. Photosynthesis–nitrogen relationships: interpretation of different patterns between *Pseudotsuga menziesii* and *Populus × euroamericana* in a mini-stand experiment. *Tree Physiology*, 23: 137–144.
- Rodríguez C. 2004. *Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do Pinus taeda L.* Dissertação curso de Pós- Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo, Universidade Federal do Paraná, Brasil.
- Rubilar R, Allen L & Kelting D. 2005. 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.
- Samuelson L, Stokes T, Cooksey T & Mclemore P. 2001. Production efficiency of loblolly pine and sweetgum in response to four years of intensive management. *Tree Physiology*, 21: 369–376.
- Santiago L, Wright S, Harms K, Yavitt J, Korine C, Garcia M & Turner B. 2012. Tropical tree seedling growth responses to nitrogen, phosphorus and potassium addition. *J. Ecol.*, 100: 309–316.

- Shaul O. 2002. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. *BioMetals*, 15: 309–323.
- Sixel R. 2012. *Sustentabilidade da produtividade de madeira de Pinus taeda com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes*. Dissertação de Mestre em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em Silvicultura e Manejo Florestal. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Brasil.
- Stovall J, Carlsonb C, Seiler J, Fox T & Yanez M. 2011. Growth and stem quality responses to fertilizer application by 21 loblolly pine clones in the Virginia Piedmont. *Forest Ecology and Management*, 261: 362–372.
- Sypert R. 2006. *Diagnosis of loblolly pine (Pinus taeda L.) nutrient deficiencies by foliar methods*. Thesis submitted to the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Forestry: 115 p.
- Sun O & Payn T. Magnesium nutrition and photosynthesis in *Pinus radiata*: clonal variation and influence of potassium. *Tree Physiology*, 19: 535-540.
- Switzer L & Nelson L. 1972. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L) plantation ecosystems: the first 20 years. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 143-147.
- Taiz L & Zeiger E. 2006. *Plant Physiology*. Fourth Edition. Sinauer Associates. Sunderland, MA: 764 p.
- Tiarks A & Haywood J. 1986. *Pinus taeda* L. response to fertilization, herbaceous plant control, and woody plant control. *Forest Ecology and Management*, 14: 103-112.
- Tripler C, Kaushal S, Likens G & Todd Walter M. 2006. Patterns in potassium dynamics in forest ecosystems. *Ecology Letters*, 9: 451–466.
- Viera M & Schumacher M. 2009. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal*, 19(4): 375-382.
- Vitousek P, Porder S, Houlton B & Chadwick O. 2010. Terrestrial P limitation: mechanisms, implications, and N–P interactions. *Ecol. Appl.*, 20: 5–15.
- Vogel H, Schumacher M, Storck L & Witschoreck R. 2005. Crescimento inicial de *Pinus taeda* L. relacionado a doses de N, P e K. *Ciência Florestal*, 15: 199–207.

Vogt K, Grier C & Vogt D. 1986. Production, turnover, and nutrient dynamics of above- and belowground detritus of world forests. *Advances In Ecological Research*, 15: 303-377.

Warren C. 2011. How does P affect photosynthesis and metabolite profiles of *Eucalyptus globulus*? *Tree Physiology*, 31: 727–739.

Warren C, Dreyer E & Adams M. 2003. Photosynthesis-Rubisco relationships in foliage of *Pinus sylvestris* in response to nitrogen supply and the proposed role of Rubisco and amino acids as nitrogen stores. *Trees*, 17: 359–366.

Wright S, Yavitt J, Wurzburger N, Turner B, Tanner E, Sayer E, Santiago L, Kaspari M, Hedin L, Harms K, Garcia M & Corre M. 2011. Potassium, phosphorus or nitrogen limit root allocation, tree growth, or litter production in a lowland tropical forest. *Ecology*, 92(8): 1616–1625.

Zhang S & Allen L. 1996. Foliar nutrient dynamics of 11 year-old Loblolly Pine (*Pinus taeda*) following nitrogen fertilization. *Can J. For. Res.*, 26: 1426- 1439.

Capítulo 5

**EFFECTO DE LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LOS
NUTRIENTES ACUMULADOS E IMPACTO NUTRICIONAL DE LA
COSECHA FORESTAL EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* L. EN LA
MESOPOTAMIA ARGENTINA**

EFFECTO DE LAS CONDICIONES EDAFOCLIMÁTICAS SOBRE LOS NUTRIENTES ACUMULADOS E IMPACTO NUTRICIONAL DE LA COSECHA FORESTAL EN PLANTACIONES DE *Pinus taeda* L. EN LA MESOPOTAMIA ARGENTINA

INTRODUCCIÓN

El mantenimiento de la productividad de los sistemas forestales depende de múltiples factores, entre otros, de las entradas y salidas de nutrientes, reconocidos muchos de ellos, como esenciales para el crecimiento de las plantas (Witschoreck, 2008). Mantener la productividad de un ecosistema forestal requiere de un equilibrio en el ciclo de los nutrientes entre la plantación y el suelo (Chuyong *et al.*, 2000). Según Stape (2002), entender el impacto de las prácticas forestales sobre la productividad de los suelos es responsabilidad de los silvicultores, cuyo impacto por rotaciones sucesivas ha adquirido mayor atención en los últimos años (Wei *et al.*, 2000; Carter *et al.*, 2006; Nave *et al.*, 2010). Por ello, conocer la compartimentalización de nutrientes en la biomasa aérea de las plantaciones, permite al forestador tomar decisiones de manejo orientadas a la minimización de las pérdidas de nutrientes del sistema forestal y, hacer más rentable la actividad mediante la disminución de la reposición de los nutrientes al sistema, más allá que la reposición, en la actualidad, no se efectúa en la Mesopotamia Argentina.

Durante el ciclo forestal ocurren cambios en la compartimentalización de los nutrientes en los componentes del sistema forestal de *P. taeda* (Martiarena *et al.*, 2009). La magnitud del cambio depende del momento en que se encuentre el ciclo forestal, pudiendo reducirse a ser el suelo el único componente del sistema que almacena la totalidad de los nutrientes con que cuenta el sitio para la futura plantación. Según Goya *et al.* (2009), las prácticas de postcosecha, como la quema de residuos causan pérdidas de materia orgánica y nutrientes, mientras que Martiarena *et al.* (2007) destacan que durante la cosecha forestal las pérdidas podrían alcanzar valores cercanos al 40% de los residuos originados por ella. Las operaciones de poda y raleo, también afectan la circulación de nutrientes, ya que pueden modificar el microclima de la plantación, como la penetración de la luz y el movimiento y la temperatura del aire (Ma *et al.*, 2010). Durante la cosecha forestal, la extracción de los productos maderables altera la dinámica de los nutrientes de los ecosistemas forestales y disminuyen las reservas de nutrientes (Isemann *et al.*, 1999;

Merino *et al.*, 2005). De acuerdo con la modalidad de cosecha aplicada, la productividad en sucesivas rotaciones puede registrar pérdidas de hasta el 20% (Wei *et al.*, 2000). Según Goya *et al.* (2003), las pérdidas de nutrientes del sistema forestal ocasionadas por la modalidad de cosecha en plantaciones de *P. taeda* de 20 años de edad podría aumentar 2,3 veces respecto de cosechas bajo la modalidad de fuste entero.

Un ciclo forestal de *P. taeda* en la Mesopotamia Argentina, cuyo objetivo sea la producción de madera para aserrado, tiene un turno de corta cercano a los 20 años de edad. Durante los primeros años de este período, el almacenamiento de nutrientes en las hojas es el de mayor importancia dentro de los compartimentos aéreos. En edades intermedias, entre el establecimiento y la cosecha, los nutrientes, en general, se distribuyen en porcentajes más similares de almacenamiento en los compartimentos hojas, ramas y fuste. Finalmente y próximo a la edad de corta el compartimento fuste adquiere una mayor relevancia como contenedor de nutrientes en forma absoluta y relativa. Adegbidi *et al.* (2005), en una plantación de *P. taeda* de 4 años de edad, encontraron en el compartimento hojas, 55, 52 y 49 % respectivamente de N, P y K del total contenido en la biomasa aérea. Caldato (2011) en una plantación de 13 años de edad registró en las hojas 28, 29 y 26 % respectivamente de N, P y K. Otras investigaciones muestran que cercano a la edad de corta, y comparados con edades previas, los porcentajes de nutrientes en el compartimento hojas se mantiene porcentualmente estable, disminuyen los porcentajes en las ramas y aumentan los contenidos de estos nutrientes en el compartimento fuste (Bizon, 2005; Witschoreck, 2008; Lopes, 2013; Schumacher *et al.*, 2013).

El análisis de la compartimentalización y la cuantificación del contenido de nutrientes, en cada uno de ellos, también permite determinar coeficientes que ayudan al silvicultor en la toma de decisiones. Además, ayudan a señalar el impacto ambiental ocasionado por la extracción de nutrientes (Goya *et al.*, 2009). Por otro lado, Ewel & Hiremath (1996) indican que la eficiencia en el uso de los nutrientes es un indicador de la efectividad con la cual los nutrientes esenciales intervienen en la productividad. Binkley *et al.* (2004) indican que, la eficiencia de uso de un recurso puede modificarse con la disminución o incremento en la disponibilidad de otro recurso, como así también los tratamientos silviculturales podrían modificar la eficiencia de uso de los recursos.

El índice de exportación de nutrientes (IE) (Martiarena, 2008), conocido también como coeficiente de utilización biológica (CUB) (Melo *et al.*, 1995; Schumacher *et al.*, 2013) o, eficiencia de utilización de nutrientes (EUN) (Santana *et al.*, 2002), es uno de los índices que ayudan a detectar el impacto nutricional ocasionado por la cosecha forestal.

Otro índice que suele emplearse para determinar la eficiencia de uso de los nutrientes por las plantaciones es la retraslocación de nutrientes. Este es un proceso complejo que involucra moléculas orgánicas pequeñas -producto de la transformación de macromoléculas que no forman parte de paredes celulares ni están “fijas” en otros componentes celulares -, y sustancias iónicas disueltas, ambas de fácil transporte. Por esta razón se destaca que los elementos retraslocados son elementos “móviles”, principalmente el N y P que integran- aminoácidos y proteínas de bajo peso molecular, y el K⁺ disuelto (Aerts, 1996). Según Chapin (1980), Vitousek (1982) y Chuyong *et al.* (2000), la retraslocación es un mecanismo utilizado por las plantas para evitar la pérdida de nutrientes y juega un importante rol en el mantenimiento de la fertilidad para el crecimiento de las plantaciones forestales (Switzer & Nelson, 1972; Sette *et al.*, 2013). Del Arco *et al.* (1991) indican que la retraslocación se realiza con la finalidad de maximizar su uso cuando estos son escasos en el suelo; además, con la retraslocación la plantación reduce la dependencia de los nutrientes contenidos en el suelo (Ranger & Collin-Belgrand, 1996). Varias hipótesis se han generado en torno a las condiciones de sitio, pero la de mayor difusión es que especies en sitios más pobres retraslocan mayores porcentajes de nutrientes (Rejmánková, 2005). Pugnaire & Chapin (1993), señalan que las plantas que crecen en suelos infértiles retraslocan menor cantidad de nutrientes que aquellas que crecen en suelos fértiles, pero proporcionalmente lo hacen en mayores cantidades. No obstante, otras investigaciones en las que se estudiaron diversidad de especies y condiciones de sitios referencian que el promedio de retraslocación de nutrientes, principalmente N y P, es cercano al 50% sin manifestar diferencias en cuanto a condiciones de sitio (Aerts, 1996).

El Ca es un elemento constituyente de las paredes celulares y no es reabsorbido. El cálculo de la retraslocación es el coeficiente de retraslocación instantánea, cuyo cálculo podría ser inexacto debido a la pérdida de compuestos orgánicos solubles (Frangi *et al.*, 2004).

El follaje de las plantas contiene entre el 30 y 70% de los nutrientes utilizados anualmente por la plantación (Piatek & Allen, 2000), siendo capaz de retraslocar hasta el 80% de ellos (Hagen-Thorn *et al.*, 2006), transformándose la retraslocación junto con la absorción

desde el suelo, en la fuente primaria de los nutrientes utilizados por la plantación (Piatek & Allen, 2000). La retraslocación significa un costo para las plantas por lo que las mismas deben equilibrar los beneficios con los costos en la conservación de los nutrientes (Wright & Westoby, 2003), por ello los porcentajes retraslocados son diferentes en las diferentes especies, diferentes edades de una misma especie y bajo diferentes condiciones de sitio (Hagen-Thorn *et al.*, 2006). Según Cole & Rapp (1981), la hojarasca es el principal aporte de materia orgánica, N, P y Ca, al suelo, mientras que la principal fuente de K son los pluviolavados; el Mg llega al suelo mediante ambas vías.

El objetivo del presente capítulo es cuantificar el contenido de nutrientes en cada compartimento arbóreo aéreo, y por ende, en la biomasa aérea forestal para determinar el efecto de las variables ambientales y de manejo y, el impacto nutricional de la cosecha forestal en diferentes agrupamientos edafoclimáticos y en las diferentes edades de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se calculó el contenido de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn), para cada compartimento arbóreo de los 233 árboles distribuidos en las parcelas de los 31 sitios seleccionados (capítulos 2, 3 y 4 de esta Tesis). Para ello se utilizaron los resultados de concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos provistos por los análisis químicos realizados (Tabla 4-2) y las biomásas de los ejemplares muestreados (capítulo 4 de esta Tesis).

El contenido de nutrientes en todos los compartimentos se obtuvo por el producto de la biomasa de cada compartimento por la respectiva concentración de cada nutriente. La concentración de nutrientes utilizada correspondió al promedio de concentración de cada nutriente obtenido para la totalidad de árboles apeados en el respectivo sitio y compartimento, obteniendo el contenido del respectivo nutriente del compartimento en cada árbol. El contenido total en la parcela fue obtenido por sumatoria de los contenidos individuales, con lo cual luego, se extrapola el contenido de la parcela al contenido en la superficie de referencia (hectárea = ha).

El contenido de nutrientes en las ramas fue estimado para cada uno de los compartimentos de tamaño de las mismas, individualmente. No obstante, la biomasa de ramas fue

estimada a partir de la ecuación general correspondiente para la sumatoria de los tres compartimentos de ramas (ramas < 5 cm; ramas > 5 cm; ramas secas), como se efectuó en el capítulo 3 de esta Tesis. Para obtener el contenido de cada compartimento individualmente, se calculó el porcentaje de cada uno de los compartimentos ramas a partir de los datos obtenidos individualmente en campo y los pesos secos de cada compartimento. Estos porcentajes, multiplicados por el valor general de biomasa de ramas de cada árbol, arrojaron el valor individual de cada compartimento de cada árbol, obteniendo luego el contenido en la parcela y en la Ha. Estos valores multiplicados por las concentraciones de nutrientes, y sumados dieron lugar a la mineralomasa de ramas.

La cantidad total de cada nutriente en el vuelo forestal se obtuvo por sumatoria de los valores parciales en cada compartimento.

El contenido de Zn en las hojas de las plantaciones de *P. taeda* se calculó en 14 rodales, distribuidos 5, 4 y 5 respectivamente en Ron, Pe y Ros. El cálculo de contenido se realizó de idéntica forma que lo descrito para los restantes nutrientes.

Se efectuó un análisis de variancia de los contenidos de nutrientes en los compartimentos aéreos y se aplicó el Test de Tukey para determinar diferencias entre agrupamientos edafoclimáticos. En dicho análisis se utilizó la variable edad como covariable. El compartimento ramas agrupó la totalidad de cada nutriente contenido en los 3 agrupamientos de ramas individualmente (ramas < 5 cm; ramas > 5 cm y, ramas secas).

Ajuste de modelos explicativos para la determinación de la influencia de las variables del rodal y ambientales, sobre los nutrientes acumulados en el vuelo forestal

Se ajustaron modelos explicativos para determinar la influencia de cada variable ambiental y de manejo sobre el contenido de nutrientes en la biomasa aérea de las plantaciones. Para ello se ajustaron modelos en los que se probaron 3 combinaciones de variables para la determinación del contenido de cada uno de los nutrientes, en función de las variables predictoras:

Modelo 1. variables predictoras: IS, edad, densidad del rodal y latitud.

Modelo 2. variables predictoras: IS, edad, densidad del rodal y cociente precipitación evapotranspiración (P/ETP).

Modelo 3. variables predictoras: latitud y P/ETP.

Correlación del contenido de nutrientes en el vuelo forestal con las variables del rodal y del ambiente

A los efectos de determinar la influencia de las variables ambientales y del rodal sobre los nutrientes acumulados en el vuelo forestal, se efectuó la correlación simple de Pearson entre las variables IS, Edad, P/ETP y Latitud con el contenido de nutrientes en el vuelo forestal. También, se efectuó la correlación simple entre el contenido de nutrientes en el suelo con el contenido de nutrientes en el vuelo forestal. El nivel de probabilidad utilizado fue de $p < 0.05$

Evaluación del impacto nutricional de la cosecha

El impacto de cosecha se evaluó por medio del índice de exportación de nutrientes (IE), cuyo cálculo se realizó mediante:

$$IE = BC/NE$$

Donde:

IE: Índice de exportación de nutrientes (Mg biomasa. Kg nutriente⁻¹)

BC: Biomasa de fuste y su corteza cosechada (Mg)

NE: Nutriente contenido en la biomasa exportada del fuste y su corteza (Kg)

El cálculo de la inversa de este índice expresa la cantidad de nutriente utilizado en función de la madera exportada, cuyo resultado arrojaría una interpretación similar a la que se puede realizar con el IE.

El IE fue calculado para la biomasa del fuste y su corteza, en cada uno de los rodales. El IE se comparó para los agrupamientos edafoclimáticos Ron (suelos rojos del norte), Pe (suelos pedregosos del norte) y Ros (suelos rojos del sur). Además, se agruparon los rodales en tres fajas etarias. La primera de ellas agrupó a los rodales menores o iguales a 7 años de edad; el segundo lo hizo con los rodales entre 7 y 14 años de edad, mientras que el tercer grupo estuvo comprendido con los rodales mayores a 14 años de edad. Se

aplicó análisis de variancia a cada uno de los agrupamientos y, para detectar diferencias significativas entre los grupos en cada uno de ellos, se aplicó el test de Tukey al 95%.

Retraslocación de nutrientes en las plantaciones

Se calculó la retraslocación foliar en las distintas edades de las plantaciones y en cada uno de los agrupamientos edafoclimáticos. La retraslocación se calculó de acuerdo con la metodología corregida por calcio (Vitousek & Sandford, 1986) como se muestra en la expresión 1:

$$\text{Nutriente Re (Ca)} = \left[1 - \left(\frac{\text{CNHC}/\text{CCaHC}}{\text{CNHV}/\text{CCaHV}} \right) \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

CNHV: concentración promedio del respectivo nutriente en las hojas de todos los árboles de una misma edad y un mismo agrupamiento edafoclimático (Ron - Pe - Ros)

CNHC: concentración promedio del respectivo nutriente en las hojas caídas de 3 muestras obtenidas en rodales de similares características a aquellos del apeo de árboles en los que se efectuó el muestreo de hojas vivas, ubicados en las cercanías de los anteriores y con características estructurales similares.

CCaHV: concentración promedio de calcio en las hojas de todos los árboles de una misma edad y un mismo agrupamiento edafoclimático (Ron - Pe - Ros)

CCaHC: concentración promedio de calcio en las hojas caídas de 3 muestras obtenidas en rodales de similares características a aquellos del apeo de árboles en los que se efectuó el muestreo de hojas vivas, ubicados en las cercanías de los anteriores y con características estructurales similares.

El muestreo de hojas caídas se llevó a cabo en los meses invernales, momento de mayor aporte de materia seca al mantillo (Pérez *et al.*, 2006). En cada uno de estos rodales se colectaron tres muestras, cada una de ellas conformadas por hojas de al menos 10 árboles circundantes. Cada una de las muestras mencionadas se obtuvo en grupos de árboles ubicados a una distancia de por lo menos 100 metros uno de otro. Cada muestra se

compuso con hojas desprendidas de los árboles cuyo material se encontraba depositado en la parte superior del piso forestal y, visiblemente recién caídas por su color, textura y posición.

A los efectos de determinar la diferencia de concentración de nutrientes entre hojas vivas y hojas caídas, se efectuó el análisis de variancia contrastando ambas concentraciones, cuyo análisis incluyó a la edad como covariable. Se utilizó el test de Tukey para contrastar concentraciones entre ambos agrupamiento (hojas vivas y hojas caídas), con nivel de significancia del 95%.

Simulación de diferentes escenarios de cosecha para determinar el impacto de la exportación de nutrientes en cada rodal

Se simularon dos escenarios de cosecha para contrastar el efecto de la edad de cosecha sobre el contenido de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn) exportados durante la cosecha. La simulación se efectuó entre rodales de 10 y 20 años de edad. Para simular diferentes escenarios de cosecha se calculó el promedio de nutrientes en tres plantaciones de 20 años de edad establecidas en suelos pedregosos, cuyas densidades individuales fueron 150, 225 y 270 pl.ha⁻¹, las cuales promediaron 215 pl.ha⁻¹. Otro agrupamiento lo constituyeron 3 plantaciones, también sobre suelos pedregosos, con 491, 600 y 740 pl.ha⁻¹, las cuales promediaron 610 pl.ha⁻¹. Las diferencias en densidades del rodal es una situación propia de las plantaciones comerciales, que responde de acuerdo con el manejo y/o los objetivos de producción de cada empresa, por lo que la densidad arbórea es variable. El objetivo de dicho cálculo es relacionar los contenidos de nutrientes exportados a los 10 y 20 años de edad. Luego, se calculó la exportación de nutrientes en cada grupo de plantaciones en los próximos 60 años, en cuyo tiempo se harían 3 rotaciones del grupo de mayor edad y 6 rotaciones para las plantaciones de 10 años de edad. La elección de estos rodales para la comparación del efecto del largo del turno de rotación se debió a que los mismos se encuentran bajo similares condiciones de suelo, cuyas edades en cada una de ellas se cuenta con tres repeticiones y una duplica la otra, lo que permite efectuar los cálculos del impacto nutricional de su cosecha.

De la misma forma y con los mismos rodales descriptos previamente, se simularon los contenidos de nutrientes exportados, simulando la cosecha de los compartimentos de la

copa. De la misma manera, los cálculos se efectuaron con un horizonte de tiempo de 60 años.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Nutrientes acumulados en la biomasa aérea de las plantaciones

El contenido de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn) en el vuelo forestal de las plantaciones de *P. taeda*, respondió con tendencia similar a la tendencia encontrada de acumulación de biomasa (capítulo 3 de esta Tesis). El incremento del contenido de nutrientes se asoció con el aumento de la edad de las plantaciones (Figura 5-1; Figura 5-2; Figura 5-3; Tabla 5-3). Los nutrientes acumulados en los compartimentos aéreos, promedio de los 31 rodales de *P. taeda*, respondió con la siguiente secuencia: C>N>Ca>K>Mg>P>S>Mn>Fe. Respecto de los agrupamientos edafoclimáticos, fue encontrada la misma secuencia para los sitios de suelos rojos, mientras que el agrupamiento de sitios con suelos pedregosos el contenido de Fe fue mayor al contenido de Mn. Los resultados encontrados son coincidentes con lo expresado por Oki (2002), quien manifiesta que la compartimentalización de los nutrientes puede variar de acuerdo con las condiciones del ambiente y el manejo.

El mayor contenido de nutrientes, sumatoria de todos los compartimentos aéreos, fue encontrado en la plantación de 23 años de edad con ocupación total del sitio. De la misma manera el menor valor fue hallado en las plantaciones de 3 años de edad establecidas en sitios con suelos pedregosos (Figura 5-1; Figura 5-2; Figura 5-3).

El Mn en los compartimentos aéreos de las plantaciones de *P. taeda* se diferenció significativamente entre agrupamientos edafoclimáticos en todos los compartimentos (Tabla 5.1). En los compartimentos hojas, corteza y ramas las diferencias se observaron con mayores valores a favor de las plantaciones de los sitios con suelos rojos, mientras que en el compartimento fuste las diferencias se registraron, también, entre ambos agrupamientos (Ron y Ros), con mayores valores de Mn acumulado en las plantaciones de los sitios Ros. El mayor contenido de Mn en los sitios con suelos rojos es producto de la mayor cantidad de biomasa aérea y mayor concentración de Mn en los compartimentos aéreos de los sitios Ron y Ros. A su vez, la mayor concentración de Mn en las hojas coincide con la baja disponibilidad de P en el suelo de los sitios Ron y Ros (Tabla 2-2).

Lambers *et al.*, (2015) indican que en suelos de baja disponibilidad de P las plantas utilizan como estrategia liberar carboxilatos para aumentar la disponibilidad de P en el suelo. Para dicho proceso la planta eleva la concentración de Mn en las hojas, e inclusive podría hacerlo en otros compartimentos del árbol. Además, también señalan que no solo se libera P orgánico e inorgánico del suelo con la liberación de carboxilatos, sino que lo hace con algunos micronutrientes, principalmente Mn en suelos de baja disponibilidad de este elemento. Ambas situaciones se verifican en nuestros datos. Primero, la concentración de Mn fue mayor en todos los compartimentos arbóreos de las plantaciones establecidas en los sitios Ron y Ros respecto del agrupamiento Pe (Tabla 4-5). Por otro lado, las concentraciones de P y Mn mostraron menor concentración en los suelos de los sitios de los agrupamientos Ron y Ros respecto del agrupamiento Pe.

Los elementos P, Mg y Fe, se diferenciaron entre agrupamientos edafoclimáticos en el compartimento fuste con disímiles resultados. El P y Mg solo se diferenciaron entre Ron y Ros, sin diferenciarse ellos de los sitios de suelos pedregosos, mientras que la cantidad de Fe acumulado en el sitio Ros se diferenció de los agrupamientos Ron y Pe.

Tabla 5-1. Valores medios de contenido de nutrientes ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los tres agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros) para cada compartimento arbóreo de *P. taeda*.

Agrupamiento		C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Hojas	Ron	4851 a AB	135.2 a C	8.8 a C	49.6 a C	29.4 a B	8.8 a B	11.9 a C	1.2 a A	4.8 b C
	Pe	3781 a A	105.2 a B	7.4 a B	33.8 a B	27.2 a B	9.4 a B	8.5 a B	0.8 a A	1.0 a B
	Ros	3634 a A	111.6 a B	8.4 a B	40.1 a B	31.5 a AB	10.1 a AB	8.7 a AB	1.1 a A	5.1 b B
Fuste	Ron	41096 a C	123.3 a BC	5.5 a B	41.9 a B	69.9 a B	16.2 a B	11.4 a BC	1.2 a A	4.5 a BC
	Pe	36242 a B	115.6 a B	6.8 a B	43.9 a B	80.5 a B	17.9 a B	11.5 a B	1.4 ab A	1.3 ab B
	Ros	56749 a B	208.2 a B	10.5 a B	61.5 a B	110.2 a B	31.1 a B	15.7 a B	3.9 b A	8.3 b B
Corteza	Ron	3071 a A	28.1 a A	1.4 a A	6.5 a A	11.9 a A	2.4 a A	3.0 a A	1.9 a A	0.3 ab A
	Pe	2954 a A	27.8 a A	1.6 a A	8.7 a A	9.4 a A	2.6 a A	3.0 a A	1.2 a A	0.1 a A
	Ros	5472 a A	43.3 a A	2.2 a A	10.0 a A	18.9 a A	3.8 a A	3.6 a A	3.1 a A	0.7 b A
Ramas	Ron	8186 a BC	48.3 a AB	3.9 a B	25.4 a BC	34.0 a B	7.9 a B	5.1 a AB	1.4 a A	1.8 b B
	Pe	9937 a AB	56.2 a AB	4.9 a B	26.5 a B	42.7 a B	10.5 a B	5.9 a AB	1.3 a A	0.8 a B
	Ros	7968 a AB	52.1 a AB	4.2 a AB	22.4 a AB	31.9 a AB	9.3 a AB	4.3 a AB	1.4 a A	2.3 b AB

Referencias: Letras minúsculas (a y b) diferentes indican diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos para un mismo elemento e igual compartimento arbóreo. Letras mayúsculas (A, B y C) diferentes indican diferencias significativas entre compartimentos arbóreos para un mismo elemento e igual agrupamiento edafoclimático. Ron: agrupamiento de sitios con suelos rojos del norte; Pe: agrupamiento de sitios con suelos pedregosos del norte; Ros: agrupamiento de sitios con suelos rojos del sur; C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso

El total de C almacenado, promedio en las plantaciones mayores a 18 años de edad, acumularon $111 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, mientras el máximo valor de C acumulado lo mostró la plantación adulta con mayor densidad arbórea y presentó $238 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Figura 5-1A). Además, la cantidad de C almacenado en las plantaciones de *P. taeda* es superior a las estimaciones realizadas en la vegetación nativa de la región (Gasparri *et al.*, 2008), coincidente con lo hipotetizado por Gladstone & Ledig (1990), quienes mencionan que las plantaciones de rápido crecimiento pueden almacenar mayor cantidad de carbono que la vegetación nativa. Esta tendencia pone de manifiesto que las plantaciones de rápido crecimiento son una buena estrategia para la captura de carbono atmosférico, siempre y cuando sean considerados, durante el desarrollo de esta plantaciones, otros aspectos de gran importancia como el efecto sobre la biodiversidad, el balance de agua y los suelos,

otros factores ambientales, y las cuestiones sociales. Además, podría aumentar la relevancia si los productos obtenidos de estas plantaciones reemplazan productos provenientes de combustibles fósiles.

La máxima cantidad de C almacenado en el estrato arbóreo ($238 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) se registró en la plantación de 23 años de edad (Tabla 5-3), cuyo rodal no fue intervenido por raleos y mantuvo ocupación plena del sitio, cantidad que duplicó el contenido encontrado en las plantaciones que fueran intervenidas con raleos a lo largo del turno de rotación. Estas diferencias de nutrientes acumulados entre plantaciones con diferentes manejos muestra que el carbono almacenado es dependiente de la densidad del rodal, cuyos resultados son coincidentes con reportes de Böttcher & Lindner (2010), quienes manifiestan que en a mayoría de los casos, las plantaciones sin manejo acumulan mayores cantidades de carbono respecto de aquellas plantaciones con manejo silvicultural. Según Pinazo *et al.* (2007), las características medioambientales de la provincia de Misiones hacen que los mayores rendimientos en coníferas obtenidos en el país se verifiquen en esta región, lo cual pone de manifiesto la importancia en la fijación de carbono de estas plantaciones, las cuales podrían contribuir a la mitigación del cambio climático, lo que debería demostrarse en relación a un análisis del ciclo de carbono en el total del ecosistema de plantación y teniendo en cuenta los cambios en el contenido preexistente de carbono en el ecosistema reemplazado, y otras cuestiones antes mencionadas ligadas a la sustentabilidad. Los resultados presentados solo consideran el compartimento arbóreo que, si bien los rodales de menor densidad arbórea muestran menores valores en el estrato arbóreo, los estratos inferiores podrían mostrar valores disímiles respecto de la acumulación de biomasa como muestran Martiarena *et al.* (2011), lo que indicaría distintas capacidades de acumular carbono en ellos.

Los contenidos de N en los compartimentos aéreos no se diferenciaron entre agrupamientos edafoclimáticos (Ron, Pe y Ros). El N acumulado fue significativamente afectado por la edad de la plantación (Tabla 5-4), cuyos resultados muestran mayor cantidad acumulada con el aumento de la edad. No obstante, el mayor incremento de este elemento en el rodal se registra durante los primeros años de edad de la plantación. A modo de ejemplo puede observarse que el promedio de contenido de N en las 5 plantaciones de mayor edad, cuyo promedio etario supera los 21 años de edad, fue de $584 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, mientras que las 5 plantaciones de 7 años de edad acumularon $240 \text{ Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N. Si bien las plantaciones adultas triplican en promedio la edad a las plantaciones más

jóvenes, puede observarse que solo supera en contenido de nitrógeno acumulado en 2.4 veces. Esto muestra que la mayor demanda de nitrógeno por parte de las plantaciones de *P. taeda* se registra en el primer tercio del ciclo productivo. Estos datos permiten identificar que la edad de la plantación afecta el N acumulado y, el acortamiento del turno de rotación en las plantaciones de *P. taeda* en esta región, podrían causar un mayor impacto nutricional desde el punto de vista de la exportación de N del sitio.

Idéntica comparación entre grupos de plantaciones de 7 y 21 años de edad, muestra que el contenido de P de las plantaciones adultas supera 1.9 veces el contenido de P de las plantaciones de 7 años de edad. Estos resultados podrían indicar mayor eficiencia de uso del P respecto al N en plantaciones adultas, ya que acumula igual cantidad de biomasa con menor proporción de P, en la medida que aumenta la edad.

Se puede observar que a los 5 años de edad y con 1400 pl.ha⁻¹, la plantación del agrupamiento Ron acumuló 27 Kg.ha⁻¹ de P en la biomasa aérea (Figura 5-1C). Este valor es similar a los valores encontrados en plantaciones adultas que recibieron los respectivos raleos y alcanzaron densidades arbóreas cercanas a las 200 pl.ha⁻¹, densidad considerada apta para la producción de madera con fines aserrables para esta región. Estos resultados muestran que la mayor demanda de P por la plantación ocurre durante los primeros 5 años de vida de la misma. Además, el contenido de P que podría demandar la plantación en el período comprendido entre los 5 y 20 años de edad, adicional al existente en los compartimentos aéreos, es el contenido que se podría exportar durante los raleos. Estos resultados muestran la importancia de la conservación de los residuos de las cosechas intermedias para conservar los nutrientes con pronta disponibilidad en el sistema y poder mantener los niveles de productividad.

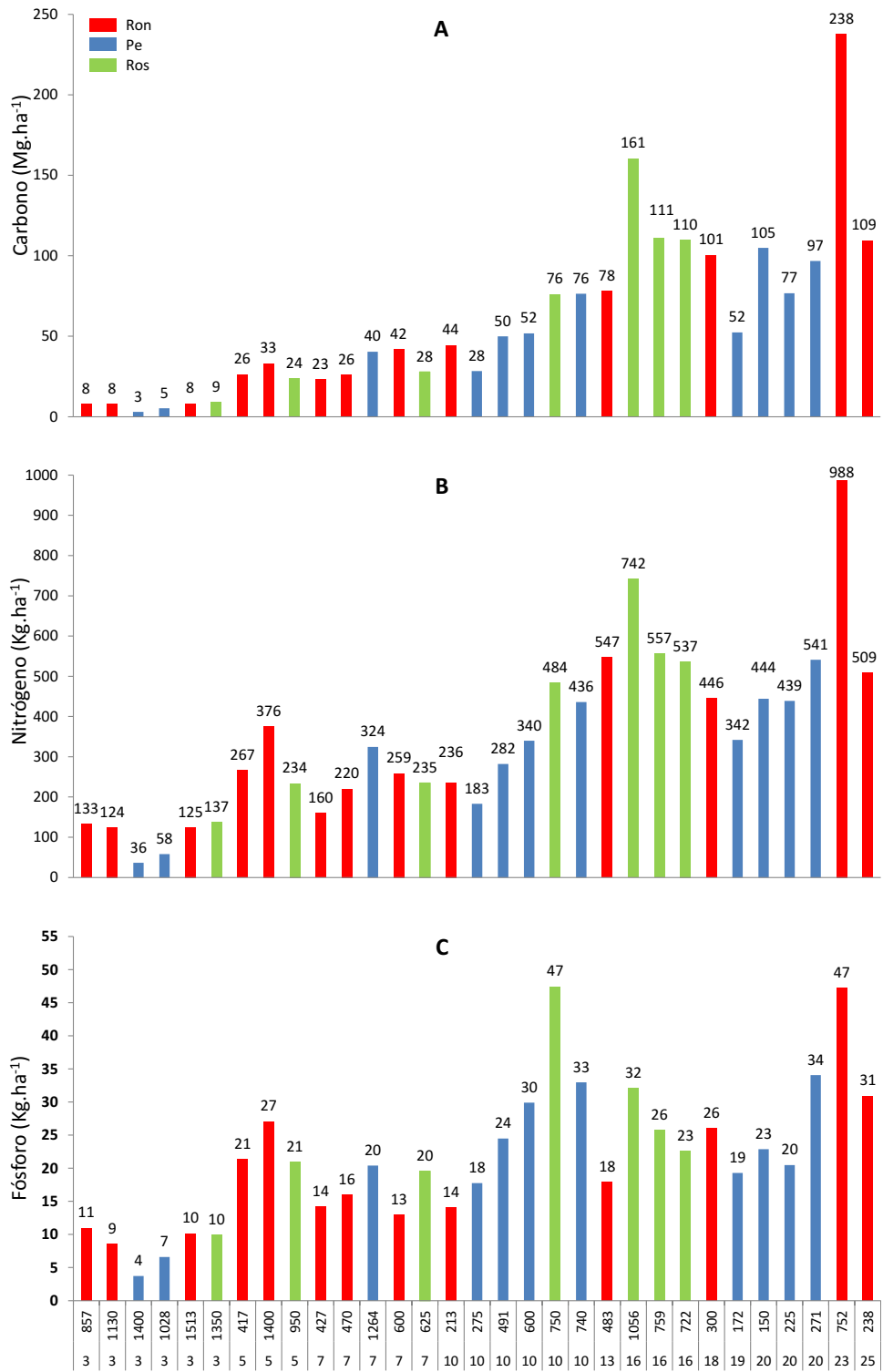


Figura 5-1. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de *Pinus taeda* en función de la edad de la plantación (en años, línea inferior de números en eje x) y la densidad del rodal (en árboles.ha⁻¹, línea superior de números en eje x). A) contenido de carbono, B) contenido de nitrógeno y, C) contenido de fósforo.

El contenido total de K en la biomasa aérea de una plantación de 5 años de edad fue similar al hallado en plantaciones de 20 años de edad, mientras que el Ca y Mg mostraron tendencia disímil, cuyo valor en plantaciones de 20 años duplicó el contenido de las plantaciones de 5 años de edad (Figura 5-2). El K, junto con el P, son considerados elementos carentes en los suelos de nuestra región y de baja disponibilidad en los mismos (Vázquez & Galmarini, 1985; Vázquez & Morales, 2000; Pérez *et al.*, 2006), cuya ausencia podría limitar la productividad de una plantación. Estos datos muestran que la mayor demanda de las plantaciones se realiza en etapas iniciales del crecimiento y que esta información podría ser de utilidad para ajustar el período en que deberían aplicarse los fertilizantes, ya que luego, no solo es menor la cantidad absorbida, sino que también el reciclaje interno provee de nutrientes a la plantación.

Los contenidos de Ca y Mg fueron mayormente afectados por la densidad del rodal, además de la edad (Tabla 5-2). La comparación del contenido de Ca de las 5 plantaciones de mayor edad de este trabajo, cuyo promedio de edad supera los 21 años, respecto de las 5 plantaciones de 7 años de edad, muestra que en promedio las plantaciones adultas acumularon 350 Kg.ha⁻¹, mientras que las plantaciones de 7 años de edad acumularon 97 Kg.ha⁻¹. Las plantaciones adultas triplican la edad de las plantaciones de 7 años, mientras que el contenido de Ca es 3.6 veces superior en las plantaciones adultas, cuyo valor responde con el incremento de la biomasa, ya que en promedio la biomasa aérea total en las plantaciones de 21 respecto de las de 7 años fue 3.8 veces superior.

Los resultados precedentes están indicando que los elementos N, P y K en los compartimentos aéreos son más abundantes en los compartimentos de la copa, principalmente en las hojas. Los contenidos de los elementos citados se estabilizan en los primeros años hasta el cierre del dosel en los compartimentos de la copa, ya que la producción de hojas hasta alcanzar el LAI máximo compatible con el aprovechamiento de la luz disponible es de importancia estratégica para la planta, mientras que el contenido de Ca aumenta durante todo el turno de rotación pues se vincula con la formación de nuevos tejidos leñosos en organismos longevos como resultado de la producción primaria aérea neta. Además, los elementos N y P son elementos muy móviles que se retraslocan por una parte, y que por otra retornan al suelo forestal a través de la caída al mantillo, donde se descomponen y quedan disponibles para los microorganismos del suelo y la plantación; de ésta manera las plantas reutilizan esos elementos en el suelo mediante la absorción y así en conjunto con la retraslocación, suplen los requerimientos de la

plantación. Por el contrario, el Ca no se retrasloca y hay absorción continua de este elemento desde el suelo para suplir las necesidades durante la acumulación de madera en el rodal.

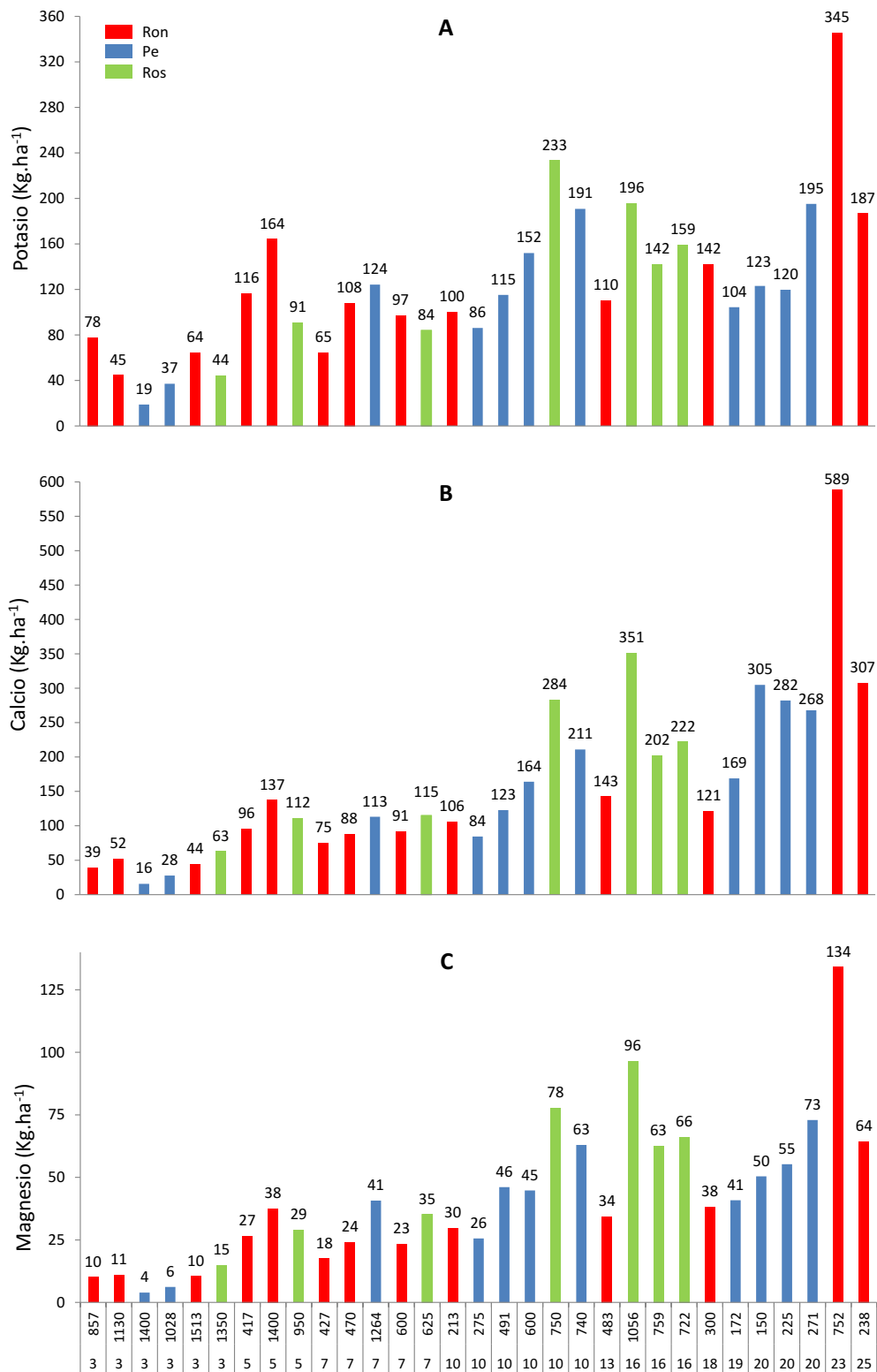


Figura 5-2. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de *Pinus taeda* en función de la edad de la plantación y la densidad del rodal. A) contenido de potasio, B) contenido de calcio y, C) contenido de magnesio.

El contenido de S en la biomasa aérea no fue afectado por las variables ambientales y de manejo (Tabla 5-2). El contenido de Fe acumulado fue significativamente afectado por la densidad arbórea y el IS, con mayor cantidad acumulada en plantaciones de mayor densidad y en los sitios con IS mas elevados (Tabla 5-2). El contenido de Mn en la biomasa aérea fue afectado por las variables P/ETP e IS. El aumento del cociente P/ETP se relacionó inversamente, mientras que el aumento en la calidad de sitio lo hizo positivamente, respecto del Mn acumulado (Tabla 5-2).

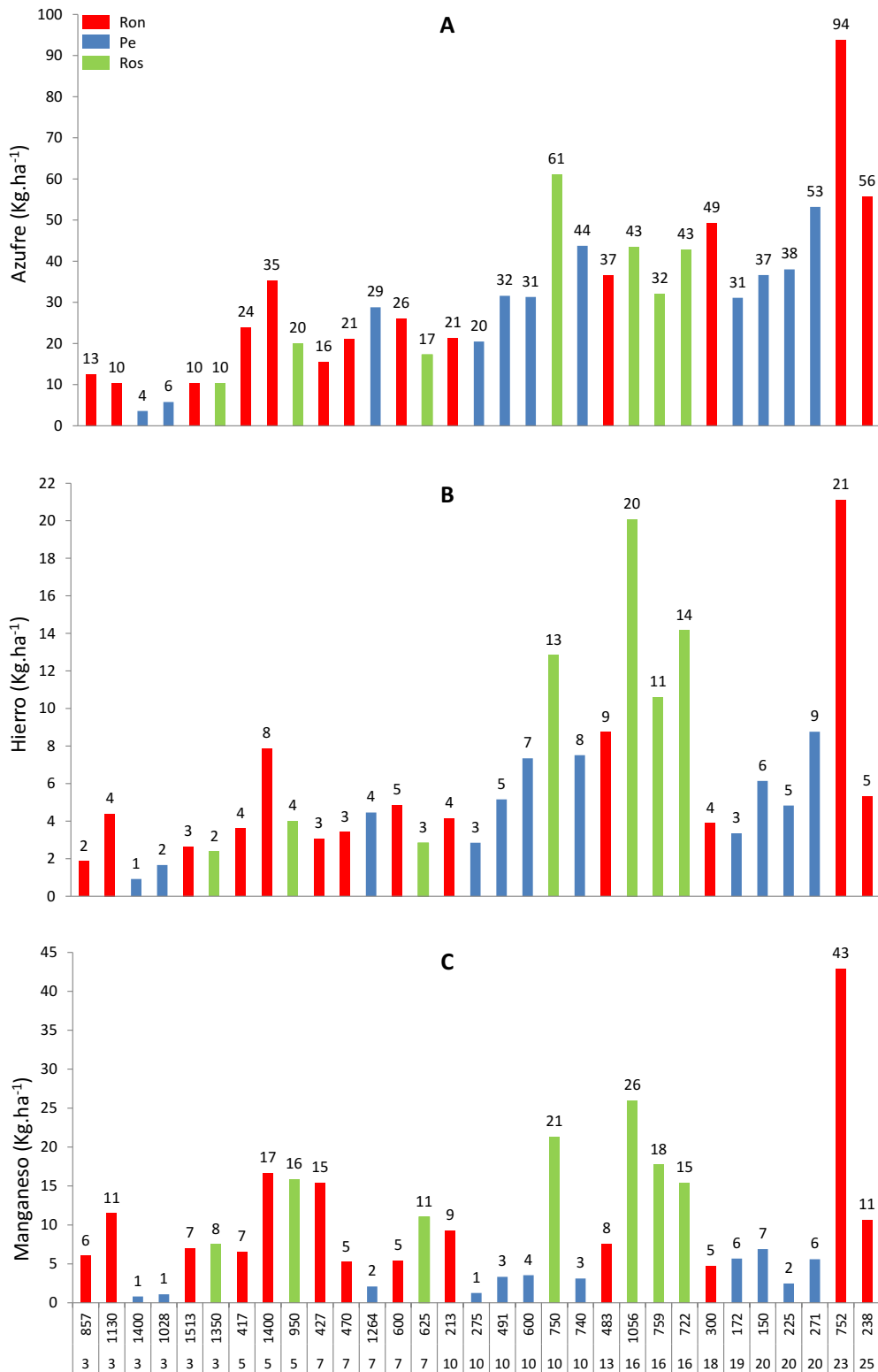


Figura 5-3. Contenido de nutrientes en los compartimentos aéreos de las plantaciones de *Pinus taeda* en función de la edad de la plantación y la densidad del rodal. A) contenido de azufre, B) contenido de hierro y, C) contenido de manganeso.

En la Tabla 5-2 se observan los coeficientes de los 3 modelos lineales para el contenido de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn. Puede observarse que los modelos 1 y 3 incluyen la latitud como variable de ajuste que, si bien la latitud no es un factor ecológico, con ella se busca analizar en qué medida la existencia de tendencias geográficas resulta explicada, o no, por las variables incluidas en el modelo.

Tabla 5-2. Coeficientes de los modelos lineales (Modelo 1: $y = a + b.IS + c.edad + d.densidad + e.latitud + \varepsilon$; Modelo 2: $y = a + b.IS + c.edad + d.densidad + e.P/ETP + \varepsilon$; Modelo 3: $y = a + b.latitud + c.P/ETP + \varepsilon$), ajustados para cada contenido de nutriente en la biomasa aérea de las plantaciones de *P. taeda*.

Variable	Nutrientes									
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn	
Modelo 1	IS	7005.82 (**)	23.61 (**)	0.23 (ns)	5.33 (ns)	6.61 (ns)	1.66 (ns)	1.32 (ns)	0.79 (**)	1.46 (*)
	Edad	7772.44 (**)	30.70 (**)	1.14 (**)	8.13 (**)	18.11 (**)	4.14 (**)	2.58 (**)	0.59 (**)	0.75 (**)
	Densidad	37.40 (**)	16.00 (**)	4.10e ⁻³ (ns)	4.47e ⁻² (ns)	9.42e ⁻² (**)	2.30e ⁻² (**)	1.04e ⁻² (ns)	5.51e ⁻³ (**)	9.02e ⁻³ (**)
	Latitud	2842.66 (ns)	22.39 (ns)	1.91 (ns)	0.77 (ns)	6.04 (ns)	5.83 (ns)	-0.67 (ns)	1.02 (ns)	1.79 (ns)
	R ²	0.82 (**)	0.75 (**)	0.35 (**)	0.45 (**)	0.69 (**)	0.66 (**)	0.62 (**)	0.56 (**)	0.33 (**)
Modelo 2	IS	7353.51 (**)	26.15 (**)	0.45 (ns)	5.58 (ns)	7.48 (ns)	2.30 (ns)	1.28 (ns)	0.90 (**)	1.67 (**)
	Edad	7882.38 (**)	31.19 (**)	1.19 (**)	8.44 (**)	18.58 (**)	4.24 (**)	2.64 (**)	0.61 (**)	0.81 (**)
	Densidad	27.63 (*)	0.11 (*)	-1.14e ⁻⁴ (ns)	1.9e ⁻² (ns)	5.41e ⁻² (ns)	1.35e ⁻² (ns)	5.80e ⁻³ (ns)	4.04e ⁻³ (*)	3.48e ⁻³ (ns)
	P/ETP	-49026.8 (*)	-243.31 (*)	-21.81 (**)	-123.77 (**)	-195.35 (**)	-51.06 (**)	-21.19 (ns)	-7.94 (*)	-27.94 (**)
	R ²	0.84 (**)	0.78 (**)	0.42 (**)	0.53 (**)	0.76 (**)	0.71 (**)	0.64 (**)	0.59 (**)	0.54 (**)
Modelo 3	Latitud	7241.00 (ns)	35.71 (ns)	1.47 (ns)	-0.55 (ns)	5.94 (ns)	6.02 (ns)	-0.21 (ns)	1.27 (ns)	1.26 (ns)
	P/ETP	50944.00 (ns)	162.29 (ns)	-9.25e ⁻³ (ns)	-16.49 (ns)	39.75 (ns)	9.49 (ns)	12.52 (ns)	-1.54 (ns)	-18.10 (*)
	R ²	4.17e ⁻² (ns)	0.04 (ns)	0.06 (ns)	0.07 (ns)	0.07 (ns)	0.04 (ns)	0.06 (ns)	6.71e ⁻³ (ns)	0.12 (*)

Referencias: (**): nivel de probabilidad de significancia <0.01; (*): nivel de probabilidad de significancia >0.01<0.05; (ns): nivel de probabilidad de significancia >0.05. C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; IS: índice de sitio; P/ETP: cociente precipitación evapotranspiración.

Compartimentalización de contenidos de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda*

El contenido de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn en el fuste, aumenta proporcionalmente con el aumento de la biomasa asociado con la edad, disminuyendo en el mismo sentido en los compartimentos de la copa (Tabla 5-3).

La secuencia de cantidad de nutrientes acumulados en las plantaciones de edades jóvenes se observa en el compartimento hojas, seguido por las R<5 cm y posteriormente el fuste (Tabla 5-3). La mayor cantidad absoluta de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn acumulada en el compartimento hojas se observó en un rodal de 5 años de edad con 1400 pl.ha⁻¹ (Tabla 5-3). Como es frecuente en hojas de diversas especies, y en esta misma especie (Caldato, 2011; Sixel, 2012), la proporción de su contenido de Ca y Mg fue baja respecto de otros macronutrientes (Tabla 5-3).

El contenido de Ca en el compartimento ramas < 5 cm se mantuvo prácticamente constante a lo largo de todas las plantaciones, con porcentajes próximos al 30% del total de calcio en la biomasa aérea en la totalidad de plantaciones hasta los 13 años de edad, mostrando también porcentajes similares en algunas plantaciones adultas.

El contenido de Ca en el compartimento ramas secas, promedio de la totalidad de plantaciones, fue del 6% del contenido total en la biomasa aérea, resultado que podría deberse a la permanencia del Ca en los órganos lignificados senescentes.

La cantidad acumulada de Fe en la corteza, en cuyo compartimento la biomasa es inferior respecto de otros compartimentos, resalta el papel de reserva de Fe en el mismo (Tabla 5.1). Por otra parte, el contenido de Fe en el fuste es similar a aquel en otros compartimentos de menor biomasa.

Tabla 5-3. Contenido de nutrientes (C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn) en la biomasa de los compartimentos aéreos de las plantaciones de *P. taeda*.

Rodal	Edad (Años)	N (pl.ha ⁻¹)	Compartimento	Contenido de nutrientes (Kg.ha ⁻¹)								
				C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
1	3	857	Hojas	3221	106.8	8.1	57.9	20.4	5.5	9.2	0.9	4.7
			R < 5	2876	17.8	2.2	115.5	14.3	3.7	2.4	0.5	1.0
			Fuste	1535	4.6	0.4	3.0	2.0	0.6	0.6	0.1	0.2
			Corteza	403	3.3	0.3	1.4	2.5	0.3	0.4	0.3	0.1
2	3	1130	Hojas	3323	98.1	5.9	30.1	32.1	6.9	7.4	2.8	9.3
			R < 5	2792	16.8	2.0	10.6	16.3	3.3	2.1	1.0	1.7
			Fuste	1393	5.7	0.3	2.5	1.7	0.5	0.6	0.1	0.4
			Corteza	388	3.7	0.3	1.4	1.7	0.3	0.4	0.4	0.1
3	3	1400	Hojas	1232	26.0	2.5	11.1	9.7	2.4	2.3	0.5	0.6
			R < 5	528	3.8	0.6	3.8	3.0	0.8	0.5	0.2	0.1
			Fuste	950	4.6	0.5	2.7	2.0	0.6	0.6	0.1	0.1
			Corteza	264	2.0	0.2	1.2	1.0	0.2	0.2	0.2	0.02
4	3	1028	Hojas	1872	38.6	3.7	21.5	16.6	3.5	3.6	1.2	0.8
			R < 5	1124	8.5	1.4	7.9	6.4	1.4	0.9	0.4	0.1
			Fuste	1779	7.9	1.2	5.3	3.5	0.9	1.0	0.1	0.1
			Corteza	424	3.0	0.3	2.3	1.3	0.4	0.3	0.1	0.02
5	3	1513	Hojas	3308	89.8	6.4	40.6	25.2	6.1	7.1	1.4	5.4
			R < 5	2804	23.6	2.7	16.5	14.3	3.1	2.1	0.8	1.2
			Fuste	1701	7.3	0.7	4.8	3.3	0.9	0.8	0.2	0.3
			Corteza	460	3.8	0.4	2.4	1.6	0.3	0.3	0.3	0.1
6	3	1350	Hojas	3510	97.4	6.6	24.6	41.6	9.0	7.6	1.1	5.9
			R < 5	2656	24.7	2.2	11.3	16.1	4.1	1.8	0.7	1.1
			Fuste	2497	12.3	0.8	5.9	4.4	1.4	0.8	0.4	0.5
			Corteza	346	3.1	0.3	2.1	0.9	0.3	0.2	0.1	0.1
7	5	417	Hojas	6462	161.2	11.8	61.2	36.5	10.2	13.4	1.3	4.1
			R < 5	7478	64.2	6.3	40.4	29.5	10.1	6.0	0.9	1.3
			Fuste	10748	28.7	2.5	10.9	21.4	5.2	3.4	0.4	1.0
			Corteza	1535	11.5	0.8	2.8	8.4	1.0	1.0	1.0	0.2
8	5	1400	Hojas	8213	228.6	15.4	93.4	63.0	17.3	19.1	2.4	11.4

			R < 5	8843	69.4	5.5	47.9	41.5	11.2	6.6	2.0	2.5
			R > 5	919	18.1	2.3	1.6	1.5	1.5	1.9	0.1	0.2
			Fuste	13409	43.0	2.9	15.3	24.4	6.2	5.5	2.2	2.4
			Corteza	2008	17.0	1.1	5.9	7.2	1.3	2.1	1.1	0.2
9	5	950	Hojas	4706	125.8	11.4	46.3	49.5	12.1	10.9	1.2	9.0
			R < 5	6442	49.2	4.6	22.4	34.6	8.3	4.0	1.3	3.1
			R > 5	186	0.93	0.1	0.3	0.7	0.2	0.1	0.04	0.1
			Fuste	11075	48.4	3.8	17.6	22.4	6.7	4.2	1.0	3.4
			Corteza	1371	8.9	1.0	3.7	4.4	1.7	0.9	0.5	0.3
10	7	427	Hojas	4350	100.8	8.3	35.8	27.2	6.4	8.7	0.9	8.7
			R < 5	5865	21.0	3.0	16.1	21.7	5.6	3.1	0.9	2.9
			Fuste	11689	29.8	2.1	10.2	21.9	4.9	3.0	0.4	3.6
			Corteza	1360	8.0	0.6	1.9	4.6	0.5	0.7	0.8	0.2
11	7	470	Hojas	4855	125.1	8.3	55.5	27.8	8.0	10.7	0.8	2.7
			R < 5	6567	39.3	4.5	32.1	28.7	8.2	5.0	1.1	1.2
			Fuste	12970	42.4	2.1	14.6	26.2	6.4	3.8	0.7	1.2
			Corteza	1482	12.1	0.9	4.9	5.0	1.4	1.6	0.7	0.1
12	7	1264	Hojas	5400	176.5	11.1	53.6	34.7	15.5	14.1	0.8	1.0
			R < 5	7612	45.0	3.1	20.3	26.6	9.0	3.9	0.6	0.4
			RS	565	2.92	0.1	1.1	2.5	0.5	0.2	0.1	0.04
			Fuste	23696	69.8	4.4	37.5	40.5	12.2	7.8	0.9	0.4
			Corteza	3026	28.3	1.6	11.0	8.8	3.4	2.6	2.0	0.2
13	7	600	Hojas	5329	149.1	7.5	44.5	24.5	8.0	14.5	0.7	2.4
			R < 5	7933	33.0	2.2	18.9	26.1	5.3	3.2	1.3	0.9
			RS	944	4.6	0.2	1.2	4.3	0.5	0.4	0.2	0.1
			Fuste	25130	50.4	2.3	26.1	28.0	7.8	6.0	1.4	1.8
			Corteza	2691	21.8	0.9	6.1	8.6	1.7	2.0	1.3	0.2
14	7	625	Hojas	3979	106.1	10.3	37.8	43.1	15.3	8.6	0.9	6.1
			R < 5	6960	52.0	5.5	22.3	37.2	10.9	3.9	0.9	2.1
			R > 5	193	0.87	0.1	0.3	0.7	0.2	0.1	0.02	0.04
			Fuste	14870	62.4	3.0	19.8	29.3	7.6	3.8	0.5	2.7
			Corteza	1764	13.0	0.7	3.4	4.9	1.2	0.9	0.4	0.2
15	10	213	Hojas	3324	96.9	6.2	32.9	18.2	6.4	7.8	1.0	2.7
			R < 5	6428	14.4	2.2	14.9	24.9	5.8	3.1	1.1	1.7
			Fuste	32385	101.2	4.2	42.9	55.4	15.5	8.3	1.2	4.8

			Corteza	2145	22.1	1.4	7.7	7.2	1.8	2.0	0.9	0.2
16	10	275	Hojas	2697	66.8	5.3	20.6	14.0	5.7	5.8	0.6	0.5
			R < 5	6232	39.5	5.7	29.4	27.4	8.2	5.8	0.9	0.3
			Fuste	17660	61.5	5.5	29.5	36.9	10.0	6.8	0.6	0.3
			Corteza	1751	14.7	1.2	6.4	6.1	1.5	2.1	0.6	0.1
17	10	491	Hojas	3938	107.5	8.0	32.3	21.7	10.0	9.0	0.8	1.1
			R < 5	9462	48.4	34.1	31.2	36.3	12.7	7.6	1.9	0.9
			Fuste	33336	104.1	8.6	42.9	57.6	20.8	12.2	1.2	1.2
			Corteza	3108	21.2	1.4	8.2	7.2	2.3	2.6	1.1	0.1
18	10	600	Hojas	4771	126.1	10.5	47.0	26.0	10.7	9.4	1.2	1.2
			R < 5	10544	78.5	9.2	45.5	50.0	12.9	7.8	2.6	1.0
			Fuste	33170	109.3	7.9	46.8	75.9	18.2	10.9	1.8	1.2
			Corteza	3312	26.0	2.3	12.7	12.2	2.8	3.1	1.8	0.2
19	10	750	Hojas	6364	201.8	14.7	86.4	48.1	16.2	15.4	1.8	9.7
			R < 5	10562	70.7	6.1	35.6	36.2	13.0	6.7	1.4	3.1
			R > 5	5344	16.0	1.5	7.0	18.8	4.5	1.7	0.8	1.4
			Fuste	47833	163.0	23.2	90.9	173.3	40.3	35.2	33.5	6.0
			Corteza	5065	17.3	0.7	4.8	6.6	2.4	1.3	0.1	1.0
20	10	740	Hojas	6247	172.4	13.3	57.5	47.5	17.9	14.4	1.0	1.2
			R < 5	12972	53.0	5.3	32.0	45.8	14.0	6.0	1.2	0.7
			R > 5	635	2.0	0.1	1.0	1.5	0.5	0.2	0.1	0.02
			RS	1239	3.9	0.2	1.5	4.2	0.9	0.4	0.1	0.1
			Fuste	50400	158.5	11.2	80.2	98.8	25.2	18.6	3.7	0.9
			Corteza	4792	44.8	2.7	17.8	13.0	4.4	4.0	1.4	0.2
21	13	483	Hojas	4661	125.7	6.4	34.7	19.7	6.9	12.7	0.9	1.6
			R < 5	8981	39.2	2.4	17.0	33.5	5.7	3.6	2.8	1.1
			RS	1353	9.0	0.3	1.9	9.0	0.8	1.0	0.7	0.2
			Fuste	58518	330.0	6.4	46.8	62.8	16.0	13.8	2.1	4.3
			Corteza	4592	43.3	2.4	9.9	17.7	4.9	5.4	2.2	0.3
22	16	1056	Hojas	2891	106.0	6.2	32.5	18.2	7.6	7.5	1.1	2.4
			R < 5	9879	67.4	4.0	24.6	40.1	10.9	4.4	1.6	2.2
			Fuste	135003	471.8	17.4	119.2	228.4	69.5	24.8	5.0	19.9
			Corteza	12613	94.6	4.4	18.7	64.0	8.1	6.6	12.3	1.5
23	16	759	Hojas	1999	78.0	4.9	22.4	11.3	5.1	5.6	0.6	1.6
			R < 5	4231	28.9	2.0	11.5	12.9	4.3	2.1	0.8	0.9

			R >5	1532	4.6	0.3	2.3	2.7	1.1	0.4	0.1	0.3
			RS	939	5.2	0.3	1.0	3.2	0.7	0.5	0.5	0.3
			Fuste	93670	360.5	13.7	85.8	147.6	44.6	17.2	3.4	13.7
			Corteza	8536	78.9	4.6	18.5	24.6	6.7	6.4	5.2	0.9
24	16	722	Hojas	1992	65.8	4.6	30.3	9.1	5.0	5.6	0.7	1.2
			R < 5	6048	38.9	2.4	17.6	17.3	6.3	4.0	1.2	1.2
			RS	803	5.1	0.2	0.8	3.0	0.7	0.5	0.4	0.2
			Fuste	92297	339.1	11.9	91.6	166.2	47.5	23.7	8.5	11.9
			Corteza	8610	87.2	3.5	19.0	26.6	6.6	8.9	3.3	0.9
25	18	300	Hojas	4160	130.4	8.9	39.5	14.8	7.3	16.2	0.4	0.9
			R < 5	11331	57.9	3.5	20.3	33.9	7.2	5.2	1.0	0.8
			RS	308	1.5	0.1	0.5	1.3	0.2	0.2	0.1	0.04
			Fuste	79976	204.1	11.3	74.9	63.6	19.8	22.6	1.4	2.8
			Corteza	4794	51.8	2.2	6.6	7.5	3.7	5.2	0.9	0.2
26	19	172	Hojas	3269	97.7	6.2	30.4	24.8	8.7	8.0	0.6	1.5
			R < 5	7423	55.6	4.4	25.3	51.4	9.6	5.8	1.1	1.1
			R >5	3916	13.2	0.9	5.0	10.2	2.6	1.4	0.3	0.4
			Fuste	34405	131.9	5.7	33.9	70.3	16.3	11.3	0.6	2.5
			Corteza	2600	28.1	1.5	7.2	11.4	2.6	3.5	0.5	0.1
27	20	150	Hojas	3689	102.0	6.3	26.8	29.9	6.3	7.7	0.9	1.5
			R < 5	9308	55.8	3.8	20.6	51.4	9.8	4.9	1.0	1.2
			R >5	5425	19.3	1.3	7.0	19.0	3.9	2.0	0.3	0.5
			Fuste	81281	223.7	9.2	58.7	190.0	27.6	18.4	2.3	3.5
			Corteza	4737	36.6	1.7	7.8	14.0	2.3	3.1	1.5	0.2
28	20	225	Hojas	3816	107.0	6.5	31.1	31.6	10.7	8.4	0.7	0.6
			R < 5	6804	51.1	2.7	14.9	34.8	6.4	4.0	0.6	0.4
			R >5	6004	22.5	0.9	5.4	11.3	3.2	1.7	0.1	0.2
			RS	1703	9.5	0.3	1.8	8.4	1.2	0.6	0.2	0.1
			Fuste	54130	198.1	7.9	54.5	184.3	29.7	17.8	2.0	1.0
			Corteza	3786	41.8	1.9	9.6	11.3	3.3	4.8	0.9	0.1
29	20	271	Hojas	4662	136.4	8.2	40.3	43.0	12.0	10.9	0.7	1.2
			R < 5	8913	68.3	5.2	26.5	49.5	11.0	7.3	1.3	0.8
			R >5	5366	21.1	1.4	8.3	15.2	4.2	2.5	0.4	0.3
			RS	3534	15.7	0.7	3.5	15.0	2.2	1.4	0.5	0.3
			Fuste	67855	201.6	12.6	90.7	126.0	35.3	21.4	2.5	2.5

			Corteza	4687	59.8	2.6	11.6	17.6	5.0	6.9	3.1	0.3
			Hojas	6993	220.3	13.6	69.4	44.4	16.8	17.8	1.4	6.6
			R < 5	13603	101.5	5.6	36.8	62.6	14.5	9.6	1.5	3.8
			R > 5	4820	20.7	0.8	6.9	12.3	3.2	1.7	0.2	1.0
			RS	1101	5.9	0.2	1.8	5.1	0.9	0.4	0.1	0.3
			Fuste	197422	514.1	22.0	202.0	400.3	88.1	51.4	3.7	29.4
			Corteza	13167	116.3	4.4	24.9	63.5	9.8	12.1	13.7	1.9
			Hojas	4867	125.5	7.7	48.7	28.7	8.4	10.6	0.8	2.0
			R < 5	5538	48.4	3.4	20.9	43.2	7.6	5.6	1.2	1.1
			R > 5	5935	21.1	1.3	8.1	17.3	4.6	2.8	0.2	0.7
			Fuste	87366	241.3	14.5	90.1	197.8	38.6	29.0	1.6	6.4
			Corteza	4893	50.3	2.2	8.2	19.4	3.6	6.2	1.4	0.3

Referencias: Rodal: número de rodal (véase características estructurales en la (Tabla 2.1); R < 5: ramas menores a 5 cm; R > 5: ramas mayores a 5 cm. RS: ramas secas. La ausencia de compartimentos arbóreos en algunos rodales respecto de los 7 totales, se debe a inexistencia de biomasa en dicho rodal de ese compartimento C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso.

El contenido de Zn en las hojas de 14 rodales de *P. taeda* -distribuidos 5, 4 y 5 rodales respectivamente en Ron, Pe y Ros-, no mostró un patrón definido de acuerdo con la edad y la densidad de la plantación (Figura 5-4). El análisis de variancia del contenido de Zn acumulado en el compartimento hojas, no mostró diferencias significativas entre agrupamientos edafoclimáticos ($P>0.05$), resultados que se corresponden con el contenido de este elemento en el suelo. Si bien la concentración de Zn en el suelo fue superior en los suelos de los sitios Pe (Tabla 2.2), el contenido de Zn hasta los 60 cm de suelo muestra similitud entre agrupamientos edafoclimáticos. Estos resultados estarían indicando que independientemente del tipo de suelo sobre el que se plante el *P. taeda*, el Zn no sería un problema nutricional para la especie.

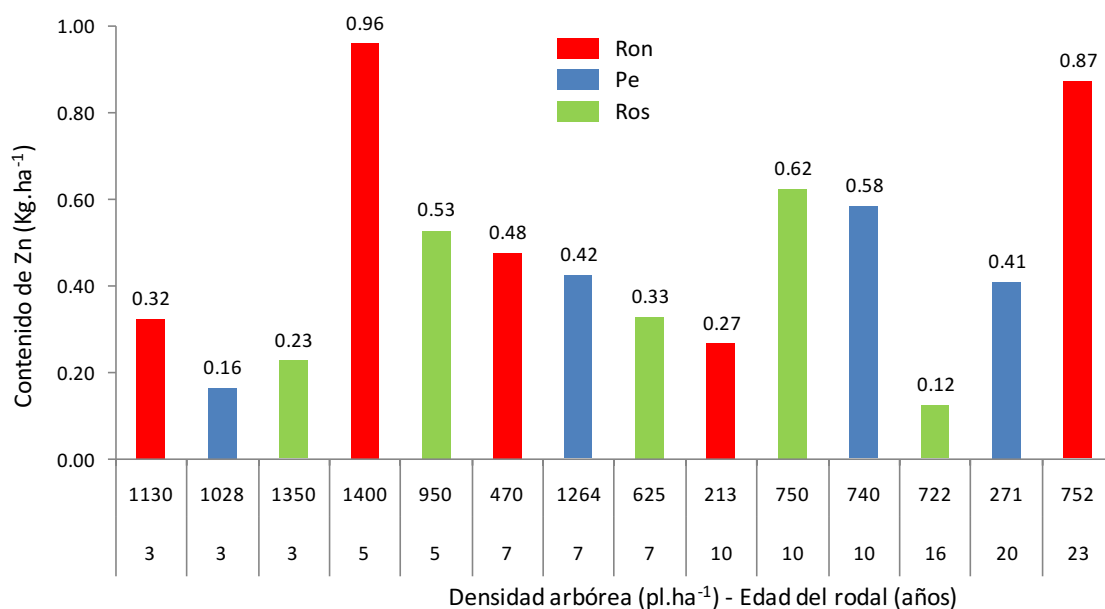


Figura 5-4. Contenido de cinc en el compartimento hojas de 14 rodales de *Pinus taeda* en función de la edad de la plantación (línea inferior en eje x) y la densidad del rodal (línea superior en eje x).

Tabla 5-4. Contenido de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn y desvíos estándar en cada compartimento arbóreo de los agrupamientos edafoclimáticos Ron, Pe y Ros. Las unidades muestrales (véase Tabla 4-1), proceden de 233 árboles de 31 plantaciones de *P. taeda* de las provincias de Misiones y Corrientes.

Compartimento	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
	----- (%) -----		----- (mg.g ⁻¹) -----						
Agrupamiento edafoclimático Ron									
Acículas	4851.3 (1559.4) b	135.2 (44.8) d	8.8 (3.0) d	49.6 (17.9) d	29.4 (12.8) c	8.8 (3.9) c	11.9 (4.0) d	1.2 (0.7) b	4.8 (3.3) c
Fuste	41095.7 (55348.4) b	123.3 (156.5) cd	5.5 (6.6) c	41.9 (55.7) c	69.9 (111.8) c	16.2 (24.0) c	11.4 (14.9) c	1.2 (1.0) b	4.5 (7.7) bc
Corteza	3070.5 (3435.3) b	28.1 (31.6) b	1.4 (1.2) b	6.5 (6.2) b	11.9 (16.4) b	2.4 (2.7) b	3.0 (3.4) b	1.9 (3.6) b	0.3 (0.5) a
Ramas < 5 cm	7002.9 (3253.7) b	42.0 (25.7) bc	3.5 (1.5) c	23.7 (11.6) c	30.1 (13.5) c	7.0 (3.3) c	4.4 (2.2) bc	1.2 (0.6) b	1.6 (0.9) b
Ramas > 5 cm	898.0 (2017.0) a	4.6 (8.8) a	0.3 (0.7) a	1.3 (2.8) a	2.4 (5.6) a	0.7 (1.5) a	0.5 (1.0) a	0.0 (0.1) a	0.1 (0.3) a
Ramas Secas	285.1 (497.8) a	1.6 (3.0) a	0.1 (0.1) a	0.4 (0.7) a	1.5 (2.8) a	0.2 (0.3) a	0.2 (0.3) a	0.1 (0.2) a	0.1 (0.1) a
Agrupamiento edafoclimático Pe									
Acículas	3781 (1486) b	105.2 (48.2) c	7.4 (3.2) d	33.8 (14.4) c	27.2 (11.7) c	9.4 (4.8) c	8.5 (3.8) cd	0.8 (0.2) b	1.0 (0.3) b
Fuste	36242 (25506) b	115.6 (75.6) c	6.8 (3.8) cd	43.9 (27.2) c	80.5 (64.3) c	17.9 (11.3) c	11.5 (7.1) d	1.4 (1.1) b	1.3 (1.1) b
Corteza	2954 (1601) b	27.8 (17.6) b	1.6 (0.8) b	8.7 (4.7) c	9.4 (5.2) b	2.6 (1.5) b	3.0 (1.9) b	1.2 (0.9) b	0.1 (0.1) a
Ramas < 5 cm	7357 (3735) b	46.1 (22.5) bc	4.4 (2.4) c	23.4 (11.8) b	34.8 (17.5) c	8.7 (4.4) c	5.0 (2.5) bc	1.1 (0.7) b	0.7 (0.4) b

Ramas > 5 cm	1940 (2619) a	7.1 (9.7) a	0.4 (0.6) a	2.4 (3.3) a	5.2 (7.3) a	1.3 (1.8) ab	0.7 (1.0) a	0.1 (0.2) a	0.1 (0.2) a
Ramas Secas	640 (1129) a	2.9 (5.2) a	0.1 (0.2) a	0.7 (1.2) a	2.7 (4.9) a	0.4 (0.7) a	0.2 (0.4) a	0.1 (0.1) a	0.0 (0.1) a

Agrupamiento edafoclimático Ros

Acículas	3634 (1563) b	111.6 (44.4) c	8.4 (3.8) c	40.1 (21.9) c	31.5 (17.9) bc	10.1 (4.6) cd	8.7 (3.5) c	1.1 (0.4) ab	5.1 (3.5) cd
Fuste	56749 (51012) b	208.2 (181.2) c	10.5 (8.3) c	61.5 (45.5) c	110.2 (89.4) c	31.1 (26.0) d	15.7 (13.1) c	3.9 (3.6) b	8.3 (7.0) d
Corteza	5472 (4605) b	43.3 (41.3) b	2.2 (1.9) b	10.0 (8.2) b	18.9 (22.4) b	3.8 (3.2) bc	3.6 (3.6) b	3.1 (4.5) b	0.7 (0.5) ab
Ramas < 5 cm	6682 (2829) b	47.4 (17.8) bc	3.8 (1.7) bc	20.8 (8.4) bc	27.8 (11.7) bc	8.3 (3.5) cd	3.8 (1.6) bc	1.1 (0.3) ab	2.0 (0.9) bc
Ramas > 5 cm	1037 (1977) a	3.2 (5.9) a	0.3 (0.5) a	1.4 (2.6) a	3.3 (6.9) a	0.8 (1.7) ab	0.3 (0.6) a	0.1 (0.3) a	0.3 (0.5) a
Ramas Secas	249 (427) a	1.5 (2.5) a	0.1 (0.1) a	0.3 (0.4) a	0.9 (1.5) a	0.2 (0.3) a	0.1 (0.2) a	0.1 (0.2) a	0.1 (0.1) a

Referencias: Letras diferentes indican diferencias significativas entre compartimentos arbóreos de un mismo elemento. Valores entre paréntesis desvíos estándar. C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso.

Eficiencia de uso de los nutrientes e impacto de la cosecha

Se observa para los 31 rodales estudiados que el Índice de Exportación (IE), en líneas generales y para la mayoría de los nutrientes, fue superior en las plantaciones adultas respecto de las plantaciones jóvenes (Tabla 5-5 y Tabla 5-6). El cálculo realizado para el IE en la presente Tesis, también ha sido llamado índice de utilización biológica. De la misma manera, el cálculo de la inversa de este índice indicaría la cantidad de nutrientes empleado por la plantación para producir determinada cantidad de biomasa, lo que no cambiaría la interpretación de dichos resultados.

Tabla 5-5. Índice de exportación de nutrientes para los contenidos de C, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn, en la biomasa de los compartimentos aéreos de las plantaciones de *P. taeda*.

Rodal			Índice de exportación de nutrientes								
Suelo	Edad	Dens.	Mg. Mg ⁻¹ ----- Mg madera.Kg ⁻¹ nutriente -----								
			C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Ron	3	857	1.83	0.45	5.3	0.80	0.8	4.0	3.56	7.9	11.2
Ron	3	1130	1.83	0.35	5.1	0.85	0.9	4.2	3.30	5.7	6.8
Pe	3	1400	1.79	0.33	3.2	0.55	0.7	2.9	2.83	8.4	23.7
Pe	3	1028	1.78	0.36	2.6	0.52	0.8	3.1	2.97	31.7	33.3
Ron	3	1513	1.79	0.35	3.6	0.54	0.8	3.1	3.63	7.6	9.3
Ros	3	1350	1.82	0.34	4.5	0.65	1.0	3.0	4.85	10.0	9.1
Ron	5	417	1.78	0.54	6.7	1.59	0.7	3.6	4.95	15.6	19.5
Ron	5	1400	1.77	0.46	6.9	1.29	0.9	3.6	3.61	8.3	10.5
Ros	5	950	1.82	0.39	4.6	1.06	0.8	2.7	4.42	15.4	6.1
Ron	7	427	1.81	0.63	8.6	1.95	0.9	4.3	6.37	18.9	6.2
Ron	7	470	1.81	0.48	8.7	1.34	0.8	3.4	4.92	18.0	20.0
Pe	7	1264	1.83	0.50	8.2	1.01	1.0	3.1	4.69	16.7	82.3
Ron	7	600	1.82	0.70	15.7	1.56	1.4	5.3	6.35	19.2	25.0
Ros	7	625	1.82	0.40	8.1	1.30	0.9	3.4	6.48	31.0	10.5
Ron	10	213	1.83	0.51	11.3	1.25	1.0	3.7	6.13	30.3	12.8
Pe	10	275	1.83	0.46	5.3	0.99	0.8	3.1	4.00	27.4	92.0
Pe	10	491	1.83	0.53	6.7	1.31	1.0	2.9	4.49	28.2	50.0
Pe	10	600	1.86	0.50	6.6	1.14	0.8	3.2	4.83	18.8	48.8
Ros	10	750	1.79	0.53	4.0	0.99	0.5	2.2	2.60	10.9	13.5
Pe	10	740	1.84	0.50	7.3	1.04	0.9	3.4	4.49	19.8	92.4
Ron	13	483	1.82	0.31	13.1	2.02	1.4	5.5	5.96	26.4	25.0
Ros	16	1056	1.83	0.48	12.4	1.96	0.9	3.5	8.60	15.6	12.6
Ros	16	759	1.83	0.43	10.2	1.79	1.1	3.6	7.94	21.7	12.8
Ros	16	722	1.83	0.43	12.0	1.67	1.0	3.4	5.66	15.7	14.5
Ron	18	300	1.77	0.59	11.1	1.84	2.1	6.4	5.39	63.8	50.0
Pe	19	172	1.82	0.42	9.5	1.64	0.8	3.6	4.56	59.5	25.4
Pe	20	150	1.42	0.47	11.1	1.83	0.6	4.1	5.65	32.4	33.3
Pe	20	225	1.83	0.44	10.8	1.65	0.5	3.2	4.66	37.2	94.1
Pe	20	271	1.85	0.51	8.9	1.31	0.9	3.3	4.74	24.0	47.1
Ron	23	752	1.85	0.62	14.8	1.72	0.8	4.0	6.15	22.4	12.5
Ron	25	238	1.84	0.58	10.2	1.72	0.8	4.0	4.83	56.5	25.3
CV			4.2	20.1	41.6	34.3	31.6	23.3	28.0	63.0	89.2

Referencias: Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte; Ros: Suelos rojos del sur; Dens.: Densidad del rodal (pl.ha⁻¹); C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso;

Respecto del agrupamiento etario, el análisis de variancia detectó diferencias significativas para el IE calculado para los nutrientes P, K, Fe y Mn. El IE de P, K y Fe, fue superior en el agrupamiento de mayor edad (plantaciones mayores a 14 años de edad), mientras que el IE para Mn lo hizo en la edad intermedia (Tabla 5-6). El mayor valor del IE indica que las plantaciones de mayor edad son más conservadoras del ambiente respecto de la exportación de P, K y Fe, mientras que las de edades intermedias lo son en

el uso de Mn, ya que producen mayor cantidad de biomasa con la misma cantidad de nutrientes exportados en dicha biomasa.

En cuanto al agrupamiento edafoclimático, el P, K, Mg, S y Mn mostraron diferencias significativas en el IE. El agrupamiento Ron fue el más conservador en el uso de P, K, y Mg, mientras que las plantaciones de Ros fueron más conservadoras en el uso del S y las plantaciones del agrupamiento Pe en el uso del Mn (Tabla 5-6).

El análisis de regresión simple, para la variable densidad del rodal respecto de los IE, mostró asociación significativa ($P < 0.05$) para los IE de los elementos N, P, K y Fe, cuya asociación indicó que en la medida que aumenta la densidad del rodal disminuye el IE. Estos resultados podría ser de interés para quienes forestan con objetivos de obtención de madera para pasta celulósica, ya que el manejo de dichas plantaciones requieren altas densidades arbóreas, lo que provocaría mayor impacto nutricional sobre el sistema forestal.

Tabla 5-6. Índice de exportación de nutrientes (Mg biomasa. Kg nutriente⁻¹) para la cosecha de fuste con corteza en plantaciones de *P. taeda* en función del rango de edad de la plantación y el agrupamiento edafoclimático.

		Índice de exportación de nutrientes								
		C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
Rangos etarios	1	1.81	0.45	6.56	1.29	0.89	3.55	10.56	15.31	19.54
		a	a	a	a	a	a	a	a	a
	2	1.83	0.48	7.76	1.51	0.91	3.43	9.50	23.11	47.79
		a	a	a	a	a	a	a	ab	b
	3	1.79	0.50	11.1	2.08	0.95	3.91	11.45	34.88	32.76
		a	a	b	b	a	a	a	b	ab
Agrupamientos edafoclimáticos	Ron	1.81	0.51	9.63	1.45	1.03	4.27	5.08	24.33	18.46
		a	a	b	b	a	b	ab	a	a
	Pe	1.79	0.45	6.84	1.09	0.79	3.21	4.24	25.91	55.93
		a	a	a	a	a	a	a	a	b
	Ros	1.82	0.43	8.10	1.37	0.89	3.13	5.82	17.67	11.48
		a	a	a	a	a	a	b	a	a

Referencias: C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte; Ros: Suelos rojos del sur. Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas del índice de exportación de nutrientes entre rangos etarios (parte superior de la tabla) o agrupamientos edafoclimáticos (parte inferior de la tabla).

Con los resultados observados en la Tabla 5-6, principalmente teniendo en cuenta los elementos considerados carentes en los suelos de la región de estudio como lo son P y K (Vázquez & Galmarini, 1985; Vázquez & Morales, 2000; Pérez *et al.*, 2006), se pueden concluir dos cuestiones: 1- *Pinus taeda* aumenta la conservación en el uso del P y K en forma significativa con la edad (*ca.* 65 %) y en los suelos profundos antiguos, 2- La consecuencia forestal práctica es que la cosecha forestal en edades tempranas produce mayor impacto nutricional al sitio particularmente de aquellos más críticos como el P.

Si bien el crecimiento y las concentraciones de nutrientes, en líneas generales fueron superiores en los sitios Ros, la mayor eficiencia en el uso de los nutrientes la mostraron las plantaciones de los sitios Ron, principalmente P, K y Mg.

Retraslocación

Las concentraciones de C, N, P, K y S, fueron significativamente inferiores en las hojas caídas respecto de las hojas vivas, en los tres agrupamientos edafoclimáticos, mientras que las concentraciones de Mg y Mn no mostraron diferencias de concentración entre hojas vivas y caídas (Tabla 5-7).

Tabla 5-7. Concentración de C y N (%) y P, K, Ca, Mg, S, Fe y Mn (g.mg⁻¹) en hojas vivas y hojas caídas de *P. taeda* en función del agrupamiento edafoclimático.

Nutriente	Agrupamiento edafoclimático					
	Ron		Pe		Ros	
	Viva	Caída	Hojas Viva	Caída	Viva	Caída
C	57.3 b	55.2 a	56.96 b	54.91 a	56.54 b	54.82 a
N	1.62 b	0.7 a	1.57 b	0.58 a	1.73 b	0.59 a
P	1.01 b	0.34 a	1.13 b	0.25 a	1.31 b	0.29 a
K	4.61 b	2.05 a	4.41 b	0.68 a	5.12 b	1.39 a
Ca	3.22 a	5.02 b	4.30 a	5.91 b	4.87 a	4.98 a
Mg	1.02 a	1.05 a	1.40 a	1.37 a	1.56 a	1.41 a
S	1.42 b	0.56 a	1.30 b	0.49 a	1.36 b	0.40 a
Fe	0.13 a	0.37 a	0.15 a	0.28 b	0.17 a	0.23 a
Mn	0.48 a	0.55 a	0.18 a	0.42 a	0.78 a	0.91 a

Referencias: Ron: Suelos rojos del norte; Pe: Suelos pedregosos del norte; Ros: Suelos rojos del sur; C: carbono; N: nitrógeno; P: fósforo; K: potasio; Ca: calcio; Mg: magnesio; S: azufre; Fe: hierro; Mn: manganeso; Letras diferentes indican diferencias estadísticas significativas en la concentración de nutrientes entre hojas vivas y caídas del mismo agrupamiento.

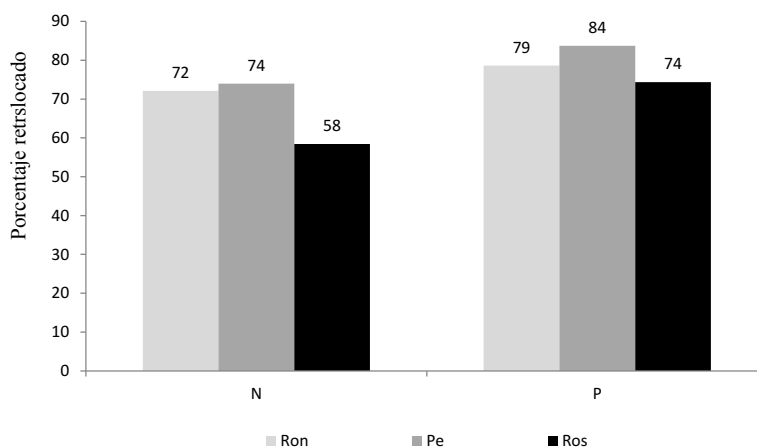
Lo resultados analíticos, reflejan hechos ampliamente demostrados acerca de la capacidad de movilizarse de diferentes nutrientes por vía floemática integrando moléculas de bajo peso (N, P, S, K, C), y la muy baja movilidad e inmovilidad de otros (Ca, Mg, Mn, Fe).

La mayor concentración de Ca en las hojas caídas es consecuencia de la nula movilización de este elemento por ser constituyente de las paredes celulares. Además, la concentración determinada en las hojas caídas es una concentración relativa. Esto se explica mediante que la determinación analítica se efectúa sobre masa seca y no sobre el área inicial de la hoja, lo cual arroja un resultado cuyo valor de concentración es relativo a la composición de la unidad de masa remanente, lo que la concentración determinada sobre hojas caídas muestre valores superiores respecto de hojas vivas.

La retraslocación de las plantaciones estudiadas muestra dos aspectos sustanciales. El primero es que el P es retraslocado en mayor proporción que el N en todos los ámbitos edafoclimáticos estudiados en el NEA. La segunda cuestión es que la retraslocación es

menor en los suelos con mayor disponibilidad de nutrientes (Pe) y similar entre los suelos rojo profundos.

Figura 5-5. Porcentajes retraslocados de N y P en hojas de *P. taeda* de 3 a 25 años de edad en los diferentes agrupamientos edafoclimáticos.



Escenarios de cosecha

Tabla 5-8. Simulación del contenido de nutrientes ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) exportados durante la cosecha en plantaciones de *P. taeda* de 10 y 20 años respectivamente.

Edad (años)	Contenido promedio de nutrientes exportados por cosecha ($\text{Kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)								
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Mn
10	4.27×10^4	155	11	69	88	25	17	3.7	1.3
20	7.22×10^4	254	12	78	181	34	24	4.1	2.5
Relación (20 / 10)	Relación de contenidos de nutrientes exportados								
	1.69	1.64	1.05	1.12	2.05	1.40	1.41	1.10	2.00

Puede observarse en la Tabla 5-8 que, a excepción de Ca y Mn que casi aumentaron en forma directamente proporcional a la cosecha, los restantes muestran que la cosecha de fuste con su corteza a los 10 años de edad impacta nutricionalmente al sitio en mayor medida que lo que lo hace la cosecha a los 20 años de edad. Los porcentuales promedio de nutrientes exportados respecto de los que quedan en el sitio (compartimentos de la

copa del árbol), son 46 y 55 % respectivamente en las plantaciones de 10 y 20 años de edad.

Si se cosecha en turnos de 20 años, la exportación de nutrientes con la cosecha respecto de aquella en turnos de 10 años muestra que la proporción de cada nutriente que es conservada en el terreno decrece en el siguiente orden: P>Fe>K>Mg>S>N>C>Mn>Ca. Se destaca que se conservan en el ecosistema de plantación, principalmente, los dos macronutrientes más críticos: P y K.

Hay dos cuestiones contrapuestas que emergen de los resultados anteriores. Si se calcula un tiempo total de 100 años de cultivo, en un caso con turnos de 10 años y en otro con turnos de 20 años, al final del periodo total de cultivo se verificará que se acumulará más C (y por ende biomasa) en fustes con corteza en el manejo de turnos cortos que en el de los turnos largos. Para aquellas empresas cuyo objetivo es obtener materia prima para abastecer fábricas celulósicas, los resultados de las plantaciones aquí consideradas que no fueron manejadas con tal fin, pueden alentar a efectuar cosechas cortas, siempre y cuando el factor financiero sea favorable. Sin embargo, si se considera el aspecto ambiental, que no deja de tener componentes económicos, muestra que el impacto en términos de pérdida de fertilidad de suelos es muy superior y acumulativo cuando se consideran turnos cortos debido a las mayores pérdidas nutricias con la cosecha como a la mayor intervención en el terreno durante el doble de los ciclos de cultivo; más aún, es posible que en el largo plazo las pérdidas en el crecimiento sean mayores en el caso de empleo de turnos más cortos debido al mayor desmejoramiento de las condiciones físico-químicas de los suelos. Tal caso exigirá la reposición de los nutrientes mediante fertilización para mantener la capacidad productiva original del sitio.

Turnos largos, buen manejo del rodal y de las operaciones de preparación del terreno hasta la cosecha, correcta selección de la fracción cosechada de manera de minimizar la exportación innecesaria de nutrientes, adecuado manejo de los residuos conservándolos en el sitio y, si es posible mejorando su incorporación al suelo y su descomposición, manejo del sotobosque que contribuye a la mejora físico-química del suelo, además de las tareas propias para mejorar la calidad de la madera a lo largo del turno, mejorarán los beneficios económicos y ambientales y reducirán los subsidios externos.

Comparación de nutrientes acumulados en plantaciones del presente estudio respecto de otras plantaciones

El incremento en el contenido de nutrientes con el aumento de la edad, es una tendencia que responde al incremento de la biomasa en el compartimento fuste en las plantaciones, tendencia coincidente con varios reportes en otras latitudes y diversas especies forestales (Johnsen *et al.*, 2004; Sette *et al.*, 2006). Varias investigaciones (Oki, 2002; Goya *et al.*, 2003; Rodríguez, 2004; Witschoreck, 2008; Caldato, 2011; Sixel 2012; Schumacher *et al.*, 2013; Lopes, 2013), reportan similares tendencias de nutrientes acumulados (C>N>Ca>K>Mg>P>S>Mn>Fe) en plantaciones de *P. taeda*. No obstante, la investigación realizada por Voigtlander (2007) en plantaciones de *P. taeda* de 4 y 8 años de edad muestra que el contenido de K en la biomasa aérea es superior al contenido de calcio. Este cambio de tendencia podría ser atribuible a la movilidad que presenta el K en las plantas (Malavolta, 1980).

Los 111 Mg.ha⁻¹ de C, acumulados en las plantaciones mayores a 18 años de edad, fue similar a la cantidad encontrada en el Norte de la provincia de Misiones para plantaciones de la misma edad con similar densidad arbórea y condiciones edafoclimáticas (Pinazo *et al.*, 2007). La cantidad de carbono acumulada en los diferentes rodales (Figura 5-1), también fue similar a la cantidad encontrada en otras latitudes. Watzlawick *et al.* (2013) realizaron un estudio en el Estado de Paraná, Brasil, bajo condiciones edafoclimáticas semejantes y cuantificaron el contenido de carbono en la biomasa aérea de 7 plantaciones adultas de *P. taeda*. Ellos encontraron que en un rodal con 200 plantas acumuló en su biomasa aérea 107 Mg.ha⁻¹ de C, similar a los 109 Mg.ha⁻¹, encontrados en el presente trabajo para el rodal de 25 años de edad (Figura 5-1). La mayor cantidad de C almacenado en la biomasa aérea de las plantaciones estudiadas en esta Tesis se registró en el rodal de 23 años de edad, cuyo rodal no fue intervenido por raleos y mantuvo ocupación plena del sitio, el cual registró 238 Mg.ha⁻¹. Este valor es algo superior a 2 veces de la cantidad promedio acumulada por las plantaciones adultas, cuyo registro manifiesta que la cantidad de C almacenado es dependiente de la densidad del rodal, resultados coincidentes con la tendencia encontrada por Watzlawick *et al.* (2013). Por otro lado, el C acumulado en las plantaciones de *P. taeda* en Misiones, con ocupación plena del sitio, es superior respecto de varios reportes de diferentes especies del género *Pinus* en otras latitudes (Laclau, 2003; Merino *et al.*, 2003).

Al comparar los contenidos de N, P, K, Ca y Mg, ante diferentes situaciones edafoclimáticas, en general, se presenta una similar tendencia entre ellos respecto de los resultados encontrados en la presente tesis. El contenido de N y Mg en la presente Tesis muestra valores similares a los reportes de otras investigaciones, mientras que los contenidos de P y K reportan valores superiores a los resultados de la presente Tesis. El contenido de Calcio no mostró un patrón definido.

López (2013) trabajó con una plantación de 18 años de edad y 701 pl.ha⁻¹ en la región Nordeste de Río Grande Do Sul, Brasil. La temperatura media anual de la región es de 14.6° C, precipitaciones de 2100 mm anuales y suelos de origen basáltico con 40 cm de profundidad efectiva, condiciones edáficas similares a los suelos de los agrupamientos Pe en esta Tesis. Los resultados allí reportados muestran que la biomasa cuantificada fue 0.2 veces mayor respecto del valor medio de las plantaciones adultas de los sitios Pe en la presente Tesis, mientras que el contenido de N, P, K, Ca y Mg, difiere en -4, 64, 28, -31, 1 % respectivamente para N, P, K, Ca y Mg, (signos negativos indican mayor cantidad de nutrientes acumulados en la presente Tesis). Si bien la biomasa fue mayor, los contenidos proporcionales de P y K fueron menores en la misma comparación, ya que las concentraciones de P en los compartimentos fueron similares entre ambas investigaciones. Si bien en la mencionada investigación no se calcula el IE, el valor que se desprende a partir del valor de biomasa de fuste y corteza y, el contenido de los respectivos nutrientes, muestra valores inferiores a los encontrados en la presente Tesis, a excepción de N.

También Schumacher *et al.* (2013) cuantificaron el contenido de nutrientes en una plantación de *P. taeda* de 27 años de edad en Brasil con características edafoclimáticas de la región, similares a las descritas para la investigación de López (2013). Estos investigadores encontraron que el contenido de nutrientes fue 16, 85, 28, 21 y 90%, respectivamente para N, P, K, Ca y Mg, más elevado que los resultados encontrados en las plantaciones de 20 años de edad en esta Tesis. Si bien los valores de contenido de nutrientes fueron superiores, la biomasa aérea también fue superior en los diferentes compartimentos, lo que probablemente se podría deber a los 7 años de diferencia de edad entre los diferentes rodales. Si bien estos investigadores no calcularon el IE, el valor que se desprende a partir del valor de biomasa y contenido de los respectivos nutrientes muestra valores similares a los encontrados en la presente Tesis.

Estas comparaciones, si bien no se conoce y no se puede comparar el manejo a lo largo del turno de rotación, muestran que las plantaciones de *P. taeda* en Argentina establecidas sobre suelos pedregosos, completan el turno de rotación con menor cantidad de nutrientes acumulados en su biomasa, respecto de plantaciones establecidas sobre suelos pedregosos en Brasil, principalmente de uno de los nutrientes considerados carentes para la región como es el P.

Bizón (2005) cuantificó el contenido de nutrientes en 8 plantaciones de diferentes edades y densidades en Brasil, bajo condiciones edáficas diferentes. Una de las plantaciones en que centró su estudio es una plantación de 27 años de edad con 163 pl.ha⁻¹, establecida en un sitio con suelo rojo profundo, similar a los suelos de los agrupamientos Ron y Ros de esta Tesis. Al comparar los resultados de contenidos de nutrientes allí obtenidos con el rodal de 25 años de edad de esta Tesis, las diferencias entre ambas plantaciones fue de -10, 39, -4, -16 y 28 % respectivamente para N, P, K, Ca y Mg, cuyos signos negativos indican mayor cantidad de nutrientes acumulados en la presente Tesis. La comparación de los IE calculados también se manifestó con mayores valores, principalmente para P y K, a favor de las plantaciones estudiadas en esta Tesis.

Adegbidi *et al.* (2005), trabajaron con plantaciones de 1 a 4 años de edad establecidas en suelos arenosos del Sur de Georgia, EEUU, cuya densidad arbórea fue de 1385 pl.ha⁻¹ para las plantaciones de 3 años de edad. Los contenidos de nutrientes acumulados, respecto de las plantaciones de 3 años de los sitios Ron y Ros fue -10, 20, -28, -31 y 30 % respecto de los sitios de suelos rojos, mientras que el sitio de EEUU superó los contenidos encontrados en los sitios Pe en 150, 120, 61, 55 y 200 %, respectivamente en N, P, K, Ca y Mg.

Investigaciones realizadas por Goya *et al.* (2003) y Caldato (2011), respectivamente en las provincias de Misiones y Corrientes, Argentina, quienes cuantificaron los contenidos de nutrientes en plantaciones de *P. taeda* y encontraron valores similares a los valores registrados en los rodales con características semejantes de la presente Tesis.

El contenido de S encontrado en los compartimentos aéreos, promedio de las cuatro plantaciones adultas establecidas en suelos pedregosos, fue similar al contenido de este elemento encontrado por López (2013). Esta coincidencia responde a valores similares entre ambas investigaciones en cantidad de biomasa en las plantaciones, como así también a las concentraciones de este elemento en los compartimentos arbóreos. No obstante,

Schumacher *et al.* (2013) encontraron que la relación de biomasa respecto del contenido de S, es menor respecto de los valores encontrados en la presente Tesis. Si bien en la citada investigación no se muestran las concentraciones de los diferentes elementos cuantificados ni la concentración de este elemento en el suelo, la diferencia entre ambas investigaciones podría deberse a la mayor concentración en los compartimentos del estudio de Brasil. Similar situación ocurre con los contenidos acumulados de Fe y Mn. Witschoreck (2008), trabajó en una plantación de *P. taeda* de 17 años de edad en Brasil, cuyo sitio responde a condiciones edafoclimáticas similares a las presentadas para los suelos pedregosos de esta Tesis. Los resultados de biomasa y contenido de nutrientes allí presentados permite deducir que el valor de IE para Mn es aproximadamente de 29, mientras que para el promedio de las cuatro plantaciones adultas, en suelos pedregosos en esta Tesis, arroja resultado de 50, lo cual indica que por cada kilogramo de Mn utilizado por las plantaciones en Argentina el *P. taeda* produce 21 Mg.ha⁻¹ más de biomasa en el fuste respecto de las plantaciones comparadas.

Respecto a la retraslocación de nutrientes en las plantaciones de *P. taeda* en Argentina, se identificó que los porcentajes encontrados de retraslocación de nutrientes son superiores a los reportados como valores medios de retraslocación para especies forestales (Aerts, 1996). También son superiores a los reportes en investigaciones en otras especies forestales, distinta al *P. taeda* (Saur *et al.*, 2000). No obstante estos investigadores, no presentan la fórmula de cálculo de la retraslocación, quienes solo indican que fue calculada por diferencia de concentraciones entre hojas vivas y hojas senescentes, lo que podría ser la razón de la diferencia en los valores encontrados entre ambas investigaciones. Viera & Schumacher (2009) estudiaron la retraslocación de nutrientes en plantaciones de *P. taeda* de 7 años de edad en Brasil, bajo condiciones similares a las de las plantaciones del presente estudio. El cálculo de retraslocación fue efectuado con la misma fórmula utilizada en esta Tesis (Vitousek & Sandford, 1986) y, los valores de retraslocación encontrados fueron similares a los de la presente Tesis. Esta similitud en los valores de retraslocación entre ambas investigaciones marca que, si bien los valores encontrados *a priori* son elevados, parecen encontrarse en el rango de valores posibles para la especie. Piatek & Allen (2000) trabajaron con plantaciones de 14 años de edad en Carolina del Norte y encontraron valores de retraslocación del 68 y 67 % respectivamente de N y P. Si bien las condiciones ambientales donde se desarrolló el trabajo difieren con las condiciones ambientales de nuestra región, permite identificar que

el *P. taeda* tiene capacidad para traslocar altos porcentajes de los nutrientes contenidos en sus hojas. Además, las diferencias ambientales bajo las que se cultivó *P. taeda* permite identificar que la especie podría traslocar diferentes porcentajes de nutrientes de acuerdo con las condiciones ambientales, coincidente con el concepto vertido por Hagen-Thorn *et al.* (2006), quienes manifiestan que la traslocación de nutrientes puede ser afectada por las diferencias ambientales.

Viera & Schumacher (2009) encontraron tendencias similares respecto de los valores en las concentraciones de calcio, quienes encontraron mayores valores en hojas caídas respecto de las hojas vivas en plantaciones de *P. taeda*. Atribuyen dichos valores a la formación de cristales de calcio y acumulación en la lámina media de las paredes celulares de este elemento considerado inmóvil, habiendo encontrado ellos que la concentración en hojas caídas era dos veces superior respecto de las hojas vivas. También con valores similares a los resultados obtenidos por Viera & Schumacher (2009) se observó el comportamiento del S, Fe y Mn. Estos autores manifiestan que la ausencia de resultados significativos en Fe y Mn se debe a la baja redistribución de estos elementos en los órganos de las plantas.

CONCLUSIONES

Las plantaciones de *Pinus taeda*, establecidas en el norte de la Mesopotamia Argentina, acumulan una importante masa de nutrientes (mineralomasa) en la biomasa aérea, cuya fracción en la copa de los árboles (hojas y ramas) disminuye con el aumento de la edad. Debido a que la concentración en las fracciones finas es mayor que en la fracción gruesa (fuste) la mineralomasa ponderada del total del árbol disminuye con la edad de los árboles. Por ello, la disminución del turno de corta implica que la cosecha tendrá una mayor concentración de minerales por unidad de masa ponderada del árbol entero, respecto de turnos largos. La extracción o exportación de nutrientes por unidad de masa cosechada se incrementará si la modalidad de cosecha incluye la extracción de los compartimentos de la copa; a ello se sumarán, en el largo plazo, el incremento de pérdidas por mayor número de intervenciones debidas al mayor número de ciclos de cultivo. La aceleración de la extracción de nutrientes del sistema, aumenta el riesgo de agotamiento de los nutrientes más escasos en los sistemas forestales, lo que podría conducir a la disminución de la productividad de los sitios en las futuras rotaciones. Por ello, la cosecha forestal es recomendable que se realice con la mayor edad posible, que se extraiga solo el

fuste como materia prima, y se manejen los residuos de la copa sobre el terreno de manera de favorecer el retorno de la mayor fracción posible de materia orgánica y nutrientes, y su descomposición y liberación de nutrientes al sitio. El manejo responsable de los residuos ayudará a conservar la capacidad productiva de los sitios y mantener los estándares productivos, independientemente del agrupamiento edafoclimático al que pertenece la plantación.

El carbono acumulado en la biomasa de la plantaciones de *P. taeda*, capturado del carbono atmosférico, funciona como uno de los principales reservorios de carbono para esta región, cuya mayor contenido acumulado se registra en edades adultas y con ocupación plena del sitio. El carbono se acumula en las estructuras leñosas, principalmente el fuste. Por lo tanto, esa acumulación tiene valor por un lado, en relación a la producción de madera y, por otro, a la mitigación del Cambio Climático. Para el primer objetivo, los turnos largos adecuadamente manejados permiten la obtención de madera de grandes dimensiones con mayores porcentajes de aprovechamiento en la industria. Para el segundo objetivo, la prolongación del turno aumentará la capacidad de mitigación por encima del turno del “*business as usual*” de la zona, ya que el sumidero de carbono de la plantación será mayor cuanto mayor sea la edad promedio de las plantaciones de la zona. Los raleos frecuentes son recomendados para obtener fustes de grandes dimensiones.

La confirmación de que las plantaciones demandan proporcionalmente más nutrientes (P, K, Mn y Fe) durante los primeros 7 años de crecimiento, y que dicha demanda se reduce con la edad de la plantación, muestra que las plantaciones tienen un incremento de la mineralomasa que se desacelera con la edad. Asimismo los índices relacionados con el uso de los nutrientes (IE, retraslocación, en los distintos ambientes edafoclimáticos) pusieron en evidencia que en estas plantaciones existe una mayor conservación y uso más eficiente de los elementos de menor disponibilidad en los suelos (P y K), y que esta es mayor donde su disponibilidad es menor (suelos rojos profundos). Teniendo en consideración que el primer punto a tener en cuenta para la conservación de los nutrientes en el suelo está en la manera de preparar el terreno, el tipo de cosecha y el manejo de los residuos de cosecha y la necromasa en el piso forestal, el hecho que una plantación forestal es exportadora neta de nutrientes hace pensar que en algún momento se deberá fertilizar para mantener las tasas de producción. Más allá que las prácticas de fertilización no se realizan en nuestra región por ausencia de respuestas financieras, deberán reponerse

los elementos extraídos y perdidos del suelo en términos netos. Bajo estas premisas, el fertilizante debería colocarse durante la primera etapa de crecimiento de las plantaciones, lo cual incrementaría el stock de elementos escasos en los suelos durante el período de mayor demanda de nutrientes por parte de las plantaciones. A estos fines, son necesarios estudios de fertilización, abonado, y otros modos de incorporación de nutrientes.

La mayor cantidad de Mn en la biomasa de las plantaciones establecidas en los sitios Ron y Ros constata que las plantaciones de *P. taeda* en esta región, establecidos en sitios de suelos rojos, crecen con baja disponibilidad de P y Mn. Si bien estos datos son los primeros reportes para la región y no se conocen reportes similares en *P. taeda* para otras latitudes, se rescata que la fertilización fosforada en conjunto con compuestos de manganeso podría potenciar el crecimiento de las plantaciones en suelos rojos.

BIBLIOGRAFÍA

Adegbidi H, Jokela E & Comerford E. 2005. Factors influencing production efficiency of intensively managed loblolly pine plantations in a 1- to 4-year-old chronosequence. *Forest Ecology and Management*, 218: 245–258.

Aerts R. 1996. Nutrient resorption from senescing leaves of perennials: are there general patterns? *Journal of Ecology*, 84: 597-608.

Binkley D, Stape J & Ryan M. 2004. Thinking about efficiency of resource use in forests. *Forest Ecology and Management*, 193: 5-16.

Bizon J. 2005. *Avaliação da sustentabilidade nutricional de plantios de Pinus taeda L. usando um balanço de entrada-saída de nutrientes*. Tese de Mestrado em Recursos Florestais – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, Brasil: 92 p.

Böttcher H & Lindner M. 2010. Managing forest plantations for carbon sequestration today and in the future. In: Van der Meer P & Kanninen M. (Eds) *Ecosystem Goods and Services from Plantation Forests*; Bauhus, J. Earthscan: London, UK: 276 p.

Caldato S. 2011. *Ciclagem biogeoquímica dos nutrientes em uma plantação de Pinus taeda L. no nordeste Argentino*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura, Universidade Federal de Santa Maria, RS: 106 p.

- Carter M, Dean T, Wang Z & Newbold R. 2006. Impacts of harvesting and postharvest treatments on soil bulk density, soil strength, and early growth of *Pinus taeda* in the Gulf Coastal Plain: a Long-Term Soil Productivity affiliated study. *Canadian Journal Forest Research*, 36: 601–614. doi:10.1139/X05-248.
- Chapin F. 1980. The mineral nutrition of wild plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.*, 11: 223-260.
- Chuyong G, Newbery D & Songwe N. 2000. Litter nutrients and retranslocation in a central African rain forest dominated by ectomycorrhizal trees. *New Phytology*, 148: 493-510.
- Cole D & Rapp M. 1981. Elemental cycling in forest ecosystems. In: Reichle ED (Ed) *Dynamic properties of forest ecosystems*. Cambridge University Press: London: 341–409.
- Del Arco J, Escudero A & Vega G. 1991. Effects of site characteristics on nitrogen retranslocation from senescing leaves. *Ecology*, 72: 701-708.
- Ewel J & Bigelow S. 1996. Plant life forms and tropical ecosystem functioning. Pp 101-126. En: Orians G, Dirzo R & Cushman JH (Eds) *Biodiversity and ecosystem processes in tropical forests*. Springer Verlag, Berlín.
- Ewel J & Hiremath A. 1998. Nutrient Use Efficiency and the Management of Degraded Lands. P. 199–215 En Gopal B, *et al.* (eds.) *Ecology today: An anthology of contemporary ecological research*. International Scientific Publications, New Delhi, India.
- Frangi J, Barrera M, Puigdefábregas J, Yapura P, Arambarri A & Richter L. 2004. Ecología de los bosques de Tierra del Fuego. Capítulo 18: 88 En Arturi M, Frangi J & Goya J (eds). *Ecología y Manejo de los Bosques de Argentina*. La Plata, Argentina. Editorial de la Universidad Nacional de La Plata.
- Gasparri N, Grau R & Manghi E. 2008. Carbon pools and emissions from deforestation in extra-tropical forests of northern Argentina between 1900 and 2005. *Ecosystem*. DOI: 10.1007/s10021-008-9190-8.
- Gladstone W & Ledig F. 1990. Reducing pressure on natural forest through high-yield forestry. *Forest Ecology and Management*, 35: 69–75.
- Goya J, Frangi J, Denegri G & Larocca F. 2009. Simulación del impacto de diferentes regímenes de cosecha sobre el capital de nutrientes e indicadores económicos en plantaciones de *Eucalyptus grandis* del NE de Entre Ríos, Argentina. *AUGMDOMUS*, 1: 1-17.

- Goya J, Pérez C, Frangi J & Fernández R. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. *Ecología Austral*, 13:139-150.
- Hagen-Thorn A, Varnagiryte I, Nihlgard B & Armolaitis K. 2006. Autumn nutrient resorption and losses in four deciduous forest tree species. *Forest Ecology and Management*, 228: 33–39.
- Iseman T, Zak D, Holmes W & Merrill A. 1999. Revegetation and Nitrate Leaching from Lake States Northern Hardwood Forests Following Harvest. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63: 1424–1429.
- Johnsen K, Teskey B, Samuelson L, Butnor J, Sampson D, Sanchez F, Maier C & McKeand S. 2004. Carbon Sequestration in Loblolly Pine Plantations: Methods, limitations, and research needs for estimating storage pools. P 373-381 En Raucher H & Johnsen K (eds). *Southern Forest Science: Past, Present, Future*. Gen. Tech. Rep. SRS-75. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station.
- Laclau P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 180: 317-333.
- Lambers H, Hayes P, Laliberte E, Oliveira R & Turner B. 2015. Leaf manganese accumulation and phosphorus-acquisition efficiency. *Trends Plant Sci*, 20(2): 83-90.
- Lopes V. 2013. *Dinâmica nutricional em um povoamento de Pinus taeda L., Rio Grande Do Sul, Brasil*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Centro de Ciências Rurais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Brasil: 138 p.
- Ma S, Concilio A, Oakley B, North M & Chen J. 2010. Spatial variability in microclimate in a mixed-conifer forest before and after thinning and burning treatments. *Forest Ecology and Management*, 259: 904–915.
- Malavolta E. 1980. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. Agronômica Ceres, Sao Paulo: 251 p.
- Martiarena R, Frangi J, Pinazo M, Von Wallis A & Fernández R. 2011. Effect of thinning and harvest type on storage and losses of Phosphorous in *Pinus taeda* L plantations in Subtropical Argentina. *International Journal of Forestry Research*. Volume 2011: 10 p.

Martiarena R, Von Wallis A & Knebel O. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Wanda, Iguazú, provincia de Misiones, Argentina. *Forestal Venezolana*, 53(2): 165-173.

Martiarena R. 2008. *Cuantificación y evaluación del contenido de fósforo exportado en plantaciones de Pinus taeda conducido con diferentes intensidades de raleo y alternativos sistemas de cosecha*. Tesis de maestría. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones: 76 p.

Martiarena R, Von Wallis A, Fernández R & Knebel O. 2007. Efecto de prácticas de preparación de terreno sobre el contenido de nutrientes y el crecimiento en plantaciones forestales. P 303-310 En: *Avances en Ingeniería Agrícola 2005-2007*. ISBN 978-987-1253-29-6.

Melo V, Novais R, Barros N, Fontes M & Costa L. 1995. Balanço nutricional, eficiencia de utilização e avaliação da fertilidade do solo em P, K, Ca e Mg em plantios de Eucalipto no Rio Grande Do Sul. *IPEF* 48/49: 8-17.

Merino A, Balboa M, Rodríguez Soalleiro R & Álvarez González. 2005. Nutrient exports under different harvesting regimes in fast-growing forest plantations in southern Europe. *Forest Ecology and Management*, 207: 325–339.

Merino A, Rey C, Brañas J & Rodríguez-Soalleiro R. 2003. Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 12(2): 85-98.

Nave L, Vance E, Swanston C & Curtis P. 2010. Harvest impacts on soil carbon storage in temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 259: 857–866.

Oki V. 2002. *Impactos da colheita de Pinus taeda sobre o balanço hídrico, a qualidade da água e a ciclagem de nutrientes em microbacias*. Tese de Mestrado em Ciências Florestais, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, Brasil: 85 p.

Pérez C, Goya J, Bianchini F, Frangi J & Fernández R. 2006. Productividad aérea y ciclo de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. en el norte de la provincia de Misiones, Argentina. *Interciencia*, 31(11): 802-807.

Piatek K & Allen L. 2000. Site preparation effects on foliar N and P use, retranslocation, and transfer to litter in 15-years old *Pinus taeda*. *Forest Ecology and Management*, 129: 143-152.

- Pinazo M, Martiarena R, Von Wallis A, Crechi E, Pahr N & Knebel O. 2007. Efecto de la intensidad de raleo sobre la compartimentalización y stock de carbono en plantaciones de *Pinus taeda* L. de 20 años en el norte de la provincia de Misiones. *RIA*, 36(1): 5-20.
- Pugnaire F & Chapin F. 1993. Controls over nutrient resorption from leaves of evergreen Mediterranean species. *Ecology*, 74: 124–129.
- Ranger J & Colin-Belgrand M. 1996. Nutrient dynamics of chestnut tree (*Castanea sativa* Mill.) coppice stands. *Forest Ecology and Management*, 86: 259-277.
- Rejmánková E. 2005. Nutrient resorption in wetland macrophytes: comparison across several regions of different nutrient status. *New Phytologist*, 167: 471–482.
- Rodríguez C. 2004. *Efeito da aplicação de resíduo da indústria de papel e celulose nos atributos químicos, físicos e biológicos do solo, na nutrição e biomassa do Pinus taeda L.* Tese de Mestre. Depto de Solos e Eng. Agrícola, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Brasil: 109 p.
- Santana R, Barros N & Neves J. 2002. 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*, 26(4): 447-457.
- Saur E, Nambiar E & Fife D. 2000. Foliar nutrient retranslocation in *Eucalyptus globulus*. *Tree Physiology*, 20: 1105–1112.
- Schumacher M, Witschoreck R, Calil F & Lopes V. 2013. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 27 anos de idade em Cambará do Sul – RS. *Ciência Florestal*, 23 (2): 321-332.
- Sette C, Nakajima N & Geromini M. 2006. Captura de carbono orgânico em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Rio Negrinho, SC. *Floresta*, 36(1): 317-324.
- Sette Jr C, Laclau J, Tomazello Filho M, Moreira R, Bouillet J, Ranger J & Raposo Almeida J. 2013. Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. *Trees*, 27: 827–839.
- Sixel R. 2012. *Sustentabilidade da produtividade de Madeira de Pinus taeda com base no estoque, na exportação e na ciclagem de nutrientes.* Tese de Mestrado. Programa de recursos Florestais. Opção em Silvicultura e Manejo Florestal. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiros, SP, Brasil: 110 p.

- Stape J. 2002. *Production ecology of clonal Eucalyptus plantations in northeastern Brazil*. Tesis de Doctorado. Colorado State University, Fort Collins, Colorado, EEUU: 225 p.
- Switzer G & Nelson L. 1972. Nutrient accumulation and cycling in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantations ecosystems: the first twenty years. *Soil Science Society of American Proceedings*, 36: 143-147.
- Vázquez S & Galmarini A. 1985. 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.
- Vázquez S & Morales L. 2000. Adsorción de P por suelos ácidos de Misiones (Argentina). *Ciencia del suelo*, 18(2): 89-94.
- Viera M & Schumacher M. 2009. Concentração e retranslocação de nutrientes em acículas de *Pinus taeda* L. *Ciência Florestal*, 19(4): 375-382.
- Vitousek PM. 1982. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. *The American Naturalist*, 119: 553-572.
- Vitousek P & Sanford R. 1986. Nutrient cycling in moist tropical forest. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 17: 137-167.
- Voigtlander M. 2007. *Caracterização hidrologica e biogeoquímica de microbacias: uma comparação entre Mata Atlântica e Pinus taeda L.* Tese de Mestrado em Recursos Florestais, com Opção em Conservação de Ecossistemas Florestais. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, Brasil: 75 p.
- Watzlawick L, Caldeira M, Godinho T, Balbinot R & Trautenmüller J. 2013. Aboveground stock of biomass and organic carbon in stands of *Pinus taeda* L. *Cerne*, 19(3): 509-515.
- Wei X, Liu W, Waterhouse J & Armleder M. 2000. Simulations on impacts on different management strategies on long-term site productivity in lodgepole pine forest of the central interior of British Columbia. *Forest Ecology and Management*, 133: 217-229.
- Witschoreck R. 2008. *Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de Pinus taeda L. de 17 años de idade no municipio de Cambará do Sul – RS*. Tese de Mestrado em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Silvicultura. Universidad Federal de Santa María, RS, Brasil: 81 p.

Wright J & Westoby M. 2003. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species. *Functional Ecology*, 17: 10-19.

Capítulo 6

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

CONCLUSIONES GENERALES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

CONCLUSIONES GENERALES

El objetivo principal de esta Tesis fue analizar el efecto de las variaciones edáficas y climáticas sobre el crecimiento y la eficiencia del uso de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* en Misiones y el norte de Corrientes. Para alcanzar este objetivo se caracterizaron las plantaciones de acuerdo con las características edafoclimáticas, rangos etarios y tipos de manejo. En todas las plantaciones se evaluó el índice de sitio (IS), la biomasa acumulada, la concentración de nutrientes en los diferentes órganos arbóreos y la eficiencia de uso de los nutrientes. A partir de los resultados obtenidos se espera contribuir a la apertura de nuevas líneas de investigación, como así también contribuir con el manejo forestal sustentable a lo largo del tiempo de las plantaciones de *P. taeda* en Argentina, con lo cual se pretende generar nuevos paradigmas en el manejo forestal de esta especie.

Los sitios con suelos pedregosos de la provincia de Misiones (Pe), sitios hacia los que se están desplazando las plantaciones forestales en esta provincia, resultaron ser los mejores provistos en nutrientes por unidad de superficie, lo cual se debería a la diferencia en el tiempo de meteorización de las rocas y el desarrollo edáfico (menor en los suelos pedregosos). En contraposición, los sitios con suelos rojos profundos del norte (Ron) y del sur (Ros) más desarrollados, mostraron poseer menor concentración de nutrientes que los suelos de los sitios Pe. Los sitios del agrupamiento Pe presentaron una menor profundidad efectiva y menor volumen de la fracción fina, respecto de los agrupamientos Ron y Ros, mientras que estos últimos manifestaron ser suelos de características similares. El crecimiento de las plantaciones de *P. taeda* presentó mayores limitaciones (menor IS) en los sitios Pe respecto de los sitios Ron y Ros. Además, las diferencias de crecimiento se tradujeron en diferencias de biomasa acumulada que fueron detectadas mediante la inclusión del agrupamiento edafoclimático sitio como variable aleatoria en los modelos mixtos, lo que mejoró la precisión en la estimación de biomasa en cada uno de los compartimentos. La mayor acumulación de biomasa se asoció a los agrupamientos edafoclimáticos Ron y Ros, cuyo diferencial de acumulación de biomasa se habría debido a la mayor disponibilidad de agua en dichos suelos rojos respecto de los pedregosos. Esta relación de condiciones edáficas con la acumulación de biomasa coincide con nuestra

predicción que indica que “en sitios con suelos pedregosos y ante iguales condiciones de manejo forestal y factores climáticos, la tasa de incremento de la biomasa es menor que en sitios con suelos rojos”

La concentración y contenido de nutrientes en el suelo fue similar entre los agrupamientos Ron y Ros. Ambas zonas presentaron temperaturas similares, no obstante la zona sur posee menores precipitaciones. El crecimiento, expresado a través del IS, se manifestó solo con tendencia (no significativa) superior en el agrupamiento Ros respecto de Ron, mientras que la biomasa acumulada, tampoco se diferenció significativamente entre ambos agrupamientos edafoclimáticos. Estas relaciones de crecimiento y biomasa respecto de las características edafoclimáticas no responden con la predicción que indica que “ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación P/ETP se relaciona con un aumento de la tasa de incremento de la biomasa”, ya que ante mayor relación P/ETP se mostró indiferente ante el crecimiento y la cantidad de biomasa aérea acumulada.

La concentración y contenido de nutrientes en el suelo fue similar entre los agrupamientos Ron y Ros. Ambas zonas presentaron temperaturas similares, no obstante la zona sur posee menores precipitaciones, lo que hace suponer un mayor déficit de saturación atmosférica y una mayor demanda transpiratoria de agua por las plantas. La mayor transpiración, en un contexto subtropical húmedo semejante, daría lugar a un mayor crecimiento. No obstante el crecimiento, expresado a través del IS, se manifestó solo con tendencia (no significativa) superior en el agrupamiento Ros respecto de Ron. La biomasa acumulada, tampoco se diferenció significativamente entre ambos agrupamientos edafoclimáticos. Estas relaciones de crecimiento y biomasa respecto de las características edafoclimáticas no responden con la predicción que indica que “ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación P/ETP se relaciona con un aumento de la tasa de incremento de la biomasa”, ya que ante mayor relación P/ETP se mostró indiferente ante el crecimiento y la cantidad de biomasa aérea acumulada.

Las plantaciones establecidas en los sitios del agrupamiento edafoclimático Pe mostraron el menor IS, por lo tanto son las plantaciones de menor crecimiento. Además, este tipo de suelo fue el mejor provisto de nutrientes con lo cual se esperaba coincidencia con la predicción planteada, cuyo enunciado dice que “en sitios con suelos pedregosos, y ante iguales condiciones de manejo forestal y factores climáticos, la concentración de nutrientes en los tejidos vegetales es mayor que sitios con suelos rojos”. Esta predicción no se pudo constatar, prácticamente, en su totalidad, ya que las concentraciones de los

diferentes nutrientes no fueron afectadas en todos los compartimentos por igual. No obstante los principales nutrientes, ya sea por la cantidad en que son requeridos por las plantas como por la importancia funcional en ellas, son el N y P. Las concentraciones y contenidos de N y P en el suelo se asociaron negativamente con el IS, es decir, la mayor presencia de N y P en el suelo correspondió a los sitios Pe, mientras que estos sitios mostraron el menor crecimiento de las plantaciones. Independientemente del agrupamiento edafoclimático, el promedio de concentración en la totalidad de plantaciones mostró al compartimento hojas como el compartimento que se diferenció significativamente en la concentración de N y P respecto de los restantes compartimentos arbóreos. Al identificar la concentración de éstos elementos en las hojas de los diferentes agrupamientos edafoclimáticos, no se observó diferencias entre las plantaciones de los sitios Ron y Pe, ambas localizadas en el norte de la región de estudio. Estos resultados muestran que las diferencias edáficas no fueron las responsables en las diferencias de concentración de los principales nutrientes en las hojas de las plantaciones de *P. taeda*. Igualmente, la concentración de estos elementos en el compartimento hojas de los agrupamientos del norte (Ron y Pe), no se diferenciaron entre ellos, mientras que la disponibilidad en el suelo, fue superior en los sitios del agrupamiento Pe. Estos resultados muestran que las plantaciones del agrupamiento Ron fueron más eficientes en el uso de los nutrientes disponibles, ya que ante menor presencia de estos en el suelo crecieron más, manteniendo similar concentración de N y P en las hojas. La mayor eficiencia en el uso de los nutrientes por las plantaciones del agrupamiento Ron sería una consecuencia de la mayor disponibilidad de agua en el suelo de estos sitios.

Los suelos rojos profundos de los sitios Ron y Ros ofrecieron similares condiciones para su crecimiento en cuanto a condiciones nutricionales para las plantaciones de *P. taeda*. El manejo de la plantación, en líneas generales, no afectó la concentración de nutrientes. La relación P/ETP entre ambos agrupamientos edafoclimáticos fue mayor en las plantaciones del agrupamiento Ron, cuya principal consecuencia se debe a la mayor cantidad de precipitaciones recibidas por las plantaciones establecidas en los sitios del agrupamiento Ron, lo que elevó el valor de esta relación en este agrupamiento. No obstante, la concentración de nutrientes en los tejidos de las plantaciones de ambos agrupamientos edafoclimáticos no se diferenció entre ellos en la mayoría de los compartimentos arbóreos y los distintos nutrientes. Por ello, la predicción que indicaba que “ante similares condiciones de suelo y manejo forestal, el aumento de la relación

P/ETP se relaciona con una disminución de la concentración de nutrientes en los tejidos”, solo se cumplió parcialmente. No obstante, para los nutrientes de mayor importancia para las plantaciones forestales (N y P), sí se constató la predicción. La concentración y contenido de N y P en el suelo fue similar entre Ron y Ros. La concentración de N en las acículas solo mostró una tendencia de mayor concentración en las plantaciones del agrupamiento Ros, mientras que en el mismo agrupamiento la concentración de P fue significativamente mayor. Esto muestra que el P, elemento de mayor carencia para los suelos rojos, se encontró con mayor concentración en las hojas de *P. taeda* ante la disminución de la relación P/ETP y permite deducir que ante mayor carencia de nutrientes en el suelo la concentración en las hojas es afectada por la relación P/ETP.

La disminución de la densidad del rodal no afectó la concentración de nutrientes en la mayoría de los tejidos de las plantaciones de *P. taeda*, por lo que la predicción que indicaba que “a densidades de plantación que determinan competencia intraespecífica, y bajo similares condiciones edafoclimáticas, la reducción de la densidad se relaciona con una disminución de la concentración de nutrientes en los tejidos”, por lo que esta predicción tampoco fue constatada. No obstante, los resultados encontrados indican que la disponibilidad de nutrientes en estos sitios aún no son limitantes para el crecimiento de las plantaciones, más allá del manejo efectuado. Esto puede aseverarse a partir de que ante la presencia de rodales menos densos, la cantidad de nutrientes disponibles por unidad arbórea es mayor, lo que muestra que las plantaciones con mayor densidad hacen uso más eficiente de los nutrientes y aún no se pueden observar evidencias de nutrientes limitantes.

Independientemente de las predicciones planteadas en el proyecto de esta Tesis, bajo el mismo objetivo que se persiguió con este estudio, se desprendieron resultados que contribuyeron para analizar diversas relaciones entre variables de la plantación con variables ambientales. Las relaciones del crecimiento de las plantaciones con las variables de sitio muestran que las plantaciones responden a un sistema ambiental multifactorial complejo. Por un lado, la presencia de piedras en el perfil de los suelos pedregosos muestra diferencias en el volumen efectivo, lo que dificultaría la retención de agua y podría manifestarse más intensamente en los intervalos sin lluvias generando escasez de agua en comparación con los suelos rojos. Más allá del menor porcentaje de material fino con menor profundidad efectiva, los suelos pedregosos poseen mayor disponibilidad de nutrientes que los suelos rojos. La disponibilidad de fósforo en los suelos sigue los

patrones expresados en la literatura, que considera que éste es el principal nutriente limitante en suelos tropicales antiguos, pero que en general, los suelos jóvenes o incipientes muestran mayor concentración de P, como se observó con los suelos pedregosos. Por otro lado, las condiciones climáticas muestran un balance P/ETP diferente entre zonas geográficas. Estas condiciones edafoclimáticas llevan a que el IS, indicador técnico del mejor crecimiento de las plantaciones, es mayor allí donde los suelos son profundos, aunque no los más ricos en disponibilidad de nutrientes, y con un balance de P/ETP favorable pero inferior al de las zonas más lluviosas. Las plantas no muestran por ende una mejor respuesta donde hay más nutrientes en el suelo, pero sí responden más conservadoramente con los nutrientes que se consideran más escasos en la región. La conjunción de los factores mencionados, si bien tuvieron efecto sobre el crecimiento y la acumulación de biomasa aérea de las plantaciones, y la relación de disponibilidad de nutrientes en el suelo, en líneas generales, no se asoció con la concentración de nutrientes en los compartimentos arbóreos. Además, los rangos medios de concentración de nutrientes encontrados en las plantaciones de *P. taeda* de los diferentes agrupamientos edafoclimáticos aún son capaces de abastecer los niveles mínimos de nutrientes para el óptimo crecimiento de las plantaciones de esta especie. Por otro lado, más allá de las diferencias encontradas en los rangos etarios o entre agrupamientos edafoclimáticos de algunos nutrientes, las plantaciones actuales de *P. taeda* no registran mayores deficiencias nutricionales. Estas condiciones de crecimiento permiten acumular una importante mineralomasa, entre las que posicionan a las plantaciones de *P. taeda* en nuestro país como una alternativa para el almacenamiento de carbono. Por otro lado, si bien estas plantaciones son una alternativa para el almacenamiento de carbono, también acumulan una gran cantidad de nutrientes, por lo que su inadecuado manejo podría conducir a la disminución de la productividad de los sitios en las futuras rotaciones. No obstante, las plantaciones cuyos sitios tienen menor disponibilidad de los elementos de más carencia para los suelos de la región (P y K), son más conservadoras y hacen más eficiente el uso de los recursos nutritivos. Otra carencia detectada en los suelos de la región y que se manifestó a través de las plantaciones de *P. taeda* fue la disponibilidad de Mn, lo que en conjunto con la baja disponibilidad de P en el suelo, se manifestaron como una mayor concentración de estos elementos en las hojas de las plantas como una estrategia para la liberación de carboxilatos para aumentar la disponibilidad de estos elementos en el suelo.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA EL MANEJO SILVICULTURAL Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La demanda de alimentos en el mundo es cada vez mayor, y seguramente, será aún mayor en el futuro. Este concepto pone a los silvicultores ante un gran desafío, ya que la superficie ocupada para producir alimento cada vez será mayor, reemplazando o desplazando al cultivo forestal. Ante este nuevo escenario, los silvicultores deben hacer más eficiente el uso de la tierra para producir similar cantidad en menores superficies, conservando las propiedades intrínsecas del sitio, y poder así, mantener la capacidad productiva del sitio. En este marco, el manejo de nutrientes será un importante concepto que debe integrarse al manejo sustentable de las plantaciones, por ello a partir de los resultados obtenidos en esta Tesis, se sugieren algunas recomendaciones prácticas que podrán ser aplicadas por los silvicultores.

Las plantaciones de *P. taeda* establecidas en sitios con suelos pedregosos (Pe) mostraron ser diferentes, tanto en crecimiento como en cantidad de biomasa acumulada, respecto de las plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos (Ron y Ros). El principal condicionamiento de las plantaciones del agrupamiento Pe se debe a la menor disponibilidad de agua para la plantación respecto de la disponibilidad de agua en los suelos de los agrupamientos Ron y Ros, debida a las propiedades físicas del suelo. Este diferencial de crecimiento y biomasa acumulada tiene implicancias sobre las actividades silviculturales que se efectúan en las plantaciones establecidas en los sitios con suelos pedregosos, respecto de las plantaciones establecidas en sitios con suelos rojos.

El mantenimiento de la capacidad productiva del sitio en el largo plazo debe efectuarse en la totalidad de sitios donde se realice la actividad forestal, no obstante algunos sitios, son más propensos a perder capacidad productiva que otros, particularmente por las condiciones intrínsecas de cada uno de ellos. Las plantaciones establecidas en los sitios del agrupamiento Pe son menos eficientes en el uso de algunos nutrientes y, más allá que sus suelos actualmente están mejor provistos de nutrientes, la menor eficiencia de uso indica mayor cantidad de nutrientes exportados durante la cosecha por unidad de biomasa cosechada. Por lo tanto, si bien en sitios con suelos rojos también debe conservarse en el terreno los residuos de cosecha, se acentúa la importancia de dicha actividad en sitios del agrupamiento Pe. Por otro lado, la corteza del fuste no genera un sustancial aporte al stock

de nutrientes del total de éstos en el sistema y, al ser la corteza de difícil extracción manual en campo, podría generar un elevado costo con mayor impacto ambiental negativo al que podría ocasionar su exportación.

A partir de los resultados de esta Tesis, en el que las plantaciones establecidas en el agrupamiento Pe mostraron menor crecimiento y cantidad de biomasa acumulada respecto de las plantaciones establecidas en los agrupamientos Ron y Ros, se recomienda ajustar la intensidad y oportunidad de los raleos para mantener plena ocupación del sitio con el máximo crecimiento posible de la especie con esas características de sitio. Para ello, debe ajustarse una nueva área basal óptima específica para las plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos, ya que la actualmente vigente para la región solo contempla plantaciones establecidas en suelos rojos. El ajuste de los nuevos valores permitirá identificar el momento en que debe efectuarse el primer raleo, como así también identificar el tiempo que debe prolongarse los períodos entre cada raleo.

La acumulación porcentual de biomasa en el compartimento fuste fue menor en las plantaciones establecidas en sitios del agrupamiento Pe, respecto de las plantaciones de los agrupamientos Ron y Ros. Estos resultados indican que los recursos disponibles utilizados por las plantas fueron distribuidos en órganos que no son comercialmente aprovechables por el silvicultor. Por lo tanto, a futuro se debería abordar investigaciones que busquen la maximización de biomasa de fuste a partir de la redistribución de acumulación de biomasa por medio de las podas. Estos estudios deberían abordarse complementados con la determinación de la nueva área basal óptima para mantener plena ocupación del sitio y que las plantas puedan aprovechar óptimamente el recurso de energía lumínica, recurso necesario para la fotosíntesis.

La proporción de mineralomasa en la copa (hojas y ramas) disminuye con el aumento de la edad, por ello, la disminución del turno de corta implica que la cosecha tendrá una mayor concentración de minerales por unidad de masa, respecto de turnos largos. Por lo que es recomendable que la cosecha forestal se realice con la máxima edad posible, conservando los compartimentos de la copa en el terreno.

La mayor demanda de nutrientes en las plantaciones de *P. taeda* acontece durante los primeros 7 años de crecimiento y se reduce con el incremento de la edad de la plantación. Durante la cosecha, independientemente de la edad de la plantación y la modalidad de cosecha aplicada, se exporta los nutrientes contenidos en la biomasa cosechada, por lo que mantener la capacidad productiva en el largo plazo implica reponer los nutrientes

exportados. Esta reposición puede darse por diferentes vías, las cuáles pueden ser generadas por la acción antrópica como parte de los planes de manejo forestal, o bien, por vías naturales, como por ejemplo aportes por deposiciones atmosféricas. Entre las vías que pueden ser consideradas en los planes de manejo forestal, la fertilización es la clásica reposición de nutrientes, práctica que no es aplicada en las plantaciones de *P. taeda* de nuestro país por ausencia de respuestas financieras e imposibilidad de recupero de los montos invertidos en el corto plazo. No obstante, la fertilización debería efectuarse a modo de reposición para sostener en el tiempo la capacidad productiva de los sitios, cuya aplicación debería efectuarse en el período de mayor demanda de nutrientes por parte de las plantaciones. De aquí que se recomienda reponer la cantidad de nutrientes exportados de acuerdo con los contenidos exportados en función de la modalidad de cosecha. Particularmente para las plantaciones establecidas en sitios con suelos pedregosos, la reposición de nutrientes mediante fertilización debe efectuarse en los períodos de mayor probabilidad de ocurrencia de lluvias, ya que la falta de disponibilidad de agua en esos suelos podría ocasionar efectos adversos sobre la plantación en períodos de carencia de lluvias. No obstante, más allá de la reposición de nutrientes por fertilización como manejo forestal tradicional, el manejo forestal de las plantaciones debería enmarcarse bajo nuevos enfoques, lo cuales deberían armonizar aspectos sociales, ecológicos y económicos. Las plantaciones forestales en las provincias de Misiones y Corrientes son manejadas, mayoritariamente, como monocultivos. Los monocultivos son altamente productivos, no obstante en sistemas forestales, se produce una extracción continua de nutrientes que puede comprometer la productividad en el largo plazo, por ello, la consociación de plantaciones forestales con cultivos anuales que aporten nutrientes al sistema podría ser un nuevo enfoque del manejo forestal futuro. La producción debajo del dosel arbóreo exige mayor apertura del dosel del rodal, cuya apertura permite, no solo la realización del cultivo en el estrato inferior, sino que posibilita el incremento de la biodiversidad. Todos ellos beneficios que aportan para sostener la productividad en el largo plazo. Como se mencionó, los aspectos sociales son parte de lo que debe contemplarse para mantener la productividad forestal en el marco de la sustentabilidad. La producción forestal sustentable bajo el nuevo enfoque planteado debería combinar varios aspectos. Uno de ellos es incluir silvicultura clonal que permita mejorar la forma del *P. taeda* para disminuir la densidad inicial de plantación y permitir los cultivos en el estrato inferior. Respecto a los cultivos del estrato inferior, debería permitir intercalar cultivos que aporten nutrientes al sistema, más allá que no aporten productos comercializables, con cultivos

de producción que permitan obtener rentabilidad de los mismos. En cuanto a los cultivos que favorecen el aporte de nutrientes al sistema, particularmente para esta región del país donde el P es el elemento de menor disponibilidad, debería priorizarse aquellos cultivos que sean capaces de movilizar fósforo en el suelo. No obstante, si bien el N no parece mostrar déficit en estos sitios, los cultivos anuales exportan significativas cantidades de este elemento, por lo que sería importante la combinación de los mismos. En resumen, el sistema productivo quedaría integrado por el cultivo forestal clonal con menor densidad de plantación en el estrato superior, mientras que el estrato inferior combinaría periódicamente cultivos anuales productivos con cultivos que permitan el aporte de N y la movilidad de P del suelo. Este nuevo enfoque de manejo forestal podría permitir alcanzar estándares productivos sustentables.

A partir de la disponibilidad de información referentes a cantidad de nutrientes que se exportan durante la cosecha en función de las variables que afectan el contenido de nutrientes almacenados en las plantaciones, se recomienda incorporar en los simuladores forestales, ya sea existentes o en futuras versiones, una opción que brinde al silvicultor una herramienta en la que permita calcular la cantidad de nutrientes exportados.

En el sector forestal del mundo se discute sobre sitios para las plantaciones. Habitualmente, se habla de suelos forestales, como aquellos suelos marginales en los que no es posible realizar agricultura, o al menos, dificulta producir a gran escala por las condiciones propias de las características de suelo. Es por ello que los especialistas en mejoramiento forestal, ubican al mejoramiento forestal como predominante por sobre el sitio y las prácticas silviculturales. En esta Tesis pudo demostrarse que las condiciones de sitio, principalmente las condiciones físicas del suelo, son las responsables de la disminución del crecimiento y almacenamiento de biomasa y carbono en la biomasa aérea de las plantaciones de *P. taeda*. En este marco y, considerando que las plantaciones forestales en la provincia de Misiones avanzan sobre los sitios con suelos pedregosos, sería pertinente que en futuros estudios el mejoramiento forestal centre sus objetivos para seleccionar materiales genéticos que respondan con los mejores crecimientos adaptados a las condiciones propias de los sitios Pe. Además, no solo debería seleccionarse materiales más productivos sitio-específicos, sino que éstos materiales deben ser más eficientes en el uso del agua y los nutrientes. Probablemente, en éstos materiales más productivos, la mayor productividad sea consecuencia del uso más eficiente, o bien, la mayor productividad pueda deberse al mayor consumo de los nutrientes disponibles en el

suelo, situación que en el mediano plazo podría conducir a la disminución de la productividad.

La comparación del crecimiento y la cantidad de biomasa acumulada a nivel de rodal en las plantaciones de *P. taeda* en Argentina muestra valores superiores a los reportados para las plantaciones de otras regiones con similares condiciones edafoclimáticas. Este parámetro indica que la región donde se planta *P. taeda* en Argentina es una zona atractiva para quienes desean invertir en forestación. Además, la cantidad de nutrientes exportados por unidad de biomasa es menor en las plantaciones Argentinas, por lo que la producción de madera es acompañada por menor impacto nutricional ambiental para el sitio, lo que permitiría mantener la capacidad productiva del sitio con aplicación de menor cantidad de nutrientes mediante fertilización.