

Exportación de nitrógeno y calcio mediante raleo en un rodal de *Eucalyptus nitens* de 5 años de edad, Chile

Export of nitrogen and calcium through the thinning of a five-year-old stand of *Eucalyptus nitens*, Chile

Oscar Thiers E^a, Víctor Gerding^{a*}, Juan E Schlatter^a

^aUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.

*Autor de correspondencia: ^aUniversidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales, casilla 567, Valdivia, Chile, tel.-fax: 56-63-221431, vgerding@uach.cl

SUMMARY

The aim of the present paper was to assess the export of nitrogen and calcium in a five-year-old stand of *Eucalyptus nitens* (41°01' S y 73°27' W; 200 m rise, Acrudoxic Hydric Hapludand red clay soil), with and without fertilization, due to the thinning with varying extents of biomass extraction (logs: only wood, trunks: wood plus bark, and whole tree). The plantation was established in 1996 and was fertilized (F) with phosphoric rock before planting, in the spring of the same year (NPK + microelements), the next year (NPK) and the third year (NP). A similar surface (0.25 ha) was defined as the control plot (T). The thinning of 700 trees ha⁻¹ was considered, leaving a residual density of 800 trees ha⁻¹ with the pruning of the lowest third of the crown. Prior to the thinning, the above-ground biomass in T was 95.6 Mg ha⁻¹ (accumulation of: 434 kg N ha⁻¹ and 306 kg Ca ha⁻¹) and in F it was 121.3 Mg ha⁻¹ (516 kg N ha⁻¹ and 359 kg Ca ha⁻¹). Roots represented 6.2% and 5.4% of the total biomass, respectively. The extraction of logs (only wood) exported 16-18% of the above-ground nitrogen and 5-6% of the above-ground calcium in the stand, whereas the extraction of whole trees took out 41-44% of the nitrogen and calcium. The bark was the biomass component that accumulated the most calcium, reaching almost three times as much as that in the wood. Retention of the bark in the site can be significant for the supply of this element during rotation.

Key words: nutrients inventory, biomass, harvest waste, fertilization, intensive silviculture.

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la exportación de nitrógeno y calcio en un rodal de *Eucalyptus nitens* de 5 años de edad (41°01' S y 73°27' O; 200 m de elevación, suelo rojo arcilloso Acrudoxic Hydric Hapludand), con y sin fertilización, producto de raleo con diferentes grados de extracción de biomasa (fuste, tronco y árbol completo). La plantación se estableció en 1996 y se fertilizó (F) con roca fosfórica antes de plantar, en la primavera del mismo año (NPK + microelementos), al año siguiente (NPK) y al tercer año (NP). Una superficie semejante (0,25 ha) fue definida como testigo (T). Se consideró el raleo de 700 árboles ha⁻¹, dejando una densidad residual de 800 árboles ha⁻¹ con poda del tercio inferior de la copa. Previo al raleo la biomasa aérea en T fue de 95,6 Mg ha⁻¹ (acumulación de: 434 kg N ha⁻¹ y 306 kg Ca ha⁻¹) y en F de 121,3 Mg ha⁻¹ (516 kg N ha⁻¹ y 359 kg Ca ha⁻¹). Las raíces representaron 6,2% y 5,4% de la biomasa total, respectivamente. La extracción del fuste (sólo madera) exportó 16-18% del nitrógeno y 5-6% de calcio aéreo del rodal, mientras que la extracción del árbol completo extrajo 41-44% del nitrógeno y del calcio. La corteza fue el componente de biomasa que más calcio acumuló, alcanzando a casi el triple que en la madera. La retención de la corteza en el sitio puede ser significativa para el abastecimiento de este elemento durante la rotación.

Palabras clave: inventario nutritivo, biomasa aérea, desechos de cosecha, fertilización, silvicultura intensiva.

INTRODUCCIÓN

La superficie total de *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden) Maiden en Chile alcanza a 150.000 ha, existiendo aún cerca de 600.000 ha potenciales para su establecimiento en el sur del país (INFOR 2004). El establecimiento de plantaciones de *E. nitens* en esta región responde fundamentalmente a su rápido crecimiento, su

resistencia a bajas temperaturas y la cercanía a centros de consumo industrial.

En las plantaciones de rápido crecimiento la silvicultura intensiva es clave para mantener o aumentar su productividad en el futuro (Fox 2000, Goncalves et al. 2004). Producto de la intensificación de la silvicultura han aumentado las tasas de crecimiento y con ello se ha incrementado la demanda nutritiva en períodos más cortos. La mantención

de la fertilidad del suelo debe considerar, entre otros, el manejo nutritivo que incluye aplicación de fertilizantes y manejo de los residuos de cosecha (Yost *et al.* 1988, Smethurst *et al.* 2001, Yamada *et al.* 2004, Ringrose y Neilsen 2005). Por sus altas tasas de crecimiento inicial, *E. nitens* presenta una gran demanda de nutrientes que, en general, no alcanza a ser cubierta por la disponibilidad en el suelo y las propias reservas de las plantas. Por ello el déficit debe ser suplido con fertilizantes (Bonomelli y Suárez 1999, Suárez y Bonomelli 2001, Bonomelli *et al.* 2002, Geldres 2005ab).

Los efectos en el balance de nutrientes de diferentes métodos e intensidades de extracción de biomasa en rodales de *E. nitens* han sido poco analizados en Chile (Yamada *et al.* 2004, Geldres 2005ab). En otras regiones del mundo se han cuantificado en plantaciones de *Eucalyptus spp.* la acumulación y la extracción de elementos nutritivos a través de la biomasa cosechada (Madgwick *et al.* 1981, Frederick *et al.* 1985, Misra *et al.* 1998b, Laclau *et al.* 2001, Schumacher y Caldeira 2001, Muñoz 2002, Sankaran *et al.* 2005); entre los elementos con mayores niveles de exportación se identifican al nitrógeno y al calcio. Las exportaciones de elementos nutritivos dependen de la cantidad de biomasa cosechada, la cual varía según el tipo de cosecha practicada (árbol completo, troncos con corteza o descortezados) y también de la edad de rotación o la edad a la cual se ralea (Raison y Crane 1986).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la exportación de nitrógeno y calcio en un rodal de *Eucalyptus nitens* de 5 años de edad, con y sin fertilización, producto de raleo con diferentes grados de extracción de biomasa (fuste, tronco y árbol completo).

MÉTODOS

Establecimiento de la plantación y tratamiento de fertilización. La plantación de *E. nitens* se ubicó en el predio Pichimaule, comuna de Fresia (41°01' S y 73°27' O; 200 m s.n.m.). El clima es de costa occidental con influencia mediterránea, donde la precipitación anual alcanza 1.600-2.000 mm y presenta un periodo seco de 1-2 meses al año. El suelo es del tipo rojo arcilloso de la serie Crucero (Acruoxic Hydric Hapludand) (CIREN 2001). Este suelo es profundo, de textura franca arcillosa, con buena estructura y drenaje interno moderado; presenta alta acidez y baja disponibilidad de fósforo (Geldres 2005ab, Geldres *et al.* 2006). El uso anterior correspondió a pradera natural, con antecedentes agrícolas.

La preparación del terreno, en marzo de 1996, consideró control químico de malezas en toda la superficie, en mayo del mismo año se subsoló a 50 cm de profundidad en las líneas de plantación. La plantación se estableció en junio (4 m x 1,5 m), con plantas producidas en contenedores con semilla de Macalyster (Victoria Central, Australia) y se seleccionaron por altura (25-30 cm) y

diámetro de cuello (4 mm). En octubre de 1996 se hizo un nuevo control químico de malezas y posteriormente en 1997 y 1998 controles manuales. Estas condiciones generales del establecimiento constituyeron el tratamiento testigo (T). El tratamiento de fertilización (F) consideró la aplicación de roca fosfórica (Bifox) equivalente a 49 kg ha⁻¹ de fósforo en las líneas de plantación, durante la preparación del suelo. Posteriormente, en octubre de 1996, se fertilizó con 135 g planta⁻¹ de NPK (20:25:5), incorporados en dos bandas de 40 cm de largo y 5 cm de profundidad, a 5-10 cm de las plantas. Esta fertilización correspondió a 36 kg ha⁻¹ de nitrógeno (urea), 20 de fósforo (superfosfato triple) y 5,6 de potasio (sulfato de potasio); la mezcla incluyó los micronutrientes zinc, cobre (sulfatos) y boro (boronatrocalcita). En septiembre de 1997 se fertilizó al voleo en fajas, junto a las hileras de árboles, con 45 kg ha⁻¹ de nitrógeno (urea), 48 de fósforo (superfosfato triple), 10 de potasio (muriato), 4,8 de boro (boronatrocalcita), 1,25 de cobre (sulfato) y 1,15 de zinc (sulfato). En agosto de 1999 se fertilizó al voleo en toda la superficie del rodal con 230 kg ha⁻¹ de nitrógeno (supernitro) y 100 de fósforo (superfosfato triple). Cada tratamiento (T y F) abarcó una superficie de 0,25 ha (50 x 50 m). Las dosis aplicadas en las fertilizaciones se basaron en el modelo racional que considera la oferta del suelo, la demanda de la especie a una edad determinada y la eficiencia del producto (Rodríguez 1993, Álvarez *et al.* 1999). La oferta nutritiva disponible del suelo (0-20 cm y para una arraigabilidad máxima estimada del 50%) fue de 314 kg Ca ha⁻¹, 104 kg K ha⁻¹, 4 kg P ha⁻¹ y de 30 kg N ha⁻¹; esta última estimada a partir del contenido de nitrógeno total del suelo y una tasa de mineralización de 1% anual (Geldres 2005ab).

Biomasa, nitrógeno y calcio. Al año 5 de la plantación (2001) se realizó un inventario forestal donde se obtuvo el diámetro a 1,3 m (DAP), la altura total y la densidad de los rodales. Se determinó la biomasa total (aérea y radicular), a través de la cosecha de árboles representativos, de acuerdo con la distribución diamétrica. Los componentes de la copa se separaron según su ubicación vertical (1/3 superior, 1/3 medio y 1/3 inferior), separando hojas (juveniles y adultas), ramas vivas (gruesas Ø > 1 cm y finas Ø ≤ 1 cm) y ramas muertas. Desde la base del tronco y cada 2 m se obtuvieron muestras (rodela) para los análisis químicos y la determinación de la proporción madera/corteza. Las raíces se muestrearon en seis columnas de suelo de 10 x 10 cm de superficie y 110 cm de profundidad, separándolas por diámetro (Ø > 3 cm, 0,2 a 3 cm y < 0,2 cm). Las raíces principales se obtuvieron de dos árboles de diámetro medio cuadrático (DMC) en cada tratamiento (Geldres 2005a). Para todos los componentes de la biomasa se determinó peso húmedo en terreno y, en laboratorio, peso seco (contenidos de humedad) y contenidos de nitrógeno (Kjeldahl) y calcio (espectrofotometría de absorción atómica).

Utilizando la información de distribución diamétrica, obtenida de cuatro unidades muestrales (12,5 x 50 m) en que se dividió la superficie de cada tratamiento, y con las funciones de biomasa de Minte (2004), se estimó la biomasa total aérea de los rodales. En este último aspecto la estimación de la biomasa difiere de aquella realizada por Geldres *et al.* (2006) en este mismo ensayo. La biomasa se distribuyó en sus distintos componentes según su porcentaje de participación en el total (Geldres 2005a, Geldres *et al.* 2006). Con los contenidos de nitrógeno y calcio se calcularon las cantidades de estos elementos en cada componente de la biomasa. El análisis de los datos de biomasa y cantidades de elementos nutritivos se hizo sobre la base de la superficie total de cada tratamiento. Además se calculó la eficiencia (kg kg⁻¹), que corresponde a la cantidad de biomasa producida por unidad de elemento nutritivo acumulado (Raison y Crane 1986). Las comparaciones entre tratamientos se hicieron a través de prueba t.

Características de los rodales y supuestos para la intervención silvicultural. La densidad inicial de ambos rodales fue de 1.500 árboles ha⁻¹. A los 5 años de edad, previo al raleo, en el testigo el DMC fue de 15,1 cm y en el fertilizado de 16,1 cm; las respectivas alturas totales fueron de 14 m y 16,3 m. El rodal fertilizado presentó más árboles de diámetros superiores (DAP ≥ 14 cm) y, además, alturas totales mayores que en el rodal testigo en cada clase diamétrica. A partir de esta situación se simuló, a la edad de 5 años, un raleo de 700 árboles ha⁻¹, variando levemente con respecto a la corta intermedia que se realizó en los rodales de estudio. La simulación incluyó la totalidad de las clases diamétricas, pero se concentró más fuertemente en las clases menores, equivalente a un raleo por lo bajo de intensidad media a alta (Nyland 2002) (figura 1).

Para el raleo se consideraron tres tipos de extracción: árbol completo (biomasa aérea), troncos (madera con corteza) y fustes (sólo madera); en estos dos últimos casos los desechos del raleo permanecen sobre el suelo. También se simuló una poda del tercio inferior de la copa de los 800 árboles ha⁻¹ residuales, dejando los desechos esparcidos sobre el suelo.

RESULTADOS

La biomasa aérea fue de 95,6 Mg ha⁻¹ en el rodal testigo y de 121,3 Mg ha⁻¹ en el fertilizado (cuadro 1). Con la fertilización se obtuvo 27% más de biomasa aérea y 9% más de biomasa radicular. Los árboles raleados fueron equivalentes al 41% de la biomasa aérea en el testigo y al 44% en el fertilizado. En la biomasa aérea del rodal fertilizado se acumuló 19% más nitrógeno y 17% más de calcio con respecto al rodal testigo (cuadro 1). La eficiencia en la producción de biomasa total, obtenida

a partir del cuadro 1, fue similar en ambos tratamientos, tanto para nitrógeno (214-222 kg kg⁻¹) como para calcio (311-322 kg kg⁻¹), con una leve ventaja de 4% del fertilizado sobre el testigo. Considerando sólo la biomasa aérea, la eficiencia fue algo mayor para el rodal fertilizado con respecto al testigo (incremento de 7% para nitrógeno y de 8% para calcio).

El rodal fertilizado acumuló en las raíces 50% más de nitrógeno y 27% más de calcio con respecto al testigo. La poda en el testigo significó un aporte al mantillo de 77 kg ha⁻¹ de nitrógeno y 63 kg ha⁻¹ de calcio; en el fertilizado fue de 95 y 86 kg ha⁻¹, respectivamente. Por tanto, existió una mayor devolución hacia el mantillo en el rodal fertilizado, con respecto al testigo, de 23% de nitrógeno y 37% de calcio.

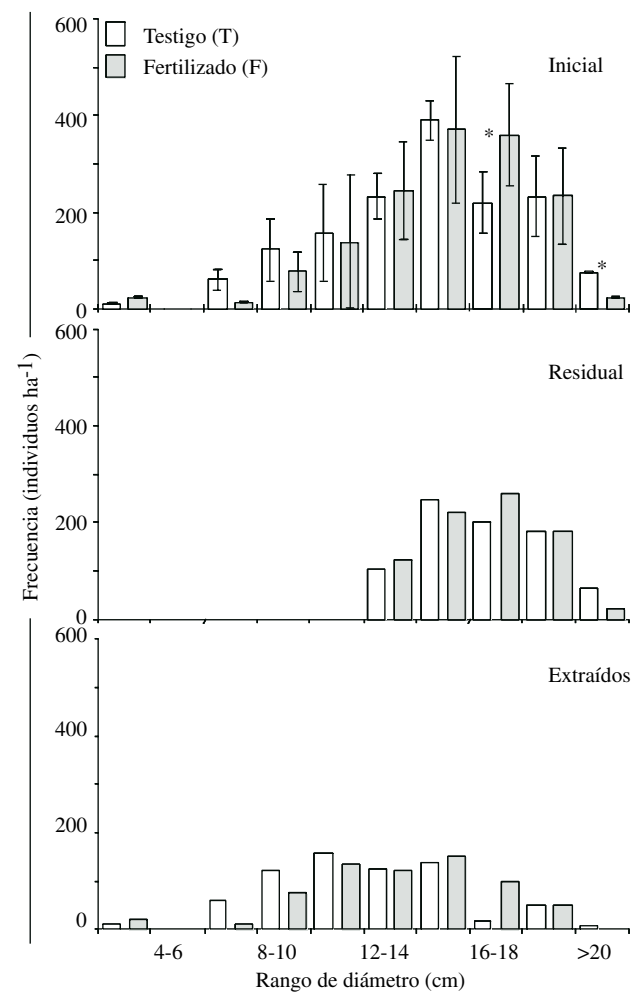


Figura 1. Distribución diamétrica de los rodales testigo (T) y fertilizado (F) antes del raleo (Inicial), después del raleo (Residual) y de los árboles extraídos (Extraídos). Líneas verticales sobre las columnas corresponden a la desviación estándar. *Diferencia significativa entre rodales ($P < 0,05$).

Diameter distribution in the control (T) and fertilized (F) stands before thinning (Inicial), after thinning (Residual) and of the removed trees (Extraídos). The vertical lines on the columns correspond to the standard deviation. *Significant difference between stands ($P < 0.05$).

Cuadro 1. Biomasa, nitrógeno y calcio por componente para los tratamientos testigo (T) y con fertilización (F), considerando pre- y posraleo.

Biomass, nitrogen and calcium in the components for control (T) and fertilized (F) treatments, before and after thinning.

Componente	Biomasa (kg ha ⁻¹)				Nitrógeno (kg ha ⁻¹)				Calcio (kg ha ⁻¹)			
	Inicial	Residual	Extraída ¹	% ²	Inicial	Residual	Extraída ¹	% ³	Inicial	Residual	Extraída ¹	% ³
Testigo												
Hojas	12.260	7.262	4.998	5	166	98	67	16	82	49	33	11
Ramas	17.283	10.237	7.046	7	65	38	26	6	91	54	37	12
Corteza	7.210	4.270	2.939	3	37	22	15	3	98	58	40	13
Madera	58.795	34.825	23.970	25	167	99	68	16	35	21	14	5
Subtotal aéreo	95.547	56.593	38.954	41	434	257	177	41	306	181	125	41
Raíces	6.325	3.746	2.579		42	25	17		22	13	9	
Total	101.872	60.340	41.532		476	282	194		328	194	134	
Fertilizado												
Hojas	14.954	8.310	6.643	5	185	103	82	16	101	56	45	13
Ramas	20.828	11.575	9.253	8	76	42	34	7	95	53	42	12
Corteza	9.036	5.022	4.014	3	51	29	23	4	118	65	52	15
Madera	76.524	42.528	33.997	28	205	114	91	18	46	25	20	6
Subtotal aéreo	121.342	67.435	53.907	44	516	287	229	44	359	200	160	44
Raíces	6.916	3.844	3.073		63	35	28		38	21	17	
Total	128.258	71.278	56.980		579	322	257		398	221	177	

¹Cantidad extraída por raleo. ²Porcentaje de biomasa extraída por raleo respecto del subtotal inicial de biomasa aérea. ³Porcentaje de la cantidad de elemento extraído por raleo respecto del subtotal inicial del mismo elemento en la biomasa aérea.

El nitrógeno acumulado en la biomasa total, como promedio de los dos tratamientos (cuadro 1), se concentró en las hojas y en la madera con una proporción aproximada de 35% en cada uno de estos componentes. Sin embargo, las hojas representaron sólo el 12% y la madera el 59% de la biomasa total en cada rodal. El calcio, en cambio, mostró una baja acumulación en la madera (11% del total) pero su participación fue alta en la corteza (30% del total), considerando que este último componente representó sólo el 7% de la biomasa total. Las hojas y las ramas acumularon un poco menos calcio que la corteza, no obstante que presentaron mayor cantidad de biomasa que la corteza (1,7 y 2,4 veces, respectivamente).

En comparación con la extracción de fustes, que fue el tipo de cosecha más conservador, la exportación de troncos, que incluyó la corteza, significó un aumento de la pérdida de nitrógeno de 22-25%; pero casi triplicó (2,6-2,8 veces) la salida de calcio del sitio. Por su parte, la cosecha de árbol completo significó un mayor aumento de las exportaciones de nitrógeno (1,5-1,6 veces) y de calcio (6,9-7,7 veces) (cuadro 2).

En el rodal fertilizado la exportación nutritiva fue 20-30% mayor que en el testigo. La extracción del fuste (sólo

madera) exportó 16-18% del nitrógeno aéreo acumulado y un 5-6% del calcio aéreo; la cosecha de árbol completo extrajo 41-44% del nitrógeno y del calcio aéreo del rodal; y la extracción del tronco (madera y corteza) en ambos tratamientos alcanzó niveles intermedios, similares para los dos elementos nutritivos, exportando 18-22% de lo acumulado en la biomasa aérea (cuadro 2).

DISCUSIÓN

Las cantidades de nitrógeno y calcio acumuladas en los distintos compartimentos de la biomasa aérea de este estudio son coincidentes con lo reportado por otros autores con respecto a plantaciones de *Eucalyptus spp.* (Madgwick *et al.* 1981, Frederick *et al.* 1985, Yost *et al.* 1988, Misra *et al.* 1998b, Laclau *et al.* 2001, Schumacher y Caldeira 2001, Muñoz 2002, Sankaran *et al.* 2005). Se destaca la alta proporción de nitrógeno en las hojas y en la madera, que presentan similares cantidades, alcanzando en conjunto aproximadamente el 70% del total acumulado en la biomasa. Por el contrario, el calcio presenta baja acumulación en la madera y mayores cantidades en la corteza, las ramas y las

Cuadro 2. Biomasa, nitrógeno y calcio exportados según tipo de cosecha en el raleo para los tratamientos testigo (T) y con fertilización (F).

Biomass, nitrogen and calcium export intensity through thinning in the control (T) and fertilized (F) treatments.

	Biomasa (kg ha ⁻¹)				Nitrógeno (kg ha ⁻¹)				Calcio (kg ha ⁻¹)			
	Inicial	Residual	Extraída	% ¹	Inicial	Residual	Extraída	% ²	Inicial	Residual	Extraída	% ²
Testigo												
Tipo de cosecha												
Fuste ³	58.795	34.825	23.970	25	167	99	68	16	35	21	14	5
Tronco ⁴	66.004	39.095	26.909	28	204	121	83	19	133	79	54	18
Completo ⁵	95.547	56.593	38.954	41	434	257	177	41	306	181	125	41
Fertilizado												
Tipo de cosecha												
Fuste ³	76.524	42.528	33.997	28	205	114	91	18	46	25	20	6
Tronco ⁴	85.560	47.549	38.011	31	256	142	114	22	163	91	73	20
Completo ⁵	121.342	67.437	53.907	44	516	287	229	44	359	200	160	44

¹Porcentaje de biomasa extraída respecto de la biomasa total aérea inicial (árbol completo). ²Porcentaje de la cantidad de elemento extraído por raleo respecto del total acumulado. ³Sólo madera. ⁴Madera y corteza. ⁵Madera, corteza, ramas y hojas.

hojas. En cada uno de estos últimos tres compartimentos el calcio representa aproximadamente un 30% del total acumulado en la biomasa. Los niveles de eficiencia para ambos elementos en la producción de biomasa fueron menores a los determinados por otros autores en *Eucalyptus spp.*, especialmente para nitrógeno (Santana *et al.* 2002, Stape *et al.* 2004). La existencia de diferencias mínimas en eficiencia (4-8%) entre tratamientos podría explicarse por la calidad del sitio media a alta (Geldres 2005ab), pues no existen restricciones climáticas y las restricciones edáficas son sólo marginales (niveles bajos de fósforo). La ausencia de factores limitantes marcados, especialmente nutricionales, podría condicionar la expresión del manejo nutritivo (Fox 2000).

Sin embargo, el efecto de la fertilización sobre la biomasa se aprecia de mayor magnitud en los componentes aéreos que en el radicular, coincidiendo con la tendencia observada para esta misma especie por Misra *et al.* (1998a). La biomasa aérea del rodal fertilizado fue un 26% mayor con respecto al testigo mientras que la radicular lo superó sólo en 9%. Sin embargo, la distribución de nitrógeno y calcio prácticamente no se modificó por efecto de la fertilización (cuadro 1).

La poda al quinto año representa una devolución de elementos al mantillo que equivale a 2-3 veces la disponibilidad de nitrógeno y de 20-25% del calcio disponible del suelo superficial (0-20 cm). De acuerdo con estos resultados, la poda puede ser de mayor efecto en el abastecimiento de nitrógeno que de calcio a través de la descomposición y mineralización de los desechos. Según Laclau *et al.* (2003), el abastecimiento de calcio en *Eucalyptus spp.* es muy dependiente de la oferta del suelo.

El tipo de cosecha puede incidir sobre el balance nutritivo del ecosistema de una plantación según la extracción de biomasa que ocasione, la cual condicionaría la exportación de elementos nutritivos. Tanto para el nitrógeno como para el calcio la cosecha de árbol completo ocasiona naturalmente la mayor pérdida de tales elementos del sitio. En este estudio, la exportación de nitrógeno con el raleo, en el rodal testigo, puede ser dos a seis veces la cantidad disponible anual de este elemento en el suelo superficial según el tipo de cosecha aplicado. Para el rodal fertilizado estas proporciones son mayores, de tres a ocho veces. En todo caso, el suelo bajo estas plantaciones presenta una alta reserva de nitrógeno total que otorga estabilidad al sistema en el largo plazo (Gerding y Schlatter 1999).

La exportación de calcio es menor que la de nitrógeno (cuadro 2) y además el suelo presenta mayor oferta de calcio disponible. Con el raleo, en el escenario de mayor extracción de biomasa, la exportación de calcio alcanza el 50% de la disponibilidad anual en el suelo superficial. Sin embargo, Gerding y Schlatter (1999) determinaron que suelos rojo arcillosos con plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile presentan una condición de inestabilidad con respecto a este elemento en el largo plazo. Esto puede significar una condición de mayor restricción en plantaciones de *E. nitens* debido a su mayor demanda por calcio en comparación con *P. radiata* (Schlatter *et al.* 1998, Ouro *et al.* 2001).

La exportación de corteza con los troncos incrementa significativamente las pérdidas de calcio, pero ejerce menor efecto en las salidas de nitrógeno. Estos incrementos en la exportación de elementos, por sobre la proporción

de biomasa involucrada, se deben a los contenidos de nitrógeno y calcio en los distintos tejidos. El alto contenido de calcio en la corteza observado es coincidente con lo expresado en la literatura para *Eucalyptus spp.* (Madgwick *et al.* 1981, Frederick *et al.* 1985, Goya *et al.* 1997, Muñoz 2002, Bonomelli *et al.* 2002, Sankaran *et al.* 2005).

Dentro de los fundamentos para mantener la productividad del sitio en el largo plazo está el manejo nutritivo del suelo (Fox 2000, Smethurst *et al.* 2001, Ringrose y Neilsen 2005). Ello incluye los principios de minimizar la exportación de biomasa, manejar adecuadamente los desechos de la cosecha y reponer los elementos nutritivos extraídos por la cosecha, entre otros (Gerding 1991, Hunter 2001). De acuerdo con los resultados de este estudio, coincidiendo con otros autores (Madgwick *et al.* 1981, Frederick *et al.* 1985, Yost *et al.* 1988, Laclau *et al.* 2001, Schumacher y Caldeira 2001, Sankaran *et al.* 2005), para minimizar las pérdidas de elementos nutritivos y materia orgánica, tanto los raleos como la cosecha de plantaciones de rotaciones cortas deberían considerar sólo la extracción de fustes, evitando la exportación de corteza y copas de los árboles.

En consecuencia, tanto en los raleos como en la cosecha final, el desramado y descortezado en el mismo sitio de volteo serían prácticas de manejo adecuadas para minimizar los niveles de extracción de biomasa y de elementos nutritivos. En el caso de una faena de descortezado en un punto del rodal, que concentra los desechos en una pequeña área, el manejo poscosecha de tales desechos debiera considerar su redistribución homogénea sobre el suelo del rodal, evitando una excesiva concentración de biomasa en algunos sectores y su pérdida en otros. También está la posibilidad de incorporar los desechos al suelo superficial (Jones *et al.* 1999), lo que requiere de un análisis específico del caso según las características edáficas y climáticas del sitio.

No obstante lo anterior, una práctica habitual de cosecha en plantaciones forestales en Chile, inadecuada para el mantenimiento de la productividad, es la de remover los árboles completos para desramarlos en algunas áreas pequeñas de procesamiento y carguío. Con ello se genera una acumulación de desechos en tales áreas y, en consecuencia, se produce una cosecha de árbol completo en la mayor parte de la superficie del rodal. Además, generalmente no se descortezan en el mismo rodal, sino que se realiza esto en las industrias que consumen la madera como materia prima, aumentando las pérdidas de materia orgánica y elementos nutritivos del sitio.

Una silvicultura intensiva, en particular con respecto al balance nutritivo, debe considerar además los costos financieros involucrados con una visión de largo plazo, con el fin de aumentar o mantener la rentabilidad en cada caso. Esto requiere un análisis costo/beneficio proyectado a varias rotaciones (Hagner 1995, Mackensen y Fölster 2000). Entre los principales costos a considerar están los

de cosecha, del manejo posterior de los desechos, del establecimiento de la nueva plantación y de las fertilizaciones que debieran ser realizadas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo a la realización del presente trabajo a los proyectos FONDECYT 1010174 y DID-S-200024 de la Universidad Austral de Chile.

REFERENCIAS

- Álvarez J, J Rodríguez, D Suárez. 1999. Mejoramiento de la productividad de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don, a través de un modelo racional de fertilización. *Bosque* 20(1): 23-36.
- Bonomelli C, D Suárez. 1999. Fertilización del eucalipto. 1. Efecto sobre la acumulación de biomasa. *Ciencia e Investigación Agraria* 26: 1-10.
- Bonomelli C, I Peña, D Suárez. 2002. Contribución de la hojas en el proceso de reciclaje de N y P en *Eucalyptus sp.* *Bosque* 23(1): 61-77.
- CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales, CL). 2001. Estudio agrológico X Región. Descripciones de suelos, materiales y símbolos. Tomo I. Santiago, Chile. Centro de Investigación de Recursos Naturales. 199 p.
- Fox T. 2000. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management* 138: 187-202.
- Frederick DJ, HAI Madgwick, MF Jurgensen, GR Oliver. 1985. Dry matter content and nutrient distribution in an age series of *Eucalyptus regnans* plantations in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science* 15 (2): 158-179.
- Geldres E. 2005a. Exportación de nitrógeno y potasio con la cosecha de *Eucalyptus nitens*. Tesis Magíster en Gestión Ambiental. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 45 p.
- Geldres E. 2005b. Dinámica de fósforo y calcio en *Eucalyptus nitens* de 4 a 7 años en un suelo rojo arcilloso, X Región. Tesis Magíster en Ciencias. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 89 p.
- Geldres E, V Gerding, JE Schlatter. 2006. Biomasa de *Eucalyptus nitens* de 4-7 años de edad en un rodal de la X Región, Chile. *Bosque* 27(3): 223-230.
- Gerding V. 1991. *Pinus radiata*-Plantagen in Zentralchile: Standortfaktoren der Produktivität und Nährstoffverteilung in Beständen. Tesis Dr. Göttingen, Alemania. Forstwissenschaftlichen Fachbereichs. Universität Georg August-Göttingen. 182 p.
- Gerding V, JE Schlatter. 1999. Estabilidad nutritiva de plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en cinco sitios característicos de la VIII Región. *Bosque* 20(2): 107-115.
- Goncalves JL, JL Stape, JP Laclau, P Smethurst, JL Gava. 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management* 193 (2004): 45-61.
- Goya J, J Frangi, F Dalla Tea, MA Marco, F Larocca. 1997. Biomasa, productividad y contenido de nutrientes en plantaciones de *Eucalyptus grandis* en el NE de la provincia

- de Entre Ríos. In XVII Jornadas Forestales de Entre Ríos - Concordia, Argentina. p. III 1-19.
- Hagner S. 1995. Silviculture in boreal forests. *Unasylva* 46(181): 18-25.
- Hunter I. 2001. Above ground biomass and nutrient uptake of three tree species (*Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus grandis* and *Dalbergia sissoo*) as affected by irrigation and fertiliser, at 3 years of age, in southern India. *Forest Ecology and Management* 144: 189-199.
- INFOR (Instituto Forestal, CL). 2004. *Eucalyptus nitens* en Chile: Primera monografía. Santiago, Chile. Instituto Forestal. (Informe Técnico N° 165). 143 p.
- Jones HE, M Madeira, L Herrauez, J Dighton, A Fabião, F González-Rio, M Fernandez Marcos, C Gomez, M Tomé, H Feith, MC Magalhães, G Howson. 1999. The effect of organic-matter management on the productivity of *Eucalyptus globulus* stands in Spain and Portugal: tree growth and harvest residue decomposition in relation to site and treatment. *Forest Ecology and Management* 122: 73-86.
- Laclau JP, JP Bouillet, J Ranger, R Joffre, R Gouma, A Saya. 2001. Dynamics of Nutrient Translocation in Stemwood across an Age Series of a *Eucalyptus* Hybrid. *Annals of Botany* 88: 1079-1092.
- Laclau JP, P Deleporte, J Ranger, JP Bouillet, G Kazotti. 2003. Nutrient Dynamics throughout the Rotation of *Eucalyptus* Clonal Stand in Congo. *Annals of Botany* 91: 879-892.
- Mackensen J, H Fölster. 2000. Cost-analysis for a sustainable nutrient management of fast growing-tree plantations in East-Kalimantan, Indonesia. *Forest Ecology and Management* 131: 239-253.
- Madgwick HAI, P Beets, S Gallagher. 1981. Dry matter accumulation, nutrient and energy content of the above ground portion of 4-year-old stands of *Eucalyptus nitens* and *E. fastigata*. *New Zealand Journal of Forestry Science* 11(1): 53-59.
- Minte A. 2004. Funciones de biomasa y volumen para *Eucalyptus nitens* de cinco años de edad. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 42 p.
- Misra RK, CRA Turnbull, RN Cromer, AK Gibbons, AV LaSala. 1998a. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. I. Biomass. *Forest Ecology and Management* 106: 283-293.
- Misra RK, CRA Turnbull, RN Cromer, AK Gibbons, AV LaSala, LM Ballard. 1998b. Below- and above-ground growth of *Eucalyptus nitens* in a young plantation. II. Nitrogen and phosphorus. *Forest Ecology and Management* 106: 295-306.
- Muñoz F. 2002. Balance nutritivo de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Deane et Maiden) Maiden de 7 años de edad en suelos ñadi. Tesis Ingeniero Forestal. Valdivia, Chile. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 108 p.
- Nyland RD. 2002. Silviculture. Concepts and Applications. Second Edition. New York, USA. McGraw-Hill. 682 p.
- Ouro G, P Pérez-Batallón, A Merino. 2001. Effects of silvicultural practices on nutrient status in a *Pinus radiata* plantation: Nutrient export by tree removal and nutrient dynamics in decomposing logging residues. *Ann. For. Sci.* 58: 411-422.
- Raison RJ, WJB Crane. 1986. Nutritional costs of shortened rotations in plantation forestry. In Gessel SP. ed. Forest site and productivity. Dordrecht, The Netherlands. Martinus Nijhoff. p. 117-125.
- Ringrose C, WA Neilsen. 2005. Growth response of *Eucalyptus regnans* and soil changes following periodic fertilization. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 69: 1806-1812.
- Rodríguez J. 1993. Manual de fertilización. Santiago, Chile. Colección en Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile. 362 p.
- Sankaran KV, TS Grove, S Kumaraswamy, VS Manju, DS Mendham, A M O'Connell. 2005. Export of Nutrients in Plant Biomass Following Harvest of Eucalypt Plantations in Kerala, India. *Journal of Sustainable Forestry* 20(3): 15-36.
- Santana RC, NF De Barros, JCL Neves. 2002. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do Estado de São Paulo. *R. Árvore* (Viçosa-MG) 26 (4): 447-457.
- Schlatter JE, V Gerding, MI Oñate. 1998. Características y variabilidad de sitios con plantaciones adultas de *Pinus radiata* D. Don en suelos graníticos de las Regiones VIII y IX. *Bosque* 19(1): 37-59.
- Schumacher MV y MVW Caldeira. 2001. Biomass estimation and nutrient content of a *Eucalyptus globulus* (Labillardiere) subspecies *maidenii* plantation. *Ciência Florestal* (Santa Maria) 11(1): 45-53.
- Smethurst PJ, AM Herbert, LM Ballard. 2001. Fertilization effects on soil solution chemistry in three *Eucalypt* plantations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 795-804.
- Stape JL, D Binkley, MG Ryan. 2004. *Eucalyptus* production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management* 193: 17-31.
- Suárez DF, PC Bonomelli. 2001. Evolución de la demanda de N, P, K en los tres primeros años de crecimiento de *Eucalyptus nitens* Maiden y *E. globulus* Labill en tres ecosistemas de la VIII Región de Chile. In Proceedings of Simposio IUFRO, Valdivia, Chile. 3-15 Septiembre.
- Yamada M, T Toma, M Hiratsuka, Y Morikawa. 2004. Biomass and potential nutrient removal by harvesting in short-rotation plantations. In Proceedings of Workshops "Site Management and Productivity in Tropical Plantation Forests". Congo, July 2001 and China, February 2003. Edited by Nambiar EKS, J Ranger, A Tiarks, T Toma. CIFOR 2004. 13 p.
- Yost RS, DS DeBell, CD Whitesell, SC Miyasaka. 1988. Early growth and nutrient status of *Eucalyptus saligna* as affected by nitrogen and phosphorus fertilization. *Australian Forestry Research* 17: 203-214.

Recibido: 28.12.06
Aceptado: 28.09.07