

Sustentabilidad en el uso de nutrientes de
plantaciones dendroenergéticas en
dos **suelos marginales** de la Región de Biobío, Chile

Edwin A. Esquivel-Segura¹
Rafael Rubilar-Pons²
Simón Sandoval-Rocha³
Eduardo Acuña-Carmona⁴
Jorge Cancino-Cancino⁴
Miguel Espinosa-Bancalari⁴
Fernando Muñoz-Sáez⁴

Resumen

En plantaciones dendroenergéticas de alta densidad y corta rotación se ha cuestionado su sustentabilidad dada la mayor extracción de nutrientes vía cosechas sucesivas al compararlas con plantaciones forestales tradicionales, especialmente en suelos marginales. Para evaluar los potenciales efectos en la disponibilidad de nitrógeno y fósforo a nivel de suelo y su relación con la biomasa producida, plantaciones dendroenergéticas con las especies *Eucalyptus camaldulensis*, *E. nitens*, *E. globulus*, y *Acacia melanoxylon*: a densidades de 5000,

Abstract

Sustainability in the use of nutrients for dendroenergy plantations in two marginal soils at Biobio Region, Chile

In dendroenergy plantations of high stoking and short rotation has been questioned its sustainability given the higher extraction of nutrients through successive harvests when compared to traditional forest plantations, especially in marginal soils. To assess the potential impact on the availability of nitrogen and phosphorus at ground level and its relation to the biomass produced from

1. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Forestal; Cartago, Costa Rica; edwinesquivel@itcr.ac.cr *Autor de correspondencia

2. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Cooperativa de Productividad Forestal; Concepción, Chile.; rrubilar@ncsfnc.cfr.ncsu.edu

3. Arauco Bioforest, Programa de Caracterización Tecnológica; Concepción Chile; simon.sandoval@arauco.cl

4. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales; Concepción, Chile; edacuna@udec.cl, jcancino@udec.cl, mepinos@udec.cl, fmunoz@udec.cl

Recibido: 17/02/2016
Aceptado: 29/02/2016

7500 y 10000 árboles por hectárea, fueron establecidas en dos sitios de producción forestal marginal en suelos contrastantes, Arenales y Granítico localizados en la Región del Biobío, Chile. Dos evaluaciones anuales durante 4 años mostraron que las densidades más altas de plantación presentaron mayores contenidos de amonio a 0-20 cm de profundidad en sitio Graníticos. Así como los *Eucalyptus* spp. y las densidades mayores presentaron mayores contenidos de nitrato a 20-40 cm de profundidad en el sitio Arenales, donde también la densidad más alta mostró mayores contenidos de fósforo a 0-20 cm de profundidad. Las especies, *A. melanoxylon* y *E. nitens*, que fueron establecidas en ambos sitios, no mostraron eficiencias similares entre los dos sitios evaluados. Nuestros resultados sugieren que plantaciones dendroenergéticas manejadas intensivamente podrían aminorar la disponibilidad de nutrientes del suelo por lo que estos resultados proveen una base para estimar la fertilización requerida para compensar las remociones nutricionales potenciales en los sitios evaluados según la productividad alcanzada y, por otra parte muestran que las eficiencias mostradas por las especies son sitio-específicas.

Palabras clave: bioenergía, sustentabilidad, plantaciones de alta densidad, nitrógeno, fósforo.

Introducción

La biomasa forestal es una fuente de energía renovable que puede ser manejada sustentablemente (Richardson & Verwijst, 2007). Una forma importante de producir biomasa forestal o dendroenergía es a través del desarrollo de plantaciones forestales de rápido crecimiento y rotaciones cortas, específicamente concebidas para la producción de biomasa (Baettig, Yáñez & Albornoz, 2010). Factores como la economía de la producción de la materia prima, la productividad del sitio, las mejoras en las prácticas silvícolas, una adecuada selección del sitio y la densidad de la plantación, así como un control de malezas los primeros años y post cosecha (Kauter, Lewandowski, & Claupein, 2003), aseguran un buen rendimiento de la plantación (Richardson, 2006).

Las cosechas de plantaciones dendroenergéticas, debido a su corta rotación, pueden aumentar la extracción de nutrientes si se les compara con el aprovechamiento de fustes de plantaciones forestales tradicionales. Al mismo tiempo esta reducida frecuencia entre cosechas podría aumentar la compactación de los suelos y la extracción principalmente de nitrógeno y fósforo, entre otros nutrientes, cuando se aprovechan fustes con follaje y corteza (Turner & Lambert, 2008; Volk, Verwijst, Tharakan, Abrahamson & White, 2004). Esto puede afectar negativamente los rendimientos en el corto y mediano plazo (5-30 años) primordialmente en áreas

plantations with *Eucalyptus camaldulensis*, *E. nitens*, *E. globulus* and *Acacia melanoxylon*: at densities of 5000, 7500 and 10000 trees per hectare were established at two sites in marginal forest production in contrasting soils, sands and granitic located in the region of Biobío, Chile. Two evaluations per year for four years showed that higher planting densities had higher ammonium content at 0-20 cm depth in Granitic site. Just as *Eucalyptus* spp. and higher densities had higher nitrate levels at 20-40 cm deep in the Arenales site where the highest density also showed higher levels of phosphorus at 0-20 cm depth. Species, *A. melanoxylon* and *E. nitens*, which were established at both sites showed similar efficiencies between the two sites evaluated. Our results suggest that wood energy intensively managed plantations could reduce the availability of soil nutrients so these results provide a basis for estimating the fertilization needed to compensate for nutrient removal potential sites evaluated according to the productivity achieved and, on the other hand show that efficiencies exhibited by species are site-specific.

Keywords: bioenergy, sustainability, high density planting, nitrogen, phosphorus.

donde el crecimiento es limitado por nitrógeno (Stupak et al., 2007). por lo cual la cosecha de fustes, aún sin remoción de hojas y ramas, podría reducir aún los niveles nutricionales del suelo (Guo, Sims & Horne, 2006).

La sustentabilidad de la producción de plantaciones dendroenergéticas requiere de una adecuada disponibilidad de nutrientes (Kauter et al., 2003). Bajo condiciones de mejor estado nutricional los cultivos dendroenergéticos han demostrado un mayor crecimiento aéreo y radicular, ambos mecanismos permitiendo sendas estrategias para aumentar el carbono secuestrado, y donde las raíces incrementarán el carbono secuestrado a largo plazo en el suelo (Sanchez et al., 2007). Del mismo modo, la tasa de crecimiento de algunas especies de *Eucalyptus* spp. ha mostrado una relación directa con los niveles de nitrógeno y fósforo disponibles (Ares & Fownes, 2000).

Es por ello que estos cultivos dendroenergéticos requieren de una silvicultura intensiva específica al sitio que considere fertilización y control de malezas (Dickmann, 2006) con el objetivo de mantener la rentabilidad, también se podría contribuir con algunas medidas culturales tales como utilizar especies que rebroten, reducir el impacto de maquinaria y evitar la cosecha en la temporada de crecimiento activo para evitar remover follaje de alto valor nutricional que podría reducir la productividad en el largo plazo (Volk et al., 2004).

Similar a lo observado en la forestación tradicional, las plantaciones dendroenergéticas establecidas en suelos con uso pasado agrícola han aumentado los niveles de materia orgánica, la calidad de agua, la microfauna y flora del suelo (Mann & Tolbert, 2000). Sin embargo, estos efectos son sitio-específicos y algunas investigaciones han cuestionado efectos de acidificación y reducción de nutrientes por algunas especies, y posibles interacciones con el sitio, relaciones ecológicas y el impacto de las fertilizaciones requeridas (Turner & Lambert, 2008).

Con el objetivo de evaluar la sustentabilidad nutricional de plantaciones dendroenergéticas, se probó la hipótesis de que cambios en la disponibilidad de nitrógeno y fósforo en el suelo son dependientes de la especie, sitio específicos, y no se ven afectados por la densidad de plantación.

Material y métodos

Características y ubicación de los ensayos

Dos estudios fueron establecidos en agosto de 2007 en la Región del Biobío, Chile en condiciones de suelo sitio contrastantes. El primer sitio de suelos arcillosos (Granítico), localizado a 36° 17' Lat Sur, 72° 22' Long Oeste, presentó una topografía ondulada con pendientes no superiores a 5 % en el área de ensayo. Los suelos corresponden a materiales parentales graníticos pertenecientes a la serie de suelos Cauquenes (Carrasco, Millán, & Peña, 1993), y taxonómicamente son clasificados como Xeralfs (Soil Survey Staff, 2010). Estos suelos se caracterizan por su susceptibilidad a la erosión y bajos niveles de fertilidad. La precipitación promedio anual evaluada durante el período de estudio (2007-2011) en el área fue de 700 mm, con una temperatura promedio anual de 13,2 °C (DGAC. Dirección General de Aeronáutica Civil, 2014). El segundo sitio correspondió a un suelo de clase textural arenosa gruesa (Arenales), localizado a 37° 03' Lat Sur, 72° 11' Long Oeste, que presentó una topografía plana con pendientes menores a 1 %. Las arenas de estos suelos corresponden a materiales de origen andesítico basáltico pertenecientes a la serie Arenales (Carrasco, et al., 1993), y taxonómicamente son clasificados como Psamments (Soil Survey Staff, 2010). Los suelos se caracterizan por presentar un drenaje excesivamente alto y por concentraciones bajas materia orgánica en todo el perfil. La precipitación promedio anual observada durante la duración del estudio en el área fue de 1.100 mm y la temperatura promedio anual fue de 13,0 °C (DGAC. Dirección General de Aeronáutica Civil, 2014).

En ambos predios el uso anterior correspondió a plantaciones de *Pinus radiata* D. Don que fueron cosechadas a los 20 años de edad para el sitio de Arenales y a los 22 años de edad para el sitio Granítico. Posterior a la cosecha de los rodales se procedió a la remoción de tocones y residuos remanentes, para dar paso a una preparación de suelo con subsolado (equipo Caterpillar

D8K) a 80 cm de profundidad y a un distanciamiento de 60 cm. El subsolado fue realizado en direcciones perpendiculares formando un cuadrículado en el terreno. Un control de malezas pre-plantación fue aplicado a superficie completa mediante una mezcla compuesta por 4 kg ha⁻¹ de Glifosato-Roundap Max y 1,5 kg ha⁻¹ de Simazina (Granítico) y 2,5 kg ha⁻¹ de Atrazina (Arenales).

Diseño experimental, especies y densidades

Los ensayos se establecieron con un diseño de bloques completos al azar con 3 réplicas. Las dimensiones de cada bloque fueron 75 m x 75 m (5625 m²), conformado en su interior por nueve unidades experimentales de 25 m x 25 m (625 m²), cada una. Cada unidad experimental consideró una zona de amortiguamiento de al menos 5 metros y una parcela interna de tratamiento de máximo 20 m x 20 m. Los tratamientos consideraron densidades de plantación de 5000 árboles ha⁻¹ (1,41 x 1,41 m), 7500 árboles ha⁻¹ (1,15 x 1,15 m) y 10000 árboles ha⁻¹ (1,00 x 1,00 m) y tres especies por sitio. Las especies evaluadas en el sitio Granítico fueron *Acacia melanoxylon* R.Br., *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh y *Eucalyptus nitens* H. Deane & Maiden; y en el sitio Arenales se consideraron *A. melanoxylon*, *Eucalyptus globulus* Labill y *E. nitens*.

El crecimiento de los árboles fue evaluado en la parcela interna dentro de la unidad experimental. En el sitio Granítico la parcela de medición fue de 49 árboles y, en el sitio Arenales la parcela de medición fue de 45 árboles para *E. camaldulensis* y *E. nitens*, en el caso de *A. melanoxylon* dada una alta mortalidad inicial en los primeros meses de establecimiento fue necesario reformular las parcelas de medición; de esta manera las parcelas de medición fueron de 15 árboles para la densidad de 5000 árboles ha⁻¹, 24 árboles para la densidad de 7500 árboles ha⁻¹ y 30 árboles para la densidad de 10000 árboles ha⁻¹.

Una fertilización post-plantación, realizada a 25 cm del tallo de cada planta, consideró una dosis de 30 g de boronatrocalcita, 150 g de fosfato diamónico y 50 g de sulphomag en el sitio Granítico. En el sitio Arenales la dosis de fertilización aplicada consistió en 25 g de boronatrocalcita, 100 g de fosfato diamónico y 50 g de sulphomag. A los 22 meses se realizó un control de malezas manual sin retirar los residuos del sitio; y a los 30 meses se realizó una segunda fertilización con 260 kg ha⁻¹ de urea y 115 kg ha⁻¹ de boronatrocalcita.

Muestreo y análisis de laboratorio

Muestras de suelo mineral fueron obtenidas a profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm previamente a la preparación del terreno (línea base) y a los 4, 16, 28, y 40 meses de edad mediante un muestreo compuesto (8 puntos de muestreo). Las muestras fueron transportadas a laboratorio y secadas al aire por 24 horas, tamizadas a 2 mm (mesh ATMS N°10) para determinar los porcentajes de suelo, grava y biomasa en la muestra.

Análisis químicos fueron realizados para la determinación de nitrógeno disponible por medio de una extracción de 0,025 M $Al_2(SO_4)_3$ y determinación mediante ión selectivo para nitrato, y con extracción de 2 M KCl y determinación mediante ión selectivo para amonio (Arango Pulgarín & Pérez Naranjo, 2005). La extracción de fósforo disponible fue realizada por medio de 0,5 M NaHCO₃ y determinación mediante espectrofotómetro de UV visible a 800-900 nm (Sadzawka et al., 2006).

Para la estimación de la biomasa de cada tratamiento se procedió a la selección de tres árboles individuales muestra representativos del rango diamétrico de la parcela de tratamiento para cada fecha de muestreo. Los árboles seleccionados fueron obtenidos en el período de invierno a los 11, 36, y 48 meses de edad desde la zona de amortiguamiento de cada parcela de tratamiento. La biomasa seca total por árbol se determinó mediante el pesaje ($\pm 0,01$ g) del fuste, ramas y follaje secados a 105 °C hasta peso seco constante. Para el análisis químico de la biomasa de los árboles una sección del fuste y cinco ramas, seleccionadas sistemáticamente a lo largo del fuste, fueron seleccionadas. Cada componente (fuste, rama y follaje) fue secado de forma separada a 65 °C hasta peso constante, para posteriormente realizar la pulverización de cada muestra. Determinaciones de nitrógeno total de cada muestra fueron realizadas mediante digestión Kjeldahl y determinación vía titulación manual. Determinaciones de fósforo total fueron obtenidas por medio de calcinación a 500 °C, disolución con HCl, y determinación mediante colorimetría con nitro-vanadomolibdato. Todos los análisis fueron realizados acorde a las metodologías descritas por Sadzawka et al. (2007).

Análisis estadístico

Todos los análisis fueron realizados por sitio y por profundidad. Se analizó la homocedasticidad de los datos mediante el test de Bartlett, y la normalidad fue evaluada según el test de Shapiro-Wilks para los residuales de nutrientes, nitrógeno y fósforo, en el suelo y la biomasa. El efecto de la especie y la densidad, así como sus interacciones, fue analizado mediante una ANOVA, para posteriormente separar las medias utilizando el test de Tukey con un 95 % de confianza aplicando el software estadístico SAS Versión 9.1 (SAS-Institute-Inc, 2000).

La eficiencia del uso de los nutrientes se evaluó relacionando la biomasa total y los contenidos totales de nitrógeno y fósforo en la biomasa, este análisis se realizó para cada especie en cada sitio. Posteriormente, mediante la suma extra de cuadrados, la cual se determinó mediante la prueba de *F* de distribución de Fisher (Weisberg, 2005) se compararon las eficiencias en búsqueda de similitudes entre las especies en un sitio o entre la misma especie entre los sitios.

Resultados

Dinámica de nutrientes en suelo

A los 40 meses para la disponibilidad de amonio en el suelo no se observaron interacciones entre especies o densidades aplicadas en las profundidades evaluadas en ninguno de los sitios. Para el sitio Granítico se observó que las densidades de 7500 y 10000 árb ha⁻¹ presentaron un mayor nivel de amonio (7,8 y 11,1 ppm respectivamente) versus 5000 árb ha⁻¹ (5,7 ppm) en la profundidad 0-20 cm (*P* = 0,005). Para la profundidad de 20-40 cm no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos para esta variable. En el sitio de Arenales no se evidenciaron efectos en los niveles de amonio producto de las especies y densidades para ninguna de las profundidades evaluadas (ver Cuadro 1 y Figura 1).

En la disponibilidad de nitrato, a los 40 meses, no se observaron interacciones entre especies o densidades aplicadas en las profundidades evaluadas en ninguno de los sitios. En el sitio Granítico no se evidenciaron efectos en los niveles de nitrato producto de las especies y densidades para ninguna de las profundidades evaluadas. Para el sitio Arenales se observó que las especies *E. nitens* y *E. globulus* presentaron un mayor nivel de nitrato (2,3 y 2,0 ppm respectivamente) versus

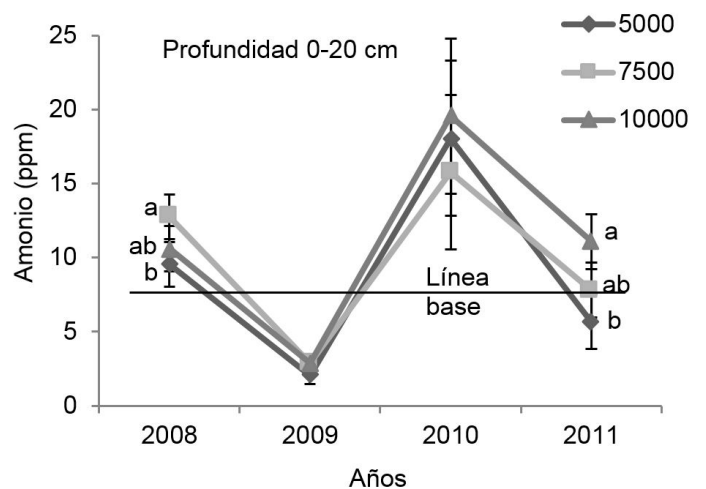


Figura 1. Cambios en la disponibilidad de amonio (ppm) en el tiempo a la profundidad 0-20 cm, para cada una de las densidades (5000, 7500 y 10000 árb ha⁻¹); en el sitio Granítico para todo el periodo observado. Línea base corresponde al nivel de disponibilidad antes del establecimiento de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $\alpha = 0,05$). Barras de error corresponden a intervalos para el test de Tukey.

Figure 1. Changes in the ammonium availability (ppm) in time at 0-20 cm depth for each densities (5000, 7500 and 10000 tre ha⁻¹); in the Granitic site for all noted period. Base line correspond to each available nutrient level before plantation establishment. Different letters are significant differences (Tukey test $\alpha = 0.05$). Error bars correspond intervals for Tukey test.

Cuadro 1. Valores P del análisis de varianza del efecto de los tratamientos y sus interacciones en la concentración de elementos nutricionales analizados en el suelo para el año 2011.

Table 1. P values of variance analysis for the treatments effect and their interactions in the concentration of nutritional elements in the soil analyzed at 2011.

Predio	Prof	Año	Amonio			Nitrate			Fósforo		
			Sp	Den	Sp*Den	Sp	Den	Sp*Den	Sp	Den	Sp*Den
Granítico	0-20	2011	0,076	0,005	0,903	0,290	0,796	0,491	0,773	0,170	0,561
	20-40	2011	0,367	0,691	0,701	0,566	0,405	0,697	0,732	0,207	0,416
Arenales	0-20	2011	0,694	0,069	0,815	0,702	0,205	0,823	0,562	0,007	0,790
	20-40	2011	0,375	0,407	0,283	0,039	0,029	0,405	0,609	0,547	0,367

Prof: Profundidad, Sp: Especie, Den: Densidad, Sp*Den: Interacción Especie x Densidad.

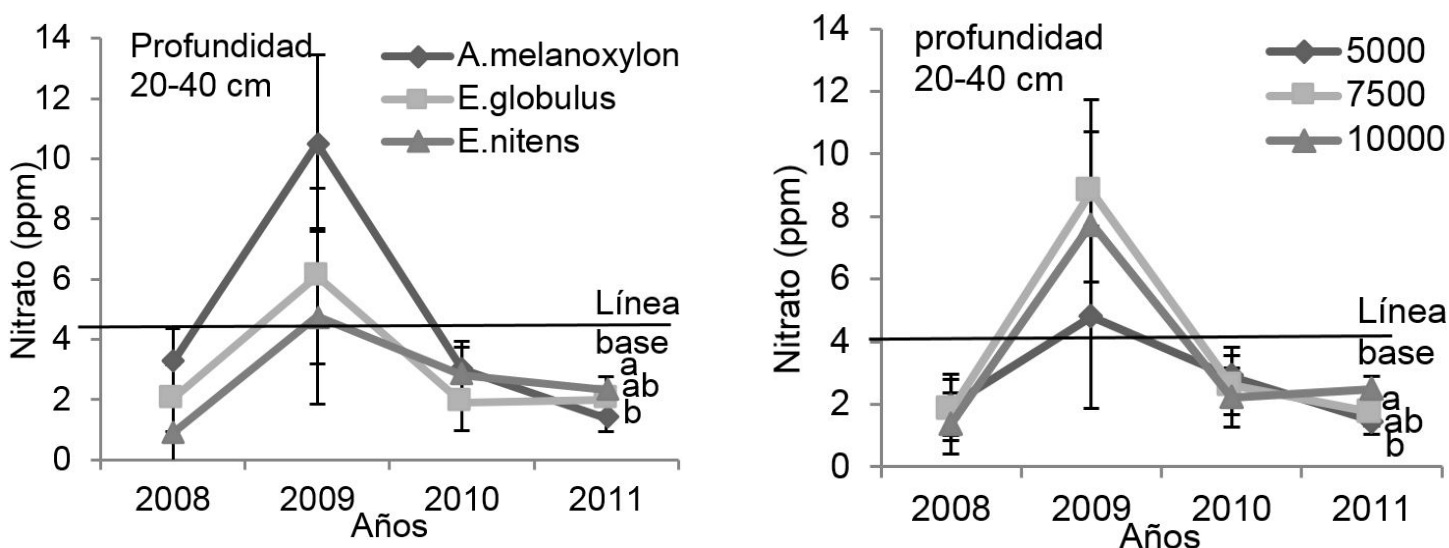


Figura 2. Cambios en la disponibilidad de nitrato (ppm) a la profundidad 20-40 cm para cada una de las especies (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* y *E. nitens*) y densidades (5000, 7500 y 10000 árb ha⁻¹); en el sitio Arenales para todo el periodo observado. Línea base corresponde al nivel de disponibilidad de cada nutriente antes del establecimiento de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $\alpha = 0,05$). Barras de error corresponden a intervalos para el test de Tukey.

Figure 2. Changes in the nitrate availability (ppm) at 20-40 cm depth for each species (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* y *E. nitens*) and densities (5000, 7500 y 10000 tre ha⁻¹); in the Arenales site for all noted period. Base line correspond to each available nutrient level before plantation establishment. Different letters are significant differences (Tukey test $\alpha = 0.05$). Error bars correspond intervals for Tukey test.

A. melanoxylon (1,4 ppm) en la profundidad 20-40 cm ($P = 0,039$). Así mismo las densidades 10000 y 7500 árb ha⁻¹ se presentaron un mayor nivel de nitrato (2,5 y 1,8 ppm respectivamente) versus los 5000 árb ha⁻¹ (1,5 ppm) en la profundidad 20-40 cm ($P = 0,029$). Para la profundidad 0-20 cm no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos para esta variable (ver Cuadro 1 y Figura 2).

que la densidad de 10000 árb ha⁻¹ presentaba un nivel mayor de fósforo (10,0 ppm) versus las densidades 7500 y 5000 árb ha⁻¹ (5,8 y 5,2 ppm respectivamente) en la profundidad 0-20 cm ($P = 0,007$). Para la profundidad 20-40 cm no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos para esta variable (ver Cuadro 1 y Figura 3).

A los 40 meses el fósforo en el suelo no se observaron interacciones entre especies o densidades aplicadas en las profundidades evaluadas en ninguno de los sitios. En el sitio Granítico no se evidenciaron efectos en los niveles de fósforo producto de las especies y densidades para ninguna de las profundidades evaluadas. Para el sitio Arenales se observó

Producto de la fertilización a media rotación se evidenció un aumento en la disponibilidad de nitrógeno en ambos sitios, esto logró evidenciarse 1 año después de aplicada la fertilización la cual aumentó los niveles base (línea base) muestreados en ambos sitios previo al establecimiento del ensayo (ver Figuras 1 y 2).

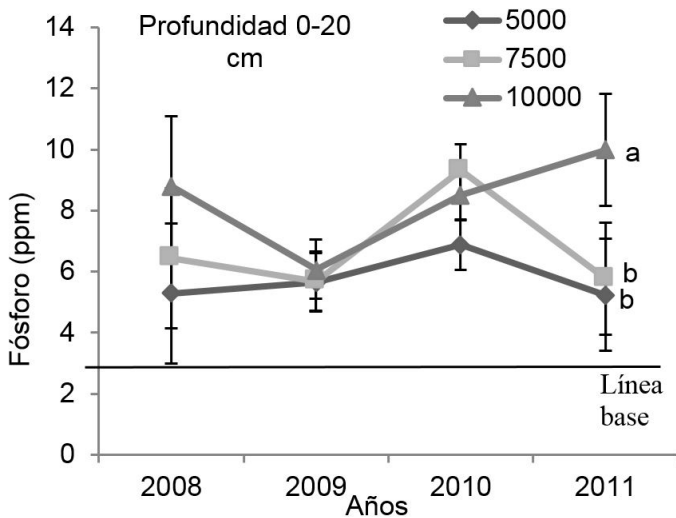


Figura 3. Cambios en la disponibilidad de fósforo a la profundidad 0-20 cm para cada una de las densidades (5000, 7500 y 10000 árb ha⁻¹) en el sitio Arenales para todo el periodo observado. Línea base corresponde al nivel de disponibilidad de cada nutriente antes del establecimiento de la plantación. Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $\alpha = 0,05$). Barras de error corresponden a intervalos para el test de Tukey.

Figure 3. Changes in the phosphorus available at 0-20 cm depth for each densities (5000, 7500 y 10000 tre ha⁻¹) in the Arenales site for all noted period. Base line correspond to each available nutrient level before plantation establishment. Different letters are significant differences (Tukey test $\alpha = 0.05$). Error bars correspond intervals for Tukey test.

Eficiencia nutricional

Nitrógeno

Al comparar las eficiencias en el uso del nitrógeno por parte de las especies en cada sitio se logró observar que la especie que logró acumular más biomasa por unidad de nitrógeno es *A. melanoxyton* en ambos sitios, Granítico y Arenales. Cabe destacar que en el sitio Arenales la relación biomasa total con nitrógeno total *A. melanoxyton* presentó un R^2 de 0,45 causado posiblemente por la mortalidad.

En el sitio Granítico por medio de una prueba F (Weisberg, 2005) solamente se detectó que la especie *E. nitens* no presentó diferencias en la eficiencia del uso del nitrógeno con *A. melanoxyton* ($F=0,46 < F_{\alpha}=0,05; 2; 68=3,15$), por lo que ambas fueron las que mostraron mayor eficiencia en el uso del nitrógeno que *E. camaldulensis*. En el sitio Arenales no se evidenciaron similitudes en la eficiencia del uso del nitrógeno entre las especies ensayadas.

Las especies *A. melanoxyton* y *E. nitens* fueron establecidas en ambos sitios y una comparación de sus eficiencias nutricionales permitió observar cada especie presentó eficiencias distintas entre los sitios (ver Figura 4).

Fósforo

La especie que mostró mayor eficiencia en el uso del fósforo es *A. melanoxyton* en ambos sitios, Granítico y Arenales. Cabe destacar que en el sitio Arenales *A. melanoxyton* presentó un R^2 de 0,59 causado posiblemente por la mortalidad.

En el sitio Granítico por medio de una prueba F (Weisberg, 2005) no se lograron evidenciar diferencias entre *A. melanoxyton* y *E. camaldulensis* ($F = 0,03 < F_{\alpha} = 0,05; 2; 64 = 3,15$). En el sitio Arenales la especie *A. melanoxyton*, no evidenció diferencias ni con *E. globulus* ($F = 0,06 < F_{\alpha} = 0,05; 2; 60 = 3,15$) ni con *E. nitens* ($F = 0,34 < F_{\alpha} = 0,05; 2; 58 = 3,15$).

Las especies *A. melanoxyton* y *E. nitens* fueron establecidas en ambos sitios y una comparación de sus eficiencias nutricionales permitió observar cada especie presentó eficiencias distintas entre los sitios (ver Figura 4).

Discusión

Dinámica nutricional en suelo

El control de malezas y la fertilización puede aumentar la productividad neta de los ecosistemas y el secuestro de carbono, principalmente en terrenos marginales (Johnsen et al., 2001). En el estudio, ambos sitios evidenciaron aumentos en la disponibilidad de nitrógeno producto de las fertilizaciones aplicadas. Los niveles de nitrógeno disponible post-fertilización se mantuvieron por encima de la línea base observados previo al establecimiento del estudio, sin embargo, se observaron reducciones de disponibilidad lo que sugiere la necesidad de fertilizar para asegurar la sustentabilidad de este elemento en este tipo de plantaciones.

La especie *A. melanoxyton* ha mostrado aumentos en los niveles del nitrógeno disponible y este efecto ha sido observado de manera proporcional a la densidad plantada (Power, Thorrold & Balks, 2003). Sin embargo, no se logró apreciar un efecto de la especie en los niveles de nitrógeno disponible del suelo, posiblemente debido a que esta especie no alcanzó un cierre de copas lo que favoreció una alta cobertura de maleza que rondaron un 50 % de cobertura en esta especie y por ende un bajo desarrollo de la especie.

En ambos sitios, Granítico y Arenales, las densidades mayores, 10000 y 7500 árb ha⁻¹, mostraron mayores niveles de nitrógeno disponible a la edad de rotación, como se puede apreciar en las Figura 1 y 2. Este efecto podría estar relacionado con el cierre de copas, que ocurrió primero para estas densidades que para los 5000 árb ha⁻¹, lo que consecuentemente aumentó el aporte de hojarasca que a su vez disminuyó la presencia de malezas. Para obtener biomasa sustentable en plantaciones de alta densidad y corta rotación, como las dendroenergéticas, se debe

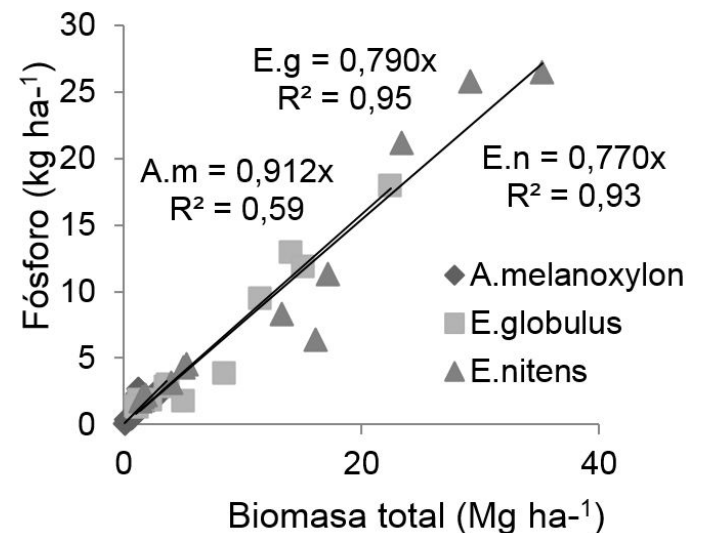
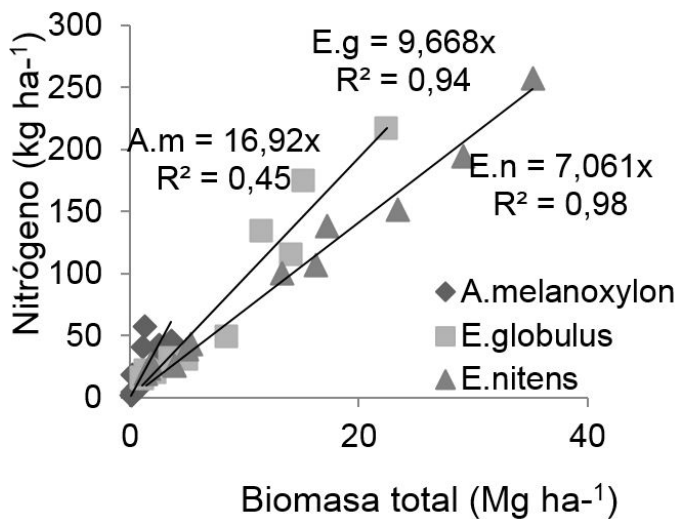
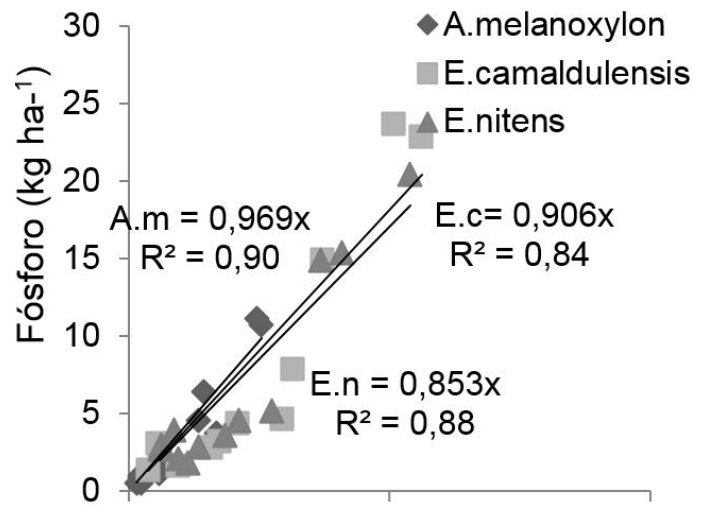
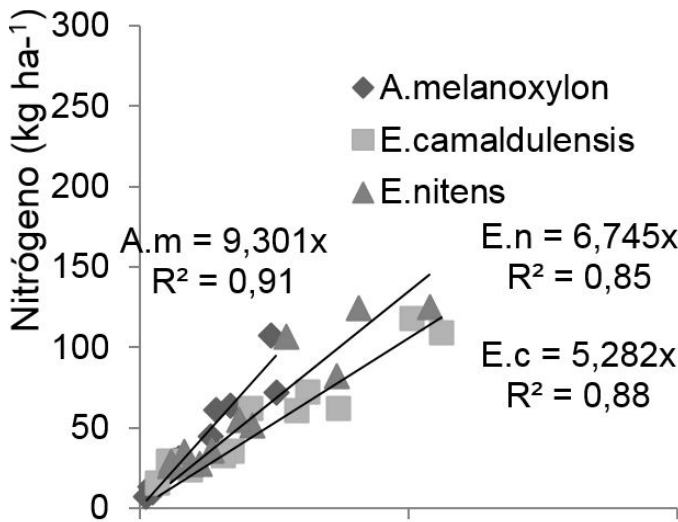


Figura 4. Relación entre nitrógeno y fósforo totales de la biomasa (kg ha^{-1}) y la biomasa total (Mg ha^{-1}) para todas la especies (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* y *E. nitens* en Granítico y, *A. melanoxylon*, *E. globulus* y *E. nitens* en Arenales) en las todas las densidades (5000, 7500 y 10000 árb ha^{-1}) en el sitio de Suelos (a y b) Granítico y (c y d) Arenales.

Figure 4. Relation between total of nitrogen and phosphorus in the biomass (kg ha^{-1}) and total biomass (Mg ha^{-1}) for all species (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* y *E. nitens* en Granítico y, *A. melanoxylon*, *E. globulus* y *E. nitens* en Arenales) in all densities (5000, 7500 y 10000 árb ha^{-1}) in the soil site (a y b) Granítico and (c y d) Arenales.

corregir deficiencias nutricionales, siendo importante también, la selección de la densidad de la plantación y el control de malezas (Mead, 2005).

Se han mostrado altas correlaciones entre los reservorios de nitrógeno del suelo y los niveles de C entre los 0 y 30 cm de profundidad (Sartori, Lal, Ebinger, & Eaton, 2007). Para ambos sitios la elección de mayores densidades de plantación aumentó los niveles de nitrógeno disponible, lo que en el sitio Arenales aumentó lo niveles de carbono a nivel de suelo (Esquivel et al., 2013) esto podría estar relacionado a la mayor disponibilidad de este elemento.

Para el caso del fósforo solamente en Arenales la densidad de 10000 árb ha^{-1} provocó niveles mayores de

fósforo de 0 a 20 cm de profundidad. Está documentado que densidades mayores en varias especies aumentan la productividad a pesar de limitar el diámetro de los árboles (Mead, 2005). Se destaca que la productividad de la plantación a altas densidades está relacionada con la tolerancia que puedan presentar las especies a una alta competencia por recursos (Baettig et al., 2010). La elección de una densidad mayor podría obtener una mayor productividad del sitio, esto podría estar relacionado con un cierre de copas a más corta edad, lo que podría lograr controlar la competencia por malezas de una forma más eficiente he impactar directamente en el rendimiento, la sustentabilidad de los recursos y la captura de carbono.

Eficiencia nutricional

Los contenidos nutricionales analizados en la biomasa corresponden a las temporadas invernales donde el crecimiento se detiene, por lo que podrían ser comparados a los que se extraerían si se realizara una cosecha. Una cosecha en la temporada de crecimiento, entre otros aspectos, podría aminorar la productividad en el largo plazo (Volk et al., 2004) principalmente en suelos marginales donde turnos de rotación más largos podrían aumentar la productividad (Kauter et al., 2003).

*A. melanoxylo*n presentó las mayores eficiencias en el uso tanto de nitrógeno como de fósforo, sin embargo, esta mayor eficiencia no se tradujo en mayor productividad debido a la mortalidad que presentó. Por otra parte *A. melanoxylo*n y *E. nitens*, especies que estaban plantadas en ambos sitios, no mostraron eficiencias similares lo que demuestra que estas plantaciones presentan resultados sitios-específicos como lo mencionan algunos autores (Mead, 2005).

Las eficiencias mayores permitirían obtener mayor productividad con menos recursos, entre los *Eucalyptus*, en el sitio Granítico la especie que presentó mayores eficiencias fue *E. camaldulensis*, y en el sitio arenales fue *E. globulus*, este aspecto puede ser clave en la selección de especies a plantar para dendroenergía así como para conocer la respuesta que estas especies podrían presentar al ser fertilizadas (Safou-Matondo, Deleporte, Laclau & Bouillet, 2005). Esto es más importante aún en este género que tiene una amplia distribución en América Latina.

Existen evidencias de que la remoción de árboles completos afecta negativamente los rendimientos de estas plantaciones en el corto y mediano plazo (5-30 años) principalmente en áreas donde el crecimiento es limitado por nitrógeno (Stupak et al., 2007) por lo que la eficiencia en el uso de nutrientes mostrada por las especies utilizadas en ambos sitios solamente *A. melanoxylo*n y *E. nitens* en el sitio Granítico mostraron una eficiencia igual, por lo que se podría interpretar que cambios en la disponibilidad de este elemento afectará diferentemente a cada una de las especies.

Conclusiones

La densidad de plantación fue un factor determinante en la sustentabilidad de estas plantaciones de alta densidad, debido a que a mayor densidad de plantación la disponibilidad de nitrógeno y fósforo aumentó, lo que podría impactar positivamente el rendimiento y la captura de carbono de estas plantaciones

La especie *A. melanoxylo*n, leguminosa, no logró aumentar los niveles de nitrógeno disponible del suelo, posiblemente debido a que al no cerrar las copas existió siempre bajo el dosel de esta especie una cobertura de malezas.

La eficiencia nutricional que presentaron las especies *E. nitens* y *A. melanoxylo*n cambió entre los sitios evaluados, lo que indica la plasticidad que estas especies tiene como mecanismo para adaptarse a sitios marginales con modificaciones de su eficiencia nutricional.

Agradecimientos

Al programa de doctorado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, al Proyecto INNOVA Biobío N° 06-PC S1-33 por el financiamiento; al Programa de Becas para Estudios de Doctorado para Estudiantes Extranjeros en Chile de CONICYT, Chile; a la beca para estudios de postgrado de la OEA y a la beca del Programa de Formación de Recurso Humano en Ciencia y Tecnología del MICIT, Costa Rica. Al laboratorio de Suelos Nutrición y Productividad Forestal Sustentable, a la Cooperativa de Productividad Forestal y a los compañeros de Chile y Costa Rica por su colaboración incluyendo a el Sr. Luis Castro.

Referencias

- Arango-Pulgarín, G. y Pérez-Naranjo, J. C. (2005). Determinación de nitratos y amonio en muestras de suelo mediante el uso de electrodos selectivos. *Revista Facultad Nacional de Agronomía, Medellín*, 58, 2733-2740.
- Ares, A. & Fownes, J. H. (2000). Productivity, nutrient and water-use efficiency of *Eucalyptus saligna* and *Toona ciliata* in Hawaii. *Forest Ecology and Management*, 139(1-3), 227-236. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00270-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00270-X)
- Baettig, R., Yáñez, M. y Albornoz, M. (2010). Cultivos dendroenergéticos de híbridos de álamo para la obtención de biocombustibles en Chile: estado del arte. *Bosque (Valdivia)*, 31, 89-99.
- Carrasco, P., Millán, J. y Peña, L. (1993). *Suelos de la cuenca del río Bio-Bío: características y problemas de uso* (Universidad de Concepción ed.). Concepción, Chile.
- DGAC. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2014). Dirección meteorológica de Chile. Recuperado de <http://www.meteochile.cl/climas/climas.html>
- Dickmann, D. I. (2006). Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass & Bioenergy*, 30(8-9), 696-705. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.02.008
- Esquivel, E., Rubilar, R., Sandoval, S., Acuna, E., Cancino, J., Espinosa, M. y Muñoz, F. (2013). Efecto de plantaciones dendroenergéticas en el carbono a nivel de suelo, en dos suelos contrastantes de la región de Biobío, Chile. *Revista Arvore*, 37(6), 1135-1144.
- Guo, L. B., Sims, R. E. H. & Horne, D. J. (2006). Biomass production and nutrient cycling in *Eucalyptus* short rotation energy forests in New Zealand: II. Litter fall and nutrient return. *Biomass and Bioenergy*, 30(5), 393-404. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.11.017>

- Johnsen, K. H., Wear, D., Oren, R., Teskey, R. O., Sanchez, F., Will, R., . . . Dougherty, P. M. (2001). Carbon sequestration and southern pine forests. *Journal of Forestry*, 99(4), 14-21.
- Kauter, D., Lewandowski, I. & Claupein, W. (2003). Quantity and quality of harvestable biomass from *Populus* short rotation coppice for solid fuel use - a review of the physiological basis and management influences. *Biomass & Bioenergy*, 24(6), 411-427.
- Mann, L. & Tolbert, V. (2000). Soil Sustainability in Renewable Biomass Plantings. *Ambio*, 29(8), 492-498.
- Mead, D. J. (2005). Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy*, 28(2), 249-266. doi: 10.1016/j.biombioe.2004.08.007
- Power, I. L., Thorrold, B. S. & Balks, M. R. (2003). Soil properties and nitrogen availability in silvopastoral plantings of *Acacia melanoxylon* in North Island, New Zealand. *Agroforestry Systems*, 57(3), 225-237. doi: 10.1023/a:1024838311287
- Richardson, J. (2006). Sustainable production systems for bioenergy: Impacts on forest resources and utilization of wood for energy - Preface. *Biomass & Bioenergy*, 30(4), 279-280. doi: 10.1016/j.biombioe.2005.07.004
- Richardson, J. & Verwijst, T. (2007). Multiple benefits from sustainable bioenergy systems: Proceedings of a joint workshop of IEA bioenergy task 30 and task 31, August 2005, Perth, Western Australia - Preface. *Biomass & Bioenergy*, 31(9), 599-600. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.06.024
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, M. D. L. L. y Neaman, A. (2007). *Métodos de análisis de tejidos vegetales* (segunda edición ed.). Santiago, Chile.
- Sadzawka, A., Carrasco, M. A., Grez, R., Mora, M. D. L. L., Flores, H., y Neaman, A. (2006). *Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile* (Revisión 2006 ed.). Santiago, Chile.
- Safou-Matondo, R., Deleporte, P., Laclau, J. P. & Bouillet, J. P. (2005). Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. *Forest Ecology and Management*, 210(1-3), 193-204. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.049
- Sanchez, F. G., Coleman, M., Garten, C. T., Luxmoore, R. J., Stanturf, J. A., Trettin, C. & Wulschleger, S. D. (2007). Soil carbon, after 3 years, under short-rotation woody crops grown under varying nutrient and water availability. *Biomass & Bioenergy*, 31(11-12), 793-801. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.06.002
- Sartori, F., Lal, R., Ebinger, M. H. & Eaton, J. A. (2007). Changes in soil carbon and nutrient pools along a chronosequence of poplar plantations in the Columbia Plateau, Oregon, USA. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 122(3), 325-339. doi: 10.1016/j.agee.2007.01.026
- SAS-Institute-Inc. (2000). *SAS/STAT User's Guide: Version 8* (Vol. 1, 2 and 3). North Carolina, U.S.A.: SAS Institute Inc.
- Soil Survey Staff. (2010). *Claves para la Taxonomía de Suelos* (M. d. C. G.-C. y E. V. G.-C. Carlos A. Ortiz-Solorio, Trans. 11th ed.). Washington, D.C., United States: Natural Resources Conservation Service: [Supt. of Docs., U.S. G.P.O., distributor].
- Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Kartun, E., Lunnan, A., Mizaraite, D., . . . Tamminen, P. (2007). Sustainable utilisation of forest biomass for energy-possibilities and problems: Policy, legislation, certification, and recommendations and guidelines in the Nordic, Baltic, and other European countries. *Biomass & Bioenergy*, 31(10), 666-684. doi: 10.1016/j.biombioe.2007.06.012
- Turner, J. & Lambert, M. J. (2008). Nutrient cycling in age sequences of two *Eucalyptus* plantation species. *Forest Ecology and Management*, 255(5-6), 1701-1712. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2007.11.038
- Volk, T. A., Verwijst, T., Tharakan, P. J., Abrahamson, L. P. & White, E. H. (2004). Growing Fuel: A Sustainability Assessment of Willow Biomass Crops. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2(8), 411-418.
- Weisberg, S. (2005). *Applied Linear Regression* (3 th ed.). New Jersey, USA: Wiley.