

Potasio y Boro en **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

La biomasa forestal es una fuente de energía renovable que puede ser manejada sustentablemente. Sin embargo, las cosechas sucesivas en plantaciones de alta densidad pueden aumentar la extracción de nutrientes, al compararlas con las plantaciones forestales tradicionales. Por lo anterior, es cuestionable si los conocimientos nutricionales de plantaciones forestales tradicionales podrán ser aplicados en estas plantaciones intensivas. Con el objetivo de evaluar en plantaciones dendroenergéticas la disponibilidad de potasio y boro, en relación con su producción de

Abstract

Potassium and Boron in wood energy plantations, in two marginal soils in the Biobio Region, Chile

Forest biomass is a renewable energy source which can be managed sustainably. However, successive high-density plantations can increase nutrient extraction, when compared with traditional forest plantations. Therefore, it is arguable whether the nutritional knowledge of traditional forest plantations can be applied to these intensive plantations. In order to evaluate the availability of

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

2. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Forestales, Cooperativa de Productividad Forestal; Concepción, Chile; rubilar@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: 10/08/2016
Aceptado: 13/09/2016

biomasa, se establecieron plantaciones de rápido crecimiento, a alta densidad, en cortas rotaciones, para la generación de bioenergía con las especies *Eucalyptus camaldulensis*, *E. nitens*, *E. globulus*, y *Acacia melanoxylon* a densidades de 5000, 7500 y 10000 plantas por hectárea, en dos sitios contrastantes (Granítico y Arenales) y a su vez de producción marginal desde el punto de vista agropecuario en la Región del Biobío, Chile. Después de 4 años de evaluaciones, solamente la densidad de 7500 árb ha⁻¹ evidenció una disponibilidad mayor de potasio en el sitio Granítico a la profundidad de 0-20 cm, se observó una estrecha relación entre los niveles nutricionales foliares y la biomasa total, entre los *Eucalyptus* sp. el más eficiente *E. globulus* y la menos eficiente *E. nitens*. A pesar de que *Eucalyptus* spp. ha mostrado ser más sensible a las deficiencias de boro que otras especies no se observó que las especies o densidades evaluadas mostraran un efecto en los niveles de boro del suelo.

Palabras clave: sustentabilidad, plantaciones de alta densidad, *Eucalyptus* spp., *Acacia melanoxylon*.

Introducción

La biomasa forestal producida en plantaciones dendroenergéticas es una fuente de energía carbono neutral y renovable que puede ser manejada sustentablemente dependiendo de varios factores, entre ellos, la productividad del sitio (Richardson, 2006; Richardson y Verwijst, 2007). Sin embargo, se ha considerado que los terrenos de producción marginal son los que podrían ser más recomendados para producción dendroenergía con el fin de evitar cuestionamiento por la competencia de terrenos que pueden ser utilizados en la producción de primera necesidad. Bajo estas condiciones el manejo nutricional de la plantación y las prácticas silvícolas deben ser balanceadas con el fin de asegurar la sustentabilidad productiva así como evitar las cosechas en la temporada de crecimiento, pues podría aminorar la productividad en el largo plazo (Richardson, 2006; Volk et al., 2004).

Una adecuada selección de la especie y densidad de la plantación son fundamentales en el manejo del balance de uso de nutrientes del sitio (Kauter et al., 2003; Mead, 2005). De esta manera algunos autores indican que la mayor limitación de la productividad de plantaciones dendroenergéticas es presentada por los recursos disponibles del suelo (Mead, 2005). Algunos de los elementos que han mostrado desbalances nutricionales respecto a su capacidad de suplir la demanda son el boro y el potasio. Ambos elementos

potassium and boron in wood energy plantations, with regard to its biomass production; fast-growing, high-density and short rotation wood energy plantations were established using, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. nitens*, *E. globulus* and *Acacia melanoxylon* at stockings of 5000, 7500 and 10000 plants per hectare in two contrasting marginal sites (granitic Arenales) from an agricultural point of view in the Region of Biobio, Chile. After 4 years of evaluation, only the 7500 trees ha⁻¹ stocking showed a greater availability of potassium in the granite site at a depth of 0-20 cm; a close relationship between foliar nutrient levels and total biomass was observed, between the most efficient *E. globulus* and less efficient *E. nitens*. Although *Eucalyptus* spp. have shown to be more sensitive to boron deficiencies than other species, it was not observed an effect on soil boron levels by the species and densities evaluated.

Key words: bioenergy, sustainability, high stoking plantations, *Eucalyptus* spp., *Acacia melanoxylon*.

han evidenciado su importancia en la resistencia a la sequía (Lehto et al., 2010), y además para el caso del potasio se ha apreciado en una mayor longevidad de las hojas afectando procesos de retranslocación y uso de nutrientes (Battie-Laclau et al., 2013; Lehto et al., 2010).

Las cosechas de las plantaciones dendroenergéticas, debido a la frecuencia con que se realizan, pueden aumentar la compactación del suelo (Volk et al., 2004), además de favorecer una alta extracción de nutrientes si se le compara con el aprovechamiento de plantaciones forestales tradicionales. Esto podría afectar los rendimientos de estas plantaciones en el corto y mediano plazo (5-30 años) (Stupak et al., 2007). Específicamente, en el caso de boro, las cosechas forestales logran extraer mayor proporción de este elemento en comparación con otros debido a la acumulación en la madera y la corteza (Lehto et al., 2010).

Para asegurar un buen rendimiento en estas plantaciones, requiere una silvicultura intensiva que incluya fertilización, control de malezas entre otros (Dickmann, 2006). Se ha mencionado que a un mejor estado nutricional de los cultivos forestales de corta rotación permite una mayor captura de carbono sobre y bajo el suelo, siendo el carbono no atmosférico del suelo el que podría ser almacenado a largo plazo (Sanchez et al., 2007). Un adecuado suministro de nutrientes críticos a nivel de suelo en el mediano y largo plazo es fundamental para asegurar un impacto positivo de las plantaciones dendroenergéticas (Mann y Tolbert, 2000).

Con el objetivo de evaluar la sustentabilidad en potasio y boro en plantaciones dendroenergéticas, se estableció un ensayo bajo la hipótesis de que la sustentabilidad de las plantaciones dendroenergéticas está dada por el uso de los recursos, el cual es particular para cada especie y para cada sitio y, no es afectada por la densidad de la 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 et al., 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 de materia orgánica en todo el perfil. La precipitación promedio anual observada durante la duración del estudio en el área fue de 1100 mm y la temperatura promedio anual fue de 13,0 °C (DGAC. Dirección General de Aeronáutica Civil, 2014).

En ambos sitios el uso anterior correspondió a plantaciones de *Pinus radiata* D. Don de 20 años de edad en el sitio Arenales y, 22 años de edad en 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 a 80 cm de profundidad a un distanciamiento de 60 cm entre líneas, mediante un equipo Caterpillar D8K. 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 con 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*, *Eucalyptus camaldulensis* y *E. nitens*; y en el sitio Arenales se consideraron: *A. melanoxylon*, *E. globulus* 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 para todas las especies y, en el sitio Arenales la parcela de medición fue de 45 árboles para *E. camaldulensis* y *E. nitens* y en el caso de *A. melanoxylon* debido a la alta mortalidad presentada en el ensayo las parcelas de medición fueron rediseñadas en los primeros meses para así contar con 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 se realizó a 25 cm del tallo de cada planta utilizando en el sitio Granítico 30 g de Boronatrocalcita, 150 g de Fosfato Diamónico y 50 g de Sulpomag. En el sitio Arenales, la fertilización consistió en 25 g de Boronatrocalcita, 100 g de Fosfato Diamónico y 50 g de Sulpomag. 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 al boleó con 260 kg ha⁻¹ de urea y 115 kg ha⁻¹ de boronatrocalcita.

Muestreo y análisis de laboratorio

Se tomaron muestras de suelo mineral previo 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 obtenidas a profundidades de 0-20 cm y 20-40 cm. Las muestras fueron transportadas al 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 para la determinación de potasio en suelo fueron realizados mediante extracción con 1M de $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ y determinación con espectrofotómetro de emisión atómica. Para el caso del boro se realizó una extracción con 0,01 M de CaCl_2 y determinación con colorimetría con azometina-H (Sadzawka et al., 2006).

Para la estimación de la biomasa aérea se determinó el rango diamétrico en el que se distribuían los árboles en la parcela interna de cada tratamiento para cada fecha de muestreo. Luego se tomó una muestra destructiva de tres árboles por unidad experimental distribuidos en el rango diamétrico y proveniente de la zona de amortiguamiento. Los árboles seleccionados fueron colectados en época invernal, a los 11, 36, y 48 meses de edad. La biomasa total seca 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 se tomó una sección del fuste y cinco ramas, seleccionadas sistemáticamente a lo largo del fuste. Cada componente (fuste, rama y follaje) fue secado de forma separada a 65°C hasta pesos constante, posteriormente cada muestra fue pulverizada. Las determinaciones de potasio y boro total de cada muestra fueron realizadas según las metodologías propuestas por Sadzawka et al. (2007), las determinaciones de potasio se realizaron mediante calcinación a 500°C y disolución con HCl para posteriormente realizar la determinación mediante espectrofotómetro de absorción atómica. El boro se determinó mediante calcinación a 500°C y disolución con HCl y finalmente una determinación mediante colorimetría con azometina-H.

Análisis estadístico de los datos obtenidos

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 cada elemento evaluado en los suelos 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. Todos los análisis fueron realizados con 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 potasio y boro en la biomasa, 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 cuando estuvo presente en ambos sitios.

Resultados

Dinámica de nutrientes en suelo

A la edad de cuatro años no se observaron interacciones entre especie o densidad en las plantaciones establecidas en relación con la disponibilidad de potasio y boro, para las dos profundidades evaluadas, en ninguno de los sitios. Si bien no se observaron deficiencias para los dos primeros años, cambios en la dinámica nutricional del potasio en el suelo producto de las densidades ensayadas fueron observados en el sitio Granítico para la profundidad de 0-20 cm para los dos últimos años (Cuadro 1). En este caso, la densidad de plantación de 7500 árb ha^{-1} presentó mayor nivel de potasio ($0,42 \text{ cmol+ kg}^{-1}$) que las densidad de 5000 y $10000 \text{ árb ha}^{-1}$ (Figura 1).

En el caso del boro, no se evidenciaron diferencias entre los tratamientos de densidad o especie en el tiempo (Figura 1).

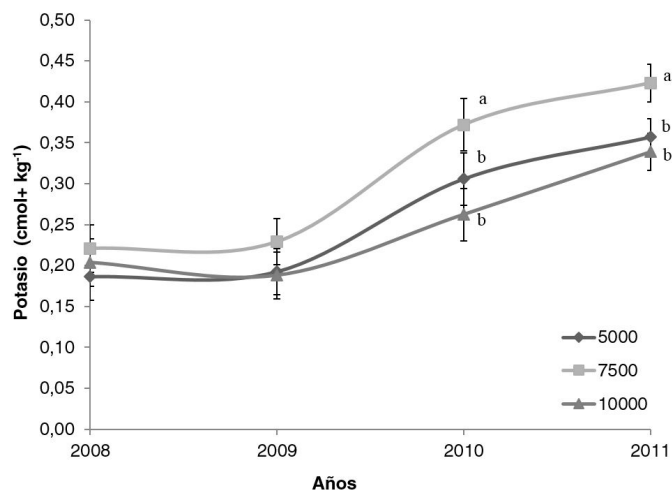


Figura 1. Cambios en los niveles de potasio (cmol+ kg^{-1}) intercambiable en sitio Granítico a la profundidad de 0-20 cm, según densidad (5000 , 7500 y $10000 \text{ árb ha}^{-1}$). Letras distintas indican diferencias significativas (Test de Tukey $\alpha = 0,05$). Barras de error corresponden a la diferencia mínima significativa para el test de Tukey.

Figure 1. Changes in potassium levels (cmol+ kg^{-1}) interchangeable in granitic site at 0-20 cm depth, according density (5000 , 7500 y $10000 \text{ tre ha}^{-1}$). Different letters indicate significant differences (Test de Tukey $\alpha = 0,05$). Error bars correspond to the minimum significant difference test for Tukey's test.

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

Table 1. P values of variance analysis about treatments effect and their interactions in the concentration of nutritional elements analyzed, potassium and boron in the soil, 2011.

Sitio	Profundidad (cm)	Potasio			Boro		
		Sp	Den	Sp*Den	Sp	Den	Sp*Den
Granítico	0-20	0,524	<0,001	0,803	0,344	0,170	0,869
	20-40	0,730	0,123	0,472	0,178	0,578	0,601
Arenales	0-20	0,586	0,239	0,792	0,531	0,732	0,843
	20-40	0,321	0,891	0,748	0,706	0,109	0,794

Sp: Especie; Den: Densidad; Sp*Den: Interacción especie densidad.

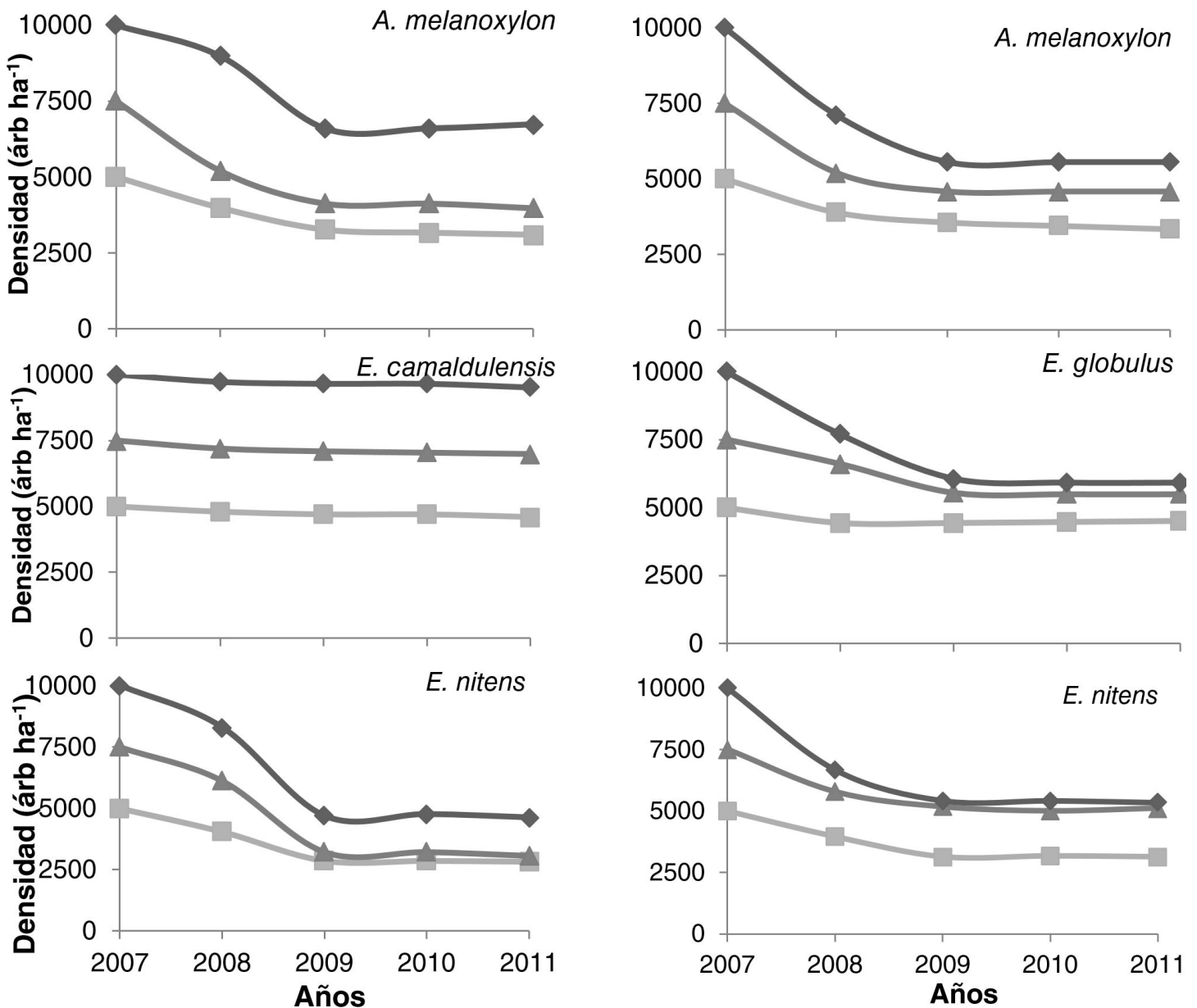


Figura 2. Cambios en la sobrevivencia según especie (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* y *E. nitens*) y densidades (5000, 7500 y 10000 árbores ha⁻¹) en sitios Granítico y Arenales, para cada uno de los años evaluados.

Figure 2. Changes in survival as species (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis*, *E. globulus* and *E. nitens*) and densities (5000, 7500 and 10000 trees ha⁻¹) in Granitic and Arenales sites for each of years evaluated.

Las plantaciones presentaron tasas de mortalidad desde el año 2007 hasta el año 2009, de relativa estabilidad. Sin embargo, tomando en cuenta la sobrevivencia al año 2011, el sitio con menor sobrevivencia fue Arenales con un 67,3 % y en el sitio Granítico sobrevivió el 72,6 % de los árboles plantados. Tanto *E. nitens* como *A. melanoxyton* presentaron una alta mortalidad con valores de sobrevivencias promedio en ambos sitios de 59,9 % y 65,3 % respectivamente. La sobrevivencia varió entre las especies, la que presentó menor sobrevivencia fue *E. nitens* en el sitio Granítico con un 56,2%, y la que presentó mayor sobrevivencia fue *E. camaldulensis* en el mismo sitio con un 95,2 % (Figura 2).

El comportamiento de mortalidad varió entre las especies y los sitios, en *E. camaldulensis* en el sitio Granítico se observó una mortalidad homogénea con un promedio cercano al 5 % en las tres densidades, por otra parte en ese mismo sitio en las especies *A. melanoxyton* y *E. nitens* se observó una mayor mortalidad en las densidad de 7500 árb ha⁻¹ haciendo que esta densidad mostrara densidades reales muy similares a la densidad de 5000 árb ha⁻¹. Por otra parte en el sitio Arenales tanto *E. nitens* como *E. globulus* mostraron una mayor mortalidad en los 10000 árb ha⁻¹ por lo que esta densidad al final de la rotación no logró diferenciarse de los 7 500 árb ha⁻¹, en el año 2011 la diferencia entre estas densidades es menor a 500 árb ha⁻¹. Finalmente la especie *A. melanoxyton* presentó una alta mortalidad similar en todas las densidades con un promedio para este sitio de un 61,1 % (Figura 2).

La relación existente entre la biomasa aérea y las concentraciones de potasio en el suelo mostraron que aunque existe una tendencia que entre más biomasa hay mayor cantidad de potasio, algunos casos de los tratamientos aplicados presentan un comportamiento diferente entre sí. Sin embargo, este efecto no es igual en todas las especies y densidades.

Eficiencia nutricional de potasio

En el sitio Granítico no se presentaron diferencias significativas para las eficiencias nutricionales de las distintas especies evaluadas. De esta manera *A. melanoxyton* y *E. camaldulensis* presentaron eficiencias similares ($F=0,53 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64=3,15$), así como *A. melanoxyton* y *E. nitens* ($F=0,37 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64=3,15$) y *E. camaldulensis* y *E. nitens* ($F=0,24 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64; 64=3,15$). En el sitio Arenales no se presentaron diferencias significativas en las eficiencias nutricionales del uso del potasio para *A. melanoxyton* y *E. globulus* ($F=0,01 < F_{\alpha}=0,05; 2; 60=3,15$) y para *A. melanoxyton* y *E. nitens* ($F=0,31 < F_{\alpha}=0,05; 2; 58=3,15$). Del mismo modo no se evidenciaron similitudes en la eficiencia del uso del potasio entre las especies *E. globulus* y *E. nitens* ($F=20,97 < F_{\alpha}=0,05; 2; 65=3,15$). Al comparar la eficiencia nutricional que mostraron *A. melanoxyton* y *E. nitens*

entre los sitios, no se observaron diferencias significativas en *A. melanoxyton* ($F=0,14 < F_{\alpha}=0,05; 2; 58=3,15$) y si en *E. nitens* ($F=4,49 < F_{\alpha}=0,05; 2; 58=3,15$) (Figura 4).

Eficiencia nutricional de boro

Al realizar las mismas comparaciones para el elemento boro, en el sitio Granítico no presentaron diferencias en eficiencia nutricional entre las especies *A. melanoxyton* y *E. camaldulensis* ($F=1,29 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64=3,15$), pero si para las especies *A. melanoxyton* y *E. nitens* ($F=30,84 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64=3,15$) y *E. camaldulensis* y *E. nitens* ($F=22,35 < F_{\alpha}=0,05; 2; 64=3,15$). Por otra parte en el sitio Arenales ninguna de las especies presentó una diferencia significativa, *A. melanoxyton* y *E. globulus* ($F=0,88 < F_{\alpha}=0,05; 2; 60=3,15$), *A. melanoxyton* y *E. nitens* ($F=0,49 < F_{\alpha}=0,05; 2; 58=3,15$) y *E. globulus* y *E. nitens* ($F=0,10 < F_{\alpha}=0,05; 2; 65=3,15$). Así mismo en la eficiencia nutricional que mostraron *A. melanoxyton* y *E. nitens* entre los sitios no se presentaron diferencias significativas, para *A. melanoxyton* ($F=0,63 < F_{\alpha}=0,05; 2; 58=3,15$), para *E. nitens* ($F < 0,01 < F_{\alpha}=0,05; 2; 68=3,15$) (Figura 4).

Discusión

Dinámica nutricional en suelo

Uno de los cuestionamientos de las plantaciones dendroenergéticas es que el aumento de la frecuencia de los aprovechamientos de la biomasa podría incrementar las extracciones de nutrientes del suelo si se les compara con plantaciones forestales tradicionales (Stupak et al., 2007). Los resultados de este estudio muestran por el contrario que para la disponibilidad del potasio en el suelo se produce un aumento al final de la rotación al compararlo con los niveles muestreados inicialmente. De esta manera para ambos sitios se podría inferir que una aplicación de potasio al establecimiento permitiría cubrir las necesidades nutricionales para la plantación dentro de una primera rotación. Un manejo intensivo de plantaciones dendroenergéticas, debe incluir fertilización ya que es fundamental para aumentar la productividad neta en terrenos marginales como el caso estudiado (Mead, 2005).

Se logró evidenciar un efecto de en la disponibilidad de potasio, en el sitio Granítico, provocado por las densidades utilizadas, siendo la densidad de los 7500 árb ha⁻¹ en la que se observó la mayor disponibilidad. Sin embargo, esta diferencia es solo de una densidad nominal ya que la sobrevivencia general del sitio Granítico rondó el 72,6 %. Es justamente en este sitio donde se observó la menor y mayor sobrevivencia de este ensayo. Esta diferencia estaba relacionada con la especie ya que la especie con mayor sobrevivencia fue *E. camaldulensis* con un 95,2 % en la densidad de 10000 árb ha⁻¹ y la de especie y densidad que presentó

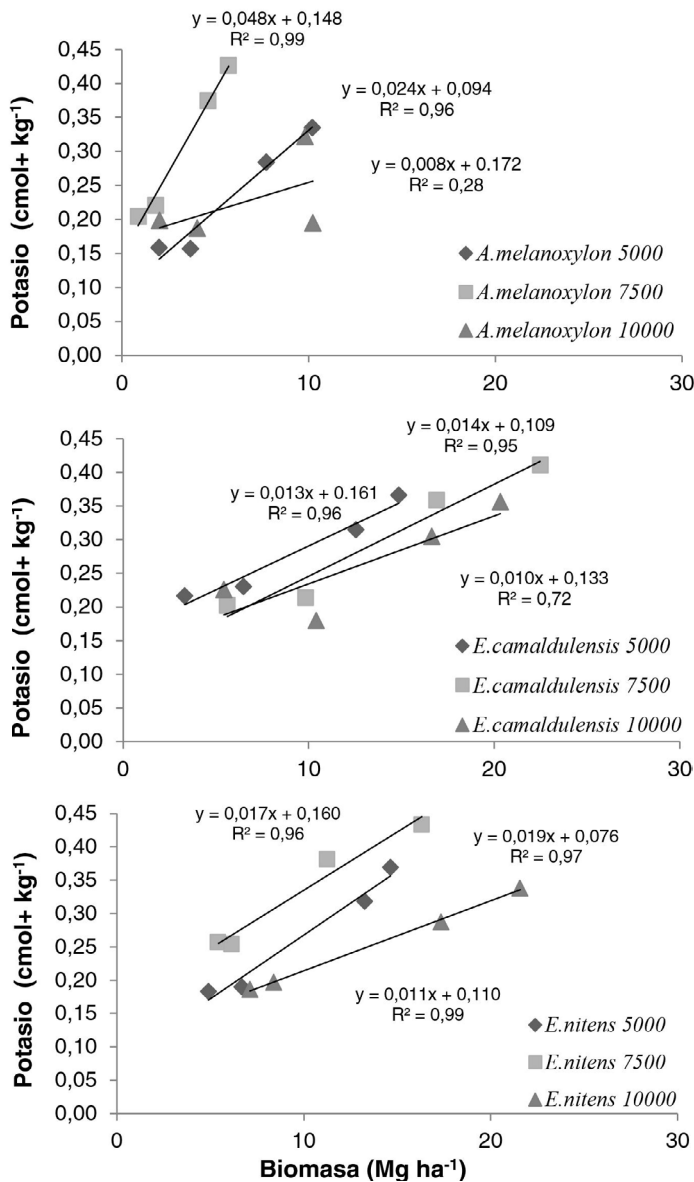


Figura 3. Relación entre biomasa (Mg ha⁻¹) y potasio en suelo (cmol+ kg⁻¹) según especie (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* y *E. nitens*) y densidad (5000, 7500 y 10000 árb ha⁻¹) evaluadas para el sitio Granítico.

Figure 3. Relation between biomass (Mg ha⁻¹) and potassium in soil (cmol+ kg⁻¹) depends on the specie (*Acacia melanoxylon*, *Eucalyptus camaldulensis* and *E. nitens*) and density (5000, 7500 y 10000 árb ha⁻¹) evaluated in the Granitic site.

la menor sobrevivencia fue *E. nitens* con 7500 árb ha⁻¹ con un 40,8 %.

Al relacionar la cantidad de potasio en el suelo con la biomasa producida se puede apreciar que en *E. camaldulensis*, en el sitio Granítico, conforme aumentó la biomasa aumentó la disponibilidad de potasio en los primeros 20 cm de suelo. Pero la menor pendiente es mostrada por la densidad de 10000 árb ha⁻¹ por lo

que aumentar la densidad disminuyó la capacidad de aumentar los niveles de potasio en el suelo a los 4 años; en todas las especies con forme aumentó la densidad disminuyó la capacidad de aumentar los niveles de potasio. Algunos autores indican que mayores densidades de plantación acortan los ciclos productivos pudiendo aumentar los niveles de producción (Dickmann, 2006), sin embargo, altas densidades podría disminuir las concentraciones de este elemento en el suelo por lo que se requeriría de mayores fertilizaciones. Esto muestra la importancia de la selección de la densidad adecuada como uno de los factores claves en el éxito de una plantación dendroenergética (Mead, 2005).

A pesar de que deficiencias de boro en el suelo han mostrado limitar el crecimiento de *Eucalyptus* spp alrededor del mundo y, además este género ha evidenciado una mayor sensibilidad a la deficiencia de este elemento al compararla con otros (Lehto et al., 2010, Sakyá et al., 2002), no se observó que las especies o densidades evaluadas mostraran un efecto en los niveles de boro del suelo, por lo que se podría indicar que las especies ensayadas lograron extracciones similares de este elemento del suelo.

Eficiencia nutricional

La eficiencia nutricional mostrada por todas las especie en el sitio Granítico fue similar para potasio, sin embargo para el boro solamente *A. melanoxylon* y *E. camaldulensis* presentaron eficiencias similares. La eficiencia de estas especies mencionadas fue menor siendo alrededor de un 65% a la mostrada por *E. nitens*. Esto podría sugerir que la respuesta a una fertilización de potasio o boro mostrará mayores incrementos en biomasa en *E. nitens* que la que podrían mostrar *A. melanoxylon* y *E. camaldulensis*, siendo esta información importante para conocer el posible efecto a una fertilización como ya ha sido mencionado por otros autores (Safou-Matondo et al., 2005).

Los efectos de plantaciones dendroenergéticas podrían ser sitio-específicos y algunas investigaciones han cuestionado el impacto de las fertilizaciones requeridas (Turner y Lambert, 2008). La eficiencia en el uso del potasio mostró similitudes entre el sitio Granítico y el de Arenales para *A. melanoxylon* pero no para *E. nitens* por lo que al fertilizar con este elemento, con una misma dosis, podría mostrar un resultado diferente dependiendo de la especie.

Algunas especies de *Eucalyptus* spp han demostrado ser susceptibles al aumento de niveles nutricionales de potasio (Hunter 2001). En este ensayo las eficiencias mostradas por estas especies para *Eucalyptus* spp fueron diferentes solamente en el sitio Arenales, siendo la más eficiente *E. globulus* y la menos eficiente *E. globulus*.

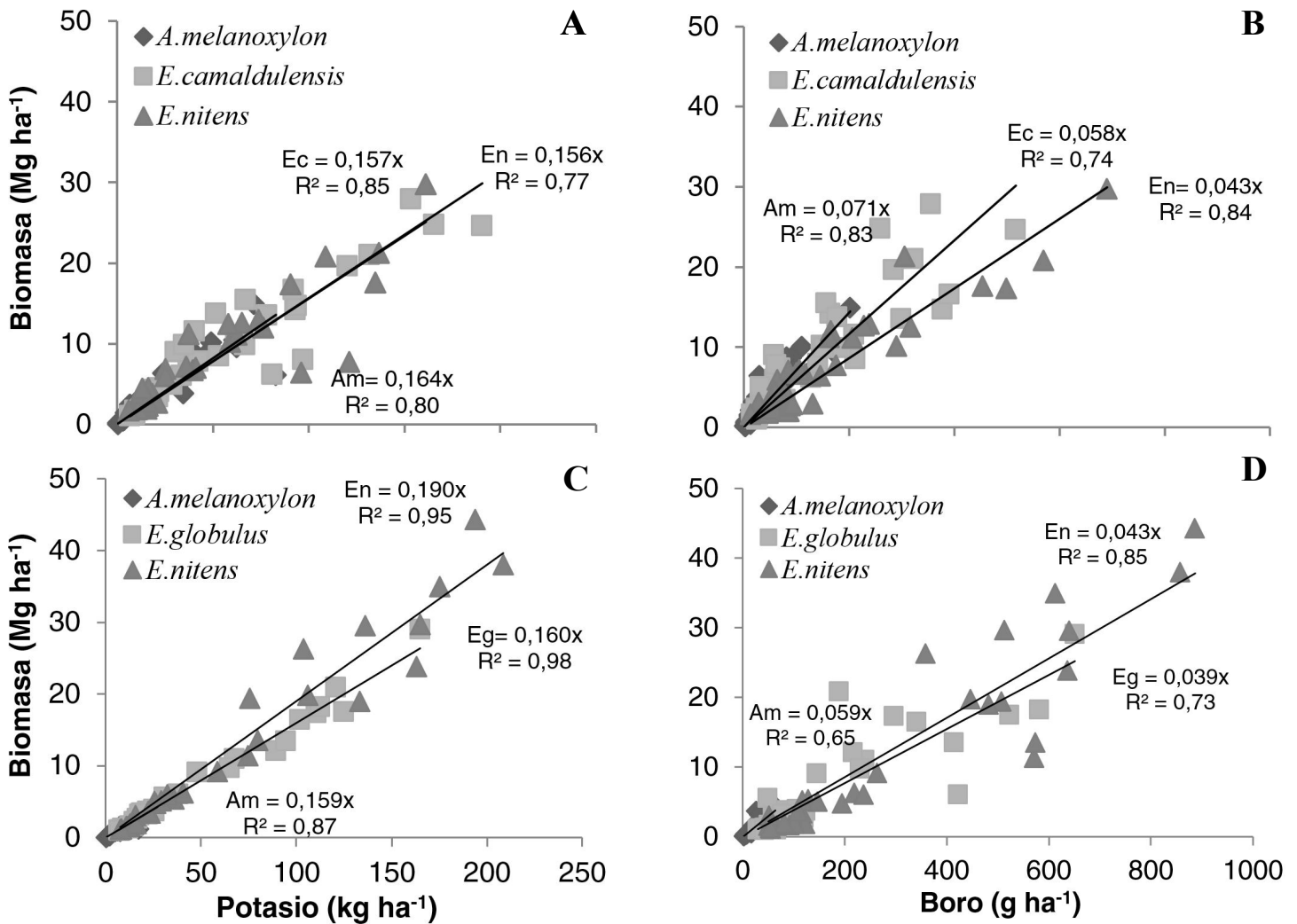


Figura 4. Relaciones de eficiencias nutricionales entre la biomasa total ($Mg\ ha^{-1}$) y el potasio acumulado ($kg\ ha^{-1}$) en sitio Granítico (a) y Arenales (b) y el boro acumulado ($g\ ha^{-1}$) en sitio Granítico (c) y Arenales (d) para las especies *Acacia melanoxylon* (Am), *Eucalyptus camaldulensis* (Ec), *E. globulus* (Eg) y *E. nitens* (En) en las densidades de 5000, 7500 y 10000 árbol ha^{-1} .

Figure 4. Relations of nutritional efficiencies between total biomass ($Mg\ ha^{-1}$) and accumulated potassium ($kg\ ha^{-1}$) in Granitic site (a) and Arenales (b) and accumulated boron ($g\ ha^{-1}$) in Granitic site (c) and Arenales (d) for *Acacia melanoxylon* (Am), *Eucalyptus camaldulensis* (Ec), *E. globulus* (Eg) and *E. nitens* (En) in densities of 5000, 7500 and 10000 tree ha^{-1} .

A pesar de que las deficiencias de boro conllevan a efectos adversos en la productividad en plantaciones de *Eucalyptus* spp, y a su vez se ha demostrado una variabilidad en la respuesta por el genotipo (Konsaeng et al., 2012), en el sitio Granítico se observó diferencia entre los *E. nitens* y *E. camaldulensis* siendo más eficiente *E. nitens*. En el sitio Arenales no se logró evidenciar una diferencia en la eficiencia de los *Eucalyptus* evaluados.

La corrección de deficiencias nutricionales debe ser más acuciosa en plantaciones dendroenergéticas que en las plantaciones tradicionales (Mead, 2005). Los resultados evidenciaron que las especies *A. melanoxylon* y *E. nitens* no mostraron diferencias en la eficiencia nutricional del uso de boro entre los sitios.

El aumento generalizado de potasio en la profundidad 0-20 cm observado en la Figura 1 podría estar relacionado por un lado a la capacidad mostrada por las raíces profundas de *Eucalyptus* spp, las cuales presentan grandes potencialidades en la absorción del potasio (Da Silva et al., 2011) lo por lo que la especie podría estar extrayendo potasio en profundidad y depositándolo, vía hojarasca, en la parte superior del suelo, este sería un motivo por el cual una adecuada preparación de sitio, como la realizada en este caso, podría promover el desarrollo radicular en profundidad siendo esta una estrategia para la obtención de potasio, por los árboles, en estas plantaciones.

Conclusiones

Solamente la densidad de plantación presentó un efecto en el contenido de potasio en el suelo, siendo la densidad con mayores niveles en la disponibilidad de suelo la de 7500 árb ha⁻¹.

La eficiencia de las especies en el uso de nutrientes mostró diferencias entre los sitios para el caso de caso de potasio solamente *E. nitens* evidenció una mayor eficiencia en el sitio Arenales, pero es la menos eficiente en el uso del boro en el sitio Granítico.

Agradecimientos

Al programa de doctorado de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, al Proyecto INNOVA BíoBío N° 06-PC S1-33 por el financiamiento; a la becas 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, y a la Cooperativa de Producción Forestal y a los compañeros por su colaboración especialmente al Señor Luis Castro y a la Ing. Xiomara Murillo Phillips.

Referencias

- Battie-Laclau, P., Laclau, JP., Piccolo, MD., Arenque, BC., Beri, C., Mietton, L., Muniz, MRA., Jordan-Meille, L., Buckeridge, MS., Nouvellon, Y., Ranger, J. & Bouillet, JP. (2013). Influence of potassium and sodium nutrition on leaf area components in *Eucalyptus grandis* trees. *Plant and Soil*, 371,19-35.
- Carrasco, P., Millán, J. 7 Peña. L. (1993). Suelos de la cuenca del río Bío-Bío: características y problemas de uso. Concepción, Chile.
- Da Silva, EV., Bouillet, JP., Goncalves, JLD., Abreu, CH., Trivelin, PCO., Hinsinger, P., Jourdan, C., Nouvellon, Y., Stape, JL. & Laclau, JP. (2011). Functional specialization of *Eucalyptus* fine roots: contrasting potential uptake rates for nitrogen, potassium and calcium tracers at varying soil depths. *Functional Ecology* 25:996-1006.
- DGAC. Dirección General de Aeronáutica Civil. (2014). Dirección meteorológica de Chile. Recuperado de <http://www.meteochile.cl/climas/climas.html>.
- Dickmann, DI. (2006). Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass & Bioenergy*, 30, 696-705.
- 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, 189-200.
- 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, 411-427.
- Konsaeng, S., Sritharathikhun, N., Lordkaew, S., Dell, B. & Rerkasem, B. (2012). Genotypic variation in response to low boron in eucalypt clones. *Southern Forests: a Journal of Forest Science* 74, 159-166.
- Lehto, T., Ruuhola, T. & Dell, B. (2010). Boron in forest trees and forest ecosystems. *Forest Ecology and Management* 260, 2053-2069.
- Mann, L. & Tolbert, V. (2000). Soil Sustainability in Renewable Biomass Plantings. *Ambio* 29, 492-498.
- Mead, DJ. (2005). Opportunities for improving plantation productivity. How much? How quickly? How realistic? *Biomass & Bioenergy* 28, 249-266.
- Richardson, J. (2006). Sustainable production systems for bioenergy: Impacts on forest resources and utilization of wood for energy - Preface. *Biomass & Bioenergy* 30, 279-280.
- 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, 599-600.
- Sadzawka, A., Carrasco, MA., Demanet, R., Flores, H., Grez, R., Mora, MDLL. & Neaman, A. (2007). Métodos de análisis de tejidos vegetales. Santiago, Chile.
- Sadzawka, A., Carrasco, MA., Grez, R., Mora, MDLL., Flores, H. & Neaman, A. (2006). Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Santiago, Chile.
- Safou-Matondo, R., Deleporte, P., Laclau, JP. & Bouillet, JP. (2005). Hybrid and clonal variability of nutrient content and nutrient use efficiency in *Eucalyptus* stands in Congo. *Forest Ecology and Management*, 210, 193-204.
- Sakya, AT., Dell, B. & Huang, L. (2002). Boron requirements for *Eucalyptus globulus* seedlings. *Plant & Soil*, 246, 87-95.
- Sanchez, FG., Coleman, M., Garten, CT., Luxmoore, RJ., Stanturf, JÁ., Trettin, C. & Wullschlegel, SD. (2007). Soil carbon, after 3 years, under short-rotation woody crops grown under varying nutrient and water availability. *Biomass & Bioenergy*, 31, 793-801.
- SAS-Institute-Inc. (2000). SAS/STAT User's Guide: Version 8. North Carolina, U.S.A. SAS Institute Inc.
- Soil Survey Staff. Claves para la Taxonomía de Suelos. Washington, D.C., USDA, Natural Resources Conservation Service: Supt. of Docs., U.S. G.P.O..
- Stupak, I., Asikainen, A., Jonsell, M., Karlton, E., Lunnan, A., Mizaraite, D., Pasanen, K., Parn, H., Raulund-Rasmussen, K., Roser, D., Schroeder, M., Varnagiryte, I., Vilkriste, L., Callesen, I., Clarke, N., Gaitnieks, T., Ingerslev, M., Mandre, M., Ozolincius, R., Saarsalmi, A., Armolaitis, K., Helmsaari, HS., Indriksons, A., Kairiukstis, L., Katzensteiner, K., Kukkola, A., Ots, K., Ravn, HP. & 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, 666-684.

Turner, J. & Lambert, M.J. (2008). Nutrient cycling in age sequences of two Eucalyptus plantation species. *Forest Ecology and Management* 255, 1701-1712.

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, 411-418.

Weisberg, S. (2005). *Applied Linear Regression*. New Jersey, USA. Wiley.