

Evaluación de la aplicación de biosólidos en plantaciones de *Eucalyptus globulus*, en Chile central

Monitoring of biosolid application trials in *Eucalyptus globulus* plantation, in Central Chile

Sergio Donoso, Karen Peña-Rojas, Evelyn Galdames, Cristián Pacheco, Claudia Espinoza, Sergio Durán, Rodrigo Gangas

Originales: *Recepción*: 19/08/2015 - *Aceptación*: 23/03/2016

RESUMEN

La fertilización con biosólidos es una alternativa para la utilización benéfica de residuos generados por las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS). En este contexto, es necesario conocer su efecto en plantaciones forestales. El estudio se efectuó en dos plantaciones de *Eucalyptus globulus* (eucalipto) en la Región Metropolitana de Santiago: 1) plantación de 12 años sin intervenciones silvícolas; 2) monte bajo con rebrotes de 2 años con múltiples vástagos por cepa. En ellas se ensayaron tres montos de aplicación de biosólidos: T0 (adición de 0 Mg ha⁻¹), T30 (30 Mg ha⁻¹), T50 (50 Mg ha⁻¹). En cada plantación se evaluó, en un período de cuatro años, crecimiento en diámetro, potencial hídrico y contenido hídrico relativo a prealba, y estado nutricional foliar de los árboles durante dos años. El principal resultado corresponde al mejoramiento de la condición hídrica de árboles fertilizados con biosólidos, en la plantación adulta. El sector de monte bajo no presentó diferencias significativas en las variables evaluadas, al provenir de rebrotes de cepas cosechadas, teniendo una raíz desarrollada que suministra agua y nutrientes a rebrotes nuevos.

Palabras clave

fertilización • potencial hídrico a prealba • crecimiento • monte bajo

Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza, Departamento de Silvicultura, Santa Rosa N° 11.315, Santiago, Chile.
Casilla 9206. sedonoso@uchile.cl

ABSTRACT

Fertilization with biosolid is an option for beneficial use of waste generated from wastewater treatment plant. At this point of view, it is necessary know its effect in forest plantations. The study was established in two sectors with plantations of *Eucalyptus globulus* (blue gum), in the Región Metropolitana de Santiago: 1) 12 years old plantation, without silvicultural interventions; 2) coppice 2 years old, with multiple sprouts by stump. Were evaluated three amounts of biosolids applications: T0 (addition of 0 Mgha⁻¹), T30 (30 Mgha⁻¹), T50 (50 Mgha⁻¹). In each plantation diameter growth, predawn water potential and relative water content during four years and leaf nutritional status of the trees during two years were measured. The main results showed the improvement in the predawn water potential of trees fertilized with biosolids in the 12 years old plantations. The sector of coppice showed no significant differences in the variables evaluated, as this comes from shoots of harvested stools, taking lots of root mass which provides water and nutritional requirements for the trees.

Keywords

fertilization • predawn water potential • growth • coppice

INTRODUCCIÓN

Los lodos o biosólidos, son un subproducto originado durante el proceso de depuración de las aguas residuales (15). El almacenamiento de estos residuos, producto de su gran volumen, se ha convertido en un problema para las Plantas de Tratamiento de Aguas Servidas (PTAS) en diferentes regiones del mundo (13). Por ejemplo, en la Región Metropolitana de Santiago de Chile, la generación de biosólidos alcanza actualmente los 75.555 Mg día⁻¹ (7). El uso de los desechos orgánicos, como fuente complementaria de nutrientes, parece ser una alternativa viable para dar solución a la problemática del almacenamiento de estos residuos (18).

Según *Environmental Protection Agency* (EPA) (12), los biosólidos pueden servir como una alternativa, o sustituto, a los costosos fertilizantes químicos. En general, permiten mejorar la disponibilidad de nutrientes, que en algunas ocasiones están ausentes o en cantidades

mínimas. Una tonelada de lodo puede contener alrededor de 30 kg de N, 15 kg de P y 5 kg de K (1). Asimismo, su aplicación puede mejorar características del suelo, como textura y capacidad de absorción de agua, lo que produciría condiciones más favorables para el crecimiento y desarrollo de raíces de las plantas (32, 35).

A nivel internacional, las investigaciones poseen más de 20 años de experiencia en el uso agrícola y forestal de biosólidos, y otros fertilizantes orgánicos, además de su aplicación en suelos degradados (2, 6, 8, 15, 16, 19, 21, 23, 24, 26, 28, 32, 34, 35, 36, 38, 39).

Sin embargo, en Sudamérica, las experiencias no han demostrado categóricamente el uso benéfico de biosólidos en plantaciones forestales (3, 4, 7, 25, 30, 31, 32, 37). Por ejemplo, en Argentina, se han realizado estudios aplicando compost de biosólidos en la producción de plantaciones de *Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic.

Serm. & Bizzarri (ciprés de la cordillera), aumentando la altura, diámetro, biomasa aérea y biomasa radicular de los ejemplares estudiados (5).

En el caso de Chile, existen estudios realizados en la Región Metropolitana sobre la calidad de los biosólidos que se generan, su continuidad, viabilidad y dosis adecuadas, describiendo su aplicación en suelos agrícolas (4), siendo necesario ampliar estas experiencias al ámbito forestal (2).

En el marco de lo anteriormente expuesto, se plantea como hipótesis que la adición de biosólidos mejora el estado nutricional, el crecimiento en los árboles y la disponibilidad hídrica en el suelo.

Objetivo

Evaluar la respuesta en crecimiento, estado hídrico y estado nutricional de dos plantaciones de *Eucalyptus globulus*, en dos estados de desarrollo (juvenil y adulto), fertilizadas con biosólidos, en la zona central de Chile.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona central de Chile se caracteriza por presentar un clima mediterráneo, con precipitaciones concentradas en los meses de invierno. La temperatura media anual es de 13,9°C. El mes más cálido corresponde a enero, alcanzando una temperatura media de 22,1°C, y el mes más frío corresponde a julio con 7,7°C. La precipitación media es de 312,5 mm (9).

En la cordillera de La Costa, el relieve es suavemente ondulado, con pendientes que varían de 5 a 20%.

Los suelos corresponden a depósitos aluviales, meteorizados en una matriz de textura franco arcillosa, donde presentan

condiciones ligeramente ácidas (particularmente en el predio El Patagual), que favorecen tanto la solubilidad de los elementos traza metálicos como del fósforo.

Las plantaciones forestales en la zona corresponden principalmente a especies exóticas del género *Eucalyptus*, destacando *Eucalyptus globulus* Labill. (eucalipto).

En el año 2007 se seleccionaron dos plantaciones de *E. globulus*, ubicadas en la cordillera de La Costa de la Región Metropolitana de Santiago (figura 1, pág. 110) y distanciadas 7 km una de otra.

En el predio Peñuelas, presenta una clara influencia marina y mejores condiciones pluviométricas y de suelo que el predio Patagual, que presenta una menor influencia marina y un efecto de sombra de lluvia que se incrementa en dirección este.

Al inicio del estudio, la plantación situada en el predio Patagual tenía 12 años de edad y no había sido sometida a intervenciones silvícolas. Presentaba una altura media de 12,4 m, un área basal de 8,9 m² ha⁻¹ y 762 árboles ha⁻¹. La otra plantación (Predio Peñuelas), fue cosechada el año 2005 y al inicio del ensayo se presentaba como un monte bajo, con 1.978 vástagos ha⁻¹ que alcanzaban una altura media de 6,6 m y un área basal de 3,5 m² ha⁻¹ (figura 2, pág. 110).

Se establecieron los ensayos en marzo del año 2007. En cada una de las plantaciones se seleccionó dos sectores homogéneos de cinco hectáreas, para realizar la aplicación de biosólidos. Estos, en mayo de 2007, fueron depositados en zanjas de 30 cm de profundidad por 60 cm de ancho aproximadamente, entre las hileras de plantación. Se utilizó lodos digeridos y estabilizados, con una humedad promedio de 30%, provenientes de la planta de tratamientos de aguas servidas El Trebal, Región Metropolitana de Santiago (tabla 1, pág. 111).



Figura 1. Ubicación de los sitios de muestreo.

Figure 1. Location of sampling sites.



Figura 2. A la izquierda, vista plantación en predio Patagual y a la derecha, vista de plantación en predio Peñuelas, luego de la aplicación de biosólidos.

Figure 2. On the left, view Patagual plantation and right view of Peñuelas plantation, after biosolids application.

Tabla 1. Composición química de los lodos (año 2007).
Table 1. Chemical composition of the sludge (year 2007).

Categoría	Variable	Unidad	Planta El Trenal	Concentración máxima permitida (Conama)
Caracterización básica	Conductividad eléctrica (suspensión biosólido-agua)	dS m ⁻¹	7,8	-
	pH (1-2,5)	-	6,8	-
	Materia orgánica	%	42	-
	Relación C/N	-	7,0	-
	Nitrógeno total (N)	%	3,5	-
	Nitrógeno disponible (N)	mg kg ⁻¹ (ppm)	2140 (1)	-
	Fósforo total (P)	%	2,3	-
	Fósforo disponible (P)	mg kg ⁻¹	580 (1)	-
	Potasio total (K)	%	0,3	-
	Potasio disponible (K)	mg kg ⁻¹	2463 (2)	-
Macronutrientes	Calcio total (Ca)	%	2,3 a 5,5 (3)	-
	Azufre total (S)	%	0,27 (1)	-
	Magnesio total (Mg)	%	0,5 a 1 (3)	-
	Hierro (Fe)	mg kg ⁻¹	27000 (1)	-
	Manganeso (Mn)	mg kg ⁻¹	547 (1)	-
	Zinc (Zn)	mg kg ⁻¹	1.484	2000
	Cobre (Cu)	mg kg ⁻¹	624	1000
	Boro (B)	mg kg ⁻¹	-	-
	Molibdeno (Mo)	mg kg ⁻¹	17,3 (1)	10
	Cloro (Cl)	mg kg ⁻¹	-	-
Elementos beneficiosos para las plantas (4; contenido total)	Níquel (Ni)	mg kg ⁻¹	67	80
	Sodio (Na)	mg kg ⁻¹	1200 (1)	-
	Selenio (Se)	mg kg ⁻¹	3,1	50
	Cromo (Cr)	mg kg ⁻¹	274 (3)	-
	Arsénico (As)	mg kg ⁻¹	13	20
Elementos no esenciales para las plantas (5; contenido total)	Cadmio (Cd)	mg kg ⁻¹	2,7	8
	Plomo (Pb)	mg kg ⁻¹	56	300
	Mercurio (Hg)	mg kg ⁻¹	1,3	4

(1) Valores referenciales tomados de González, 2005 / (1) Reference values indicated by González, 2005.

(2) Valor referencial de acuerdo con el porcentaje de disponibilidad calculado a partir de González, 2005 / (2) Reference value according to availability percentage calculated from González, 2005.

(3) Valores referenciales tomados de Arata, 2005 / (3) Reference values indicated by Arata, 2005.

Se estableció un dispositivo experimental con un diseño de bloques al azar. En cada plantación se delimitaron tres bloques, con tres parcelas de tratamiento de 400 m² en cada uno de los bloques. Se estableció un tratamiento control (T0) con aplicación de 0 Mg ha⁻¹ de biosólidos, y dos tratamientos, T30 y T50, con dosis de 30 Mg ha⁻¹ y 50 Mg ha⁻¹ de biosólidos respectivamente, donde su base se fundamenta en las restricciones de la normativa chilena y europea.

Al término del período estival (marzo), las variables evaluadas correspondieron a:

- Crecimiento en diámetro a la altura del pecho (DAP), que se evaluó a todos los árboles utilizando una cinta diamétrica con precisión al milímetro (mm).

- Estado hídrico de los árboles mediante el potencial hídrico (Ψ) y contenido hídrico relativo (CHR) a prealba. Se seleccionó cuatro árboles por parcela, de alturas similares, a los que se les colectó un brote por árbol con al menos tres hojas sanas, completamente desarrolladas del tercio superior de la copa y de características similares en cuanto al tamaño, tanto en mayo del 2007 (sin aplicación de biosólidos) como en mayo 2008 (con aplicación de biosólidos).

La medición del potencial hídrico se efectuó a prealba mediante una bomba de presión de tipo Scholander para evaluar el potencial agua en el xilema. Posteriormente, los brotes se pesaron en terreno (peso fresco), y luego fueron guardados en oscuridad, en frascos herméticos con agua destilada a 4°C por 24 horas, para así obtener el peso hidratado.

Finalmente, los ramillos se secaron en una estufa de aire forzado a 65°C, hasta alcanzar un peso constante, determinando el peso seco.

El cálculo del contenido hídrico relativo (CHR) responde a la siguiente ecuación:

$$\text{CHR (\%)} = 100 * (\text{Peso Fresco} - \text{Peso Seco}) / (\text{Peso Hidratado} - \text{Peso Seco})$$

Estado nutricional foliar

Se colectaron 100 gramos de hojas frescas (unas 80-100 hojas), provenientes del tercio superior de tres árboles dominantes originales, por tratamiento, durante los meses de mayo 2007 y 2008. Una vez secas, las muestras fueron enviadas al laboratorio de análisis foliar en el Centro Regional La Platina del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), en el cual se determinó la concentraciones de Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Zinc, Magnesio, Calcio y Cobre.

Todas las evaluaciones se repitieron anualmente hasta el año 2010, excepto el estado nutricional de las hojas.

El análisis estadístico de los resultados del ensayo se realizó mediante un análisis de medidas repetidas para los incrementos diametrales, considerando como covariable el DAP inicial (marzo 2007) y con un $\alpha = 0,05$.

Para el potencial hídrico, contenido hídrico relativo a prealba y el estado nutricional foliar se utilizó como covariable los parámetros iniciales de las variables analizadas.

En el caso de existir diferencias, se utilizó la prueba de comparaciones múltiples de medias de Duncan para evaluar la significancia de estas. Cada predio y ensayo se analizó de forma independiente.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Crecimiento en diámetro

El análisis del crecimiento diametral, mediante la evaluación de los incrementos en área basal (Gha) en el período mayo 2007 - mayo 2010, en ambos predios, no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (tabla 2, pág. 113).

Tabla 2. Valores medios de incrementos en área basal (Gha) entre mayo 2007 y mayo 2010, para cada plantación.

Table 2. Average values of increases in basal area (Gha) among may 2007 and may 2010, for each plantation.

Tratamiento (Toneladas de biosólidos aplicados por hectárea)	Incremento Gha (m ² ha ⁻¹) entre 2007 y 2010	
	T0 (0 Mg ha ⁻¹)	5,1 a
T30 (30 Mg ha ⁻¹)	7,3 a	2,7 a
T50 (50 Mg ha ⁻¹)	5,6 a	0,7 a

Letras distintas indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$), entre tratamientos de una misma plantación.

Different letters indicate significant differences ($\alpha= 0.05$), among treatments of the same plantation.

Los resultados se pueden atribuir a que los elementos aplicados en los biosólidos se liberan de forma lenta y gradual, pudiendo ser utilizados por las plantas en las distintas fases de su crecimiento (6, 36).

Investigadores neozelandeses sugieren un tiempo mínimo de estudio de cuatro años para determinar respuestas nutricionales en aplicaciones de biosólidos en plantaciones forestales (31). Es así como en Australia, la aplicación de biosólidos en un rodal de *Pinus radiata* D. Donde 21 años, generó incrementos en volumen que van de 12 a 42%, los cuales fueron visibles solo a partir del tercer año desde su aplicación (2).

También existen estudios en plantaciones forestales de *Pinus taeda* L. y *P. radiata*, que revelan considerables aumentos en DAP, altura y volumen hasta siete años después de la aplicación de biosólidos (8, 38).

De igual forma un ensayo realizado en la zona mediterránea de Valencia, con aplicación de biosólidos en brinzales de *Pinus halepensis* Mill, presentó, transcurridos tres años, incrementos significativos del diámetro basal con la dosis 30 Mg ha⁻¹ (16).

En ambos predios, T30 muestra incrementos mayores con respecto a los otros tratamientos, donde sin ser estos estadísticamente significativos, establece una tendencia de mejores resultados.

Estado hídrico

La evaluación del potencial hídrico y el contenido hídrico relativo a prealba, permitieron determinar el grado de restricción hídrica de las plantaciones estudiadas en la época de mayor estrés ambiental.

La condición inicial de los tratamientos en el predio Patagual (antes de la aplicación de biosólidos) presentó, durante la medición del año 2007, un mejor estado hídrico en el tratamiento control (T0) en comparación con los otros (T1 y T2) (tabla 3, pág. 114). Durante la medición del año 2008, se observó que el tratamiento control fue el que presentó la condición hídrica más deficitaria (-3,42 Mpa), y el tratamiento con aplicación de 50 Mg ha⁻¹ fue el que presentó el mejor estado hídrico (-2,75 Mpa), con un 83% de CHR (tabla 4, pág. 114).

Tabla 3. Valores medios de potencial hídrico a prealba (Ψ) por tratamiento de aplicación de biosólidos, en ambas plantaciones.**Table 3.** Average values of predawn water potential (Ψ) by treatment of biosolids application, in each plantation.

Año Tratamiento	Potencial hídrico a prealba (Ψ) (Mpa)							
	Predio Patagual				Predio Peñuelas			
	2007	2008	2009	2010	2007	2008	2009	2010
T0 (0 Mg ha ⁻¹)	-2,99 a	-3,42 b	-2,81 b*	-2,48 a	-1,25 a*	-1,77 a	-1,35 a	-1,73 ab
T30 (30 Mg ha ⁻¹)	-3,29 ab	-3,19 b	-2,68 ab*	-2,42 a	-1,47 b*	-1,95 a	-1,52 a	-1,85 a
T50 (50 Mg ha ⁻¹)	-3,59 b	-2,75 a	-2,38 a*	-2,17 a	-1,48 b*	-2,00 a	-1,52 a	-2,04 b

Letras distintas indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$), entre tratamientos de un mismo año. Letras con asterisco (año 2007) corresponden a diferencias se presentan con $\alpha = 0,10$.

Different letters indicate significant differences ($\alpha = 0.05$) among treatments of the same year. Letters with asterisks (2007 year), differences occur with $\alpha = 0.10$.

Tabla 4. Valores de contenido hídrico relativo (CHR) a prealba por tratamiento de aplicación de biosólidos, en ambas plantaciones.**Table 4.** Values of predawn relative water content (CHR) by treatment of biosolids application, in both plantations.

Año Tratamiento	Contenido hídrico relativo (%) (CHR)							
	Predio Patagual				Predio Peñuelas			
	2007	2008	2009	2010	2007	2008	2009	2010
T0 (0 Mg ha ⁻¹)	88,9 a	79,2 ab	81,1 ab	84,5 a	89,3 a	84,6 a	87,8 a	87,2 a
T30 (30 Mg ha ⁻¹)	88,8 a	79,8 a	79,5 a	82,6 a	88,1 a	81,9 a	85,4 a	82,1 a
T50 (50 Mg ha ⁻¹)	88,7 a	83,0 b	83,0 b	84,1 a	87,7 a	81,8 a	86,3 a	89,3 a

Letras distintas indican diferencias significativas ($\alpha=0,05$), entre tratamientos de un mismo año.

Different letters indicate significant differences ($\alpha= 0.05$) among treatments of the same year.

Los resultados entre los tratamientos durante el año 2008 y 2009 para el predio Patagual, indican que la aplicación de biosólidos tiene un efecto benéfico y estadísticamente significativo en el estado hídrico de la plantación, a pesar de que el análisis no refleja diferencias significativas entre los tratamientos en 2010. Sin embargo, la tendencia del potencial hídrico es más favorable el año 2010, con el tratamiento T50 (tabla 3). Este

comportamiento coincide con los resultados indicados por Donoso *et al.* (2015) para *Acacia caven* (Mol). Mol.

En un ensayo de vivero bajo condiciones controladas, los autores mencionan que cuando las plantas entraron en la fase de restricción hídrica, aquellas que crecieron en un sustrato con biosólido presentaron una mejor condición hídrica en comparación con las plantas sin biosólido (11).

El predio Peñuelas al inicio del estudio (marzo de 2007), el sector donde se estableció tratamiento control presentó una condición hídrica significativamente favorable respecto de los otros tratamientos.

Durante los años 2008 y 2009, no hubo diferencias significativas, mientras que el tratamiento testigo (T0) presentó valores menos negativos de potencial hídrico frente a los dos tratamientos con biosólidos (T30 y T50) evaluados (tabla 3, pág. 114).

El año 2010, el tratamiento (T30) presentó un valor significativamente de potencial hídrico menos negativo que el tratamiento (T50), sin embargo durante todo el ensayo el tratamiento testigo presentó el valor de potencial hídrico menos negativo. Ahora al comparar entre sectores, el predio Peñuelas presenta condiciones hídricas claramente más favorables que el predio Patagual, tanto en los tratamientos control como con los de aplicación de biosólidos durante todos los períodos de medición.

Este comportamiento se puede explicar por el desarrollado del sistema radicular de las cepas, que sustenta ampliamente los requerimientos hídricos de los rebrotes. Diversos estudios confirman este comportamiento en la vegetación proveniente de rebrote (14, 27). Mc Creary (2004) señala que los rebrotes de *Quercus douglasii* Hook. & Arn. provenientes de cepa, producto de su desarrollado sistema radicular, tienen un mejor aprovechamiento del agua disponible en el suelo, lo cual les permite soportar de buena manera los períodos de sequía en comparación con una plantación proveniente de semillas (22).

Al considerar el régimen de precipitaciones, el clima mediterráneo influye en la cantidad de agua que queda disponible para los árboles durante el verano.

En el año 2006 las precipitaciones alcanzaron un total de 514,1 mm lo que corresponde a un año normal. A diferencia

de lo ocurrido en el año 2007, que presentó una menor precipitación en toda la zona, alcanzando un total anual de 192,1 mm (62,7% de déficit, con respecto al año 2006). Esta situación puede ser explicada por la reducción generalizada del potencial hídrico que se observa en el año 2008. Mientras en el año 2008 la precipitación anual fue de 577,3 mm, para el año 2009 fue de 336,7 mm, con un desplazamiento de lluvias hacia la primavera (9). Esta condición aumentó la cantidad de agua disponible para el período de verano siguiente (2010) lo que se ve reflejado en los valores de potencial hídrico (Ψ) observados en la tabla 3 (pág. 114).

La condición favorable del estado hídrico, a través de la aplicación de biosólidos, tiene implicancias, no tan solo hídricas, sino también para el crecimiento. Se menciona que la disminución de la turgencia celular, ocasionada por el déficit de agua, se traduce en una serie de respuestas fisiológicas, entre las que se encuentran la paralización del crecimiento celular (33).

A medida que el estrés se intensifica, la expansión foliar, el desarrollo de nueva cubierta vegetal y la intercepción de radiación, se ven afectados negativamente.

A partir de esta información es posible anticipar que las posibilidades de sobrevivencia de la plantación serán mayores en T50, en plantaciones a partir de plantas generadas por semillas (Predio Patagual), en especial bajo condiciones de restricción hídrica severa, como se observó en la medición estival del año 2008. Se destaca la importancia que tiene la aplicación con biosólidos, ya que, como lo establecen los datos del ensayo, influyen positivamente en las condiciones hídricas de los árboles, favoreciendo el desarrollo y productividad de los individuos (20, 29). Donoso y Ruiz (2001), afirman que en climas mediterráneos el agua es uno de los factores que más afecta en la productividad de los bosques.

Además, agregan que la altura, el diámetro y, por ende, el área basal, se ven afectados por la cantidad de agua disponible en el suelo. Por ello, es esperable que las plantaciones fertilizadas con biosólidos comiencen a expresar en crecimiento la mejor condición hídrica por sobre las plantaciones testigo (10).

Estado nutricional foliar

No se observó diferencias nutricionales significativas entre los tratamientos en los dos predios, para cada año evaluado (tablas 5 y 6).

Tabla 5. Valores medios de concentración de nutrientes en las hojas, en los años 2007 y 2008, para cada tratamiento de aplicación de biosólidos, en plantación de Patagual.

Table 5. Average nutrient concentrations of leaves in Patagual plantation for each treatment of biosolids application, in years 2007 and 2008.

Nutrientes	2007*			2008		
	T0	T30	T50	T0	T30	T50
N (%)	1,21 Aa	1,15 Aa	1,22 Aa	1,20 Aa	1,21 Aa	1,12 Aa
P (%)	0,07 Aa	0,07 Aa	0,08 Aa	0,05 Aa	0,06 Aa	0,05 Aa
K (%)	0,75 Ab	0,50 Aa	0,65 Aab	0,53 Aa	0,78 Aa	0,54 Aa
Ca (%)	1,01 Aa	1,43 Aa	1,25 Aa	1,68 Aa	1,49 Aa	1,28 Aa
Mg (%)	0,11 Aa	0,15 Aa	0,17 Aa	0,18 Aa	0,18 Aa	0,17 Aa
Zn (ppm)	11,00 Aa	11,00 Aa	11,00 Aa	13,00 Aab	13,67 Ab	10,33 Aa
Mn (ppm)	1293,3 Aa	1593,3 Aa	1403,3 Aa	1935 Aa	1491,6 Aa	1723,3 Aa
Cu (ppm)	5,00 Aa	5,00 Aa	5,66 Aa	5,33 Aa	4,67 Aa	4,67 Aa

Letras mayúsculas distintas indican diferencia significativa ($\alpha=0,05$) entre los años y letras minúsculas distintas indican diferencia significativa ($\alpha=0,05$), entre los tratamientos de un mismo año. (*) Para el año 2007, las muestras fueron tomadas antes de la fertilización, quedando como condición inicial para cada tratamiento.

Different uppercase letters indicate significant difference ($\alpha = 0.05$) among years and different lowercase letters indicate significant difference ($\alpha = 0.05$) among treatments of the same year. (*) For 2007, samples were measures before of fertilization, being a initial condition for each treatment.

Tabla 6. Valores medios de concentración de nutrientes en las hojas, en los años 2007 y 2008, para cada tratamiento de aplicación de biosólidos, en el predio Peñuelas.

Table 6. Average nutrient concentrations of leaves in Peñuelas plantation for each treatment of biosolids application, in years 2007 and 2008.

Nutrientes	2007*			2008		
	T0	T30	T50	T0	T30	T50
N (%)	1,02 Aa	1,06 Aa	1,16 Aa	1,33 Aa	1,51 Aa	1,36 Aa
P (%)	0,09 Aa	0,09 Aa	0,09 Aa	0,09 Aa	0,08 Aa	0,08 Aa
K (%)	0,87 Aa	0,91 Aa	0,90 Aa	0,69 Aa	0,67 Aa	0,63 Aa
Ca (%)	1,59 Aa	1,75 Aa	2,00 Aa	1,65 Aa	1,14 Aa	1,20 Aa
Mg (%)	0,26 Aa	0,25 Aa	0,25 Aa	0,21 Aa	0,20 Aa	0,22 Aa
Zn (ppm)	14,3 Aa	11,3 Aa	11,0 Aa	15,0 Aa	17,7 Aa	16,3 Aa
Mn (ppm)	1513,3 Aa	1810,0 Aa	1723,3 Aa	2286,7 Aa	1648,3 Aa	1620,0 Aa
Cu (ppm)	5,7 Aa	6,0 Aa	5,7 Aa	5,7 Aa	6,0 Aa	5,0 Aa

Letras mayúsculas distintas indican diferencia significativa ($\alpha = 0,05$) entre los años. Letras minúsculas distintas indican diferencia significativa ($\alpha=0,05$), entre los tratamientos de un mismo año. *Para el año 2007 las muestras fueron tomadas antes de la fertilización, quedando como condición inicial para cada tratamiento.

Different uppercase letters indicate significant difference ($\alpha = 0.05$) among years. Different lowercase letters indicate significant difference ($\alpha = 0.05$) among treatments of the same year. * For 2007 samples were measures before of fertilization, being a initial condition for each treatment.

De igual forma, no se registraron diferencias nutricionales significativas entre las dos evaluaciones, año 2007 previo a la aplicación y año 2008 (un año después de la aplicación) (tablas 5 y 6, pág. 116).

Los resultados obtenidos concuerdan con Valdecantos (2001), el cual señala que en plantaciones de *Pinus halepensis* y *Quercus ilex* L. fertilizadas con biosólidos, luego de 12 meses, no se obtiene efecto en las concentraciones de nutrientes (36).

De igual forma, un estudio de los efectos del compost de biosólidos sobre la recuperación de un bosque quemado de *Nothofagus pumilio* (Poepp. & Endl.) Krasser (lenga), no registró aumentos de las concentraciones de nutrientes en la regeneración luego de siete meses de monitoreo. Sin embargo, se registraron aumentos leves en las concentraciones de C, N, K y P en el suelo, concluyendo que en evaluaciones posteriores podría mejorar el estado nutricional de las plantas (37).

CONCLUSIONES

Los biosólidos afectan favorablemente el potencial hídrico (Ψ) y el contenido hídrico relativo (CHR) en individuos que están sometidos a una fuerte restricción hídrica. Esto implica un gran potencial para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales, pues el agua pasará a ser un factor limitante para estas formaciones en el secano interior de Chile central.

Por otra parte, las variables hídricas presentan tiempos de respuesta más rápidos que las variables de crecimiento en plantaciones adultas.

El tiempo de evaluación de los ensayos de fertilización con biosólidos, en las condiciones en que se desarrolló el presente trabajo, debería ser superior a tres años para analizar la respuesta nutricional y de crecimiento.

BIBLIOGRAFÍA

1. Aguas Andinas. 2006. Esparcimiento de biosólidos en plantaciones forestales de la Región Metropolitana de Santiago. Chile. 24 p.
2. Aguilera, S.; Borie, P.; Peirano, P.; Lastra, O. 2005. Aplicación de residuos en suelos: Efectos en el medio ambiente. En: M. Aguilera, M.; Rodríguez, M. (Eds). Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales. Santiago, Chile. 99-112.
3. Antilén, M.; Briceño, M.; Galindo, G.; Escudey, M. 2008. Effect of biosolids on the organic matter content and phosphorus chemical fractionation of heated volcanic Chilean soils. *SoilResearch*. 46(5): 415-422.
4. Arata, P. 2005. Gestión de biosólidos realizada por cinco años en el ámbito del recurso benéfico en Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14448/13784> (fecha de consulta: 23/06/2013).
5. Basil, G.; Mazzarino, M. J.; Roselli, L.; Letourneau, F. 2009. Efecto del compost de biosólidos en la producción de plantines de *Austrocedrus chilensis* (ciprés De la cordillera). *Rev. Ciencia del Suelo*. Argentina. 27(1): 49-55.
6. Bautista-Cruz, A.; Cruz Domínguez, G.; Rodríguez Mendoza, M. de las N.; Pérez Pacheco, R.; Robles, C. 2014. Effect of compost and slow-release fertilizers addition on soil biochemistry and yield of maize (*Zea mays* L.) in Oaxaca, Mexico. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. Universidad Nacional de Cuyo. Mendoza. Argentina. 46(1): 181-193.
7. Castro, C. P.; Henríquez, O.; Freres, R. 2007. Posibilidades de aplicación de lodos o biosólidos a los suelos del sector norte de la Región Metropolitana de Santiago. *Rev. de geografía Norte Grande*. Chile. 37: 35-45.

8. Dickens, E. 2002. Effect of a one-time biosolids application in and old-field loblolly pine plantation on diameter distributions, volume per acre, and Value per Acre. Gen. Tech. Rep. SRS-48. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southern Research Station: 15-19.
9. Dirección Meteorológica de Chile (DMC). 2013. Dirección General de Aeronáutica Civil. Región Metropolitana, Chile. Disponible en: <http://www.meteochile.cl> (fecha de consulta: 06/09/2013).
10. Donoso, S.; Ruiz, F. 2001. Potencial hídrico y crecimiento de *Eucalyptus globulus* plantado a diferentes espaciamientos en la Provincia de Huelva, España. Rev. Bosque. Chile. 22 (1): 37-44.
11. Donoso, S.; Peña-Rojas, K.; Pacheco, C.; Durán, S.; Santelices, R.; Mascaró, C. 2015. The physiological and growth response of *Acacia caven* under waterstress and the application of different levels of biosólidos. Ciencia e Investigación Agraria. 42(2): 273-283.
12. Environmental Protection Agency. 2000. Folleto informativo de tecnología de biosólidos: Aplicación de biosólidos al terreno. EPA 832-F-00-064. United States Environmental Protection Agency. Office of Water Washington, D. C. 13 p.
13. Erazo, A. 2007. Opciones de uso y disposición de biosólidos en la región Metropolitana. Tesis de grado en Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 79 p.
14. Fleck, I.; Peña-Rojas, K.; Aranda, X. 2010. Mesophyll conductance to CO₂ and leaf morphological characteristics under drought stress during *Quercus ilex* L. resprouting. Annals of Forest Science. 67(3): 308.
15. Fuentes, D.; Disante, K.; Valdecantos, A.; Cortina, J.; Vallejo, R. 2007. Response of *Pinus halepensis* Mill. seedlings to biosolids enriched with Cu, Ni and Zn in three Mediterranean forest soils. Environmental Pollution. 145: 316-323.
16. Fuentes, D.; Valdecantos, A.; Cortina, J. 2008. Evaluación a medio plazo de la aplicación de biosólidos en repoblaciones forestales de *Pinus halepensis*. Sociedad Española de Ciencias Forestales. 28: 75-80.
17. González, S. 2005. Tratamiento, Producción y gestión de lodos en plantas de tratamiento de Aguas Andinas. En: Seminario: Uso benéfico de lodos. Proyecto: Valorización de lodos como fertilizantes. 10-11 de Agosto de 2004. Serie Actas INIA. 27: (19-27). Santiago, Chile. 208 p.
18. Guerrero, M. 2005. Evaluación del contenido de nutrientes y contaminantes en suelos y suelos adicionados de biosólidos y compost. Tesis de grado en Química. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 70 p.
19. Henry, C.; Cole, D. 1997. Use of biosolids in the forest: Technology, economics and regulations. Biomass and Bioenergy. 13(4-5): 269-277.
20. Houghton, J. 1997. 3° ed. Global Warming: The complete briefing. Cambridge University. Press, Cambridge. 251 p.
21. Kimberley, M.; Wang, H.; Wilks, P.; Fisher, C.; Magesan, G. 2004. Economic analysis of growth response from a pine plantation forest applied with biosólidos. Forest Ecology and Management. 189(1-3): 345-351.
22. McCreary, D. 2004. Managing and restoring California's oak woodlands. Natural Areas Journal. 24(3): 269-275.
23. Meyer, V.; Redente, E.; Barbarick, K.; Brobst, R.; Paschke, M.; Miller, A. 2004. Plant and Soil Responses to Biosolids Application following Forest Fire. Ecosystem Restoration. 873-881.
24. Navas, A.; Machín, J.; Navas, B. 1999. Use of biosolids to restore the natural vegetation cover on degraded soils in the badlands of Zaragoza (NE Spain). BioresourceTechnology. 69: 199-205.
25. Ochoa-Carreño, A.; Barrera-Cataño, J. 2007. Efecto de la aplicación de biosólidos, sobre el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas sucesionales, en la cantera soratama, localidad de Usaquén, Bogotá. Universitas Scientiarum - Edición especial. 12(2): 57-72.
26. Ortiz, M.; Tamariz, J.; Lazcano, M.; Castelán, R. 2013. Evaluación del efecto de los biosólidos sobre el cultivo de la Lechuga (*Lactuca sativa* L.). Rev. AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. 6(1): 100-109.

27. Peña-Rojas, K.; Aranda, J.; Joffre, R.; Fleck, I. 2005. Leaf morphology, photochemistry and water status changes in resprouting *Quercus ilex* during drought. *Functional Plant Biology*. 32(2): 117-130.
28. Pritchard, D.; Penney, N.; McLaughlin, M.; Rigby, H.; Schwarz, K. 2010. Land application of sewage sludge (biosolids) in Australia: risks to the environment and food crops. *Water Science and Technology-WST*. 62(1): 48-57.
29. Quick, W.; Chaves, M.; Wendler, R.; David, M.; Rodrigues, M.; Passaharinho, J.; Pereira, J.; Adcock, M.; Leegood, R.; Stitt, M. 1992. The effect of water stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions. *Plant, Cell and Environment*. 15: 25-36.
30. Ramírez, R.; Velásquez, D.; Acosta, E. 2007. Efecto de la Aplicación de biosólidos en el crecimiento de *Jacarandá mimosifolia* (Gualanday) y en las condiciones físicas y químicas de un suelo degradado. *Rev. Facultad Nacional de Agronomía Medellín*. 60(1): 3751-3770.
31. Rodríguez, M.; Hernández, J.; Corvalán, P.; Grez, I. 2005. Seguimiento de la aplicación de biosólidos en ensayo sobre plantaciones. En: Aguilera, M.; Rodríguez, M. (Eds). *Desarrollo de prácticas sustentables de reciclaje de biosólidos en plantaciones forestales*. Santiago, Chile. 127-138.
32. Santander, G. 2005. Efecto de la aplicación de residuos sólidos de alto impacto en la actividad biológica de suelos de uso forestal. Tesis de grado en Bioquímica. Facultad de Ciencias Químicas y Farmacéuticas. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 53 p.
33. Santiveri, F. 1992. Influencia del hábito de crecimiento sobre el comportamiento agronómico y fisiológico del *Triticale hexaploide* (Xtriticosecale, Wittmack). Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agraria. Universidad de Lérida. Lérida, España. 95 p.
34. Silva-Leal, J.; Bedoya, D.; Torres-Lozada, P. 2013. Evaluación del potencial de aplicación de biosólidos higienizados en el cultivo de rábano. *Acta Agronómica*. 62(2): 155-164.
35. Toro, F. 2005. Áreas potenciales para la aplicación de biosólidos en plantaciones forestales de la VI Región de Chile. Tesis de grado en Ingeniería Forestal. Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 65 p.
36. Valdecantos, A. 2001. Aplicación de fertilizantes orgánicos en la repoblación de zonas forestales degradadas de la comunidad valenciana. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Alicante. Alicante, España. 202 p.
37. Varela, S.; Gobbi, M.; Laos, F. 2006. Banco de semillas de un bosque quemado de *Nothofagus pumilio*: Efecto de la aplicación de compost de biosólidos. *Rev. Ecología Austral*. Argentina. 16(1): 63-78.
38. Wang, H.; Kimberley, M.; Magesan, G.; McKinley, R.; Lee, J.; Layery, J.; Hodgkiss, P.; Payn, T.; Wilks, P.; Fisher, C.; McConchie, D. 2006. Midrotation effects of biosolids application on tree growth and wood properties in a *Pinus radiata* plantation. *Canadian Journal of Forest Research*. 36(8): 1921-1930.
39. White, C.; Loftin, S.; Aguilar, R. 1997. Application of biosolids to degraded semiarid rangeland: nine-year responses. *Journal of Environmental Quality*. 26(6): 1663-1671.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se realizó con el apoyo la empresa Aguas Andinas y del Programa de Bosques Mediterráneos, Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile. Se agradece especialmente a los estudiantes que colaboraron en el proceso de toma de muestras y procesamiento.