



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Micronutrientes procedentes de la hojarasca en una plantación mixta de *Populus alba L.* y *Robinia pseudoacacia L.* a turno corto.

GONZALEZ GONZALEZ, I.¹, OLIVEIRA, N.¹, DE LA IGLESIAS, JP.¹, PARRAS, A.¹, RODRIGUEZ- SOALLEIRO, R.² y SIXTO, H.¹

¹ Centro de Investigación Forestal (INIA, CSIC). Ctra. De la Coruña km 7,5. 28040 Madrid.

² Grupo de Gestión Forestal Sostenible, Universidad de Santiago de Compostela. Rúa Benigno Ledo, 2, 27002 Lugo.

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar el efecto de la mezcla de especies en la concentración de micronutrientes en hoja verde y senescente, así como de sus aportes al suelo derivados de la producción de hojarasca. El estudio se ha realizado en una plantación de alta densidad (10.000 piesha⁻¹) que contenía monocultivos de *P. alba L.* y *R. pseudoacacia L.* y mezcla de ambas especies en proporción 50PA:50RP. El desfronde (hojas senescentes) en la masa mixta presentó concentraciones medias de micronutrientes más altas, aunque no significativas, respecto a los dos monocultivos, lo que supone un efecto positivo en cuanto a los aportes al suelo (kg·ha⁻¹) de Fe, Mn, Zn, B y Cu respecto al monocultivo de *R. pseudoacacia*. Sin embargo los aportes de la masa mixta resultan inferiores a los del monocultivo de *P. alba* debido a que este último presenta la mayor producción de hojarasca. Por ello en términos de retorno de micronutrientes al suelo tanto el monocultivo de *P. alba* como la plantación mixta resultarían inicialmente más ventajosas. No obstante se requiere una valoración conjunta de la mejora productiva en términos de biomasa así como la potencial mejora del suelo derivada del desfronde.

Palabras clave

Masas monoespecíficas, masa mixta, chopo, robinia, hoja senescente, hoja verde.

1. Introducción

Con frecuencia, las plantaciones con especies de crecimiento rápido y en concreto las planteadas en alta densidad, se establecen necesariamente en condiciones de sitio con bajo contenido en nutrientes. En este tipo de escenarios la calidad del desfronde jugará un papel importante dentro del ciclo de nutrientes, permitiendo la incorporación al suelo de un elevado porcentaje de los mismos (Chapin et al. 2002; Kumar 2008). En este sentido las estrategias desarrolladas por las especies para la conservación de nutrientes, entre las que se encuentra la retraslocación de nutrientes minerales desde las hojas hacia órganos nuevos, tallos o raíces, antes de su abscisión (Ares & Gleason 2007; Freschet et al. 2010), permitirían reducir la dependencia de la planta de la disponibilidad de nutrientes en el suelo.

A pesar de que los micronutrientes tienen un papel importante en el desarrollo y crecimiento de las especies forestales, estos elementos han recibido muy poca atención en comparación con los macronutrientes, quizás debido en parte a que deficiencias de micronutrientes en especies forestales, no han sido muy comunes (Fisher & Binkley 2000). Sin embargo en plantaciones forestales intensivas a turno corto estas deficiencias se hacen más evidentes debido a su mayor demanda (Ericsson et al. 1992). Los niveles óptimos y de deficiencia de micronutrientes han sido establecidos principalmente para especies de coníferas (Linder 1995; Thelin et al. 1999). Las diferencias en los niveles de micronutrientes obtenidas en estudios comparativos entre especies caducifolias han estado parcialmente enmascaradas por las diferentes condiciones de sitio, época de muestreo y edad (Van der Burg 1990; Stefan 1997). Por ello el estudio de diferentes especies de

igual edad y bajo las mismas condiciones de sitio podría resultar de interés de cara a un mejor entendimiento de los requerimientos nutricionales de las diferentes especies.

Micronutrientes como el Mn, Fe o Zn además de formar parte de numerosas reacciones enzimáticas implicadas en el metabolismo de las plantas (actividad fotosintética, respiración celular, síntesis de membranas celulares y síntesis de proteínas) también van a influir en la degradación de la lignina y por tanto en la tasa de descomposición final del desfronde (Laskowski & Berg 1993; Davey et al. 2007).

La mayoría de las plantaciones a turno corto son establecidas como monocultivos, sin embargo el uso de plantaciones mixtas a turno corto ha suscitado gran interés debido a sus múltiples beneficios (Marron et al. 2018; Schweire et al. 2019). La mezcla de especies puede favorecer la tolerancia a determinadas situaciones de estrés, aumentar la variabilidad genética o incrementar la productividad derivada de procesos de facilitación o complementariedad, así como resultar menos demandantes de nutrientes al necesitar las distintas especies diferentes requerimientos nutricionales (Koupar et al. 2011).

2. Objetivos

Los objetivos de este trabajo por tanto son: i) cuantificar los aportes anuales de micronutrientes derivados del desfronde en subparcelas puras y mixtas a corta rotación y alta densidad y ii) estudiar la dinámica de estos micronutrientes en este tipo de plantaciones compuesta de especies que presentan diferentes requerimientos nutricionales en similares condiciones de sitio.

3. Metodología

3.1 Sitio de estudio

La plantación experimental se estableció en el centro de la Península Ibérica ($40^{\circ}28'N$, $3^{\circ}22'W$), a una altitud de 595 m snm, con temperatura media anual de $15.3^{\circ}C$ ($28.8^{\circ}C$ de T^amax y $3.1^{\circ}C$ de T^amin) y precipitación media anual de 281 mm. La plantación se realizó en 2012 con el objetivo de evaluar la producción de biomasa bajo diferente composición de especies. Las dos especies que se utilizaron fueron: *Populus alba* '11PK' (PA) y *Robinia pseudoacacia* 'Nyirsegí' (RP) bajo un diseño de tres bloques aleatorizados que incluían cada una de las especies en monocultivo así como diferentes proporciones de mezcla incluyendo entre ellas la proporción 50% de P. alba y 50% de R. pseudoacacia (50PA:50RP) (Oliveira et al. 2018). La densidad de plantación fue de 10.000 pies/ha (2.5 m x 0.40 m). La plantación se realizó utilizando estaquillas enraizadas para R. pseudoacacia y sin raíz para P. alba. Entre los meses de junio a septiembre se aplicó riego por goteo debido a la sequía estival. No se aplicó sin embargo ningún tratamiento de fertilización. La descripción de las propiedades fisicoquímicas del suelo y la metodología de análisis se refieren en la Tabla 1

Tabla 1. Valores medios ± desviación estándar de los parámetros fisicoquímicos más relevantes en el sitio de estudio.

Parámetros	Antes de la plantación	Metodología de análisis
Textura	Franco arenosa	(Método Bouyoucos)
pH (en H ₂ O)	$8,65 \pm 0,10$	(Potenciométricamente)
CE (mS cm ⁻¹)	$0,59 \pm 0,24$	(Potenciométricamente)
Carbonatos (%)	$10,08 \pm 1,00$	(Calcímetro de Bernard)
N (g kg ⁻¹)	$0,81 \pm 0,08$	(Kjeldahl modificado)
MO (%)	$0,68 \pm 0,08$	(Walkley-Black)
C:N	$23,77 \pm 1,97$	

Muestreo en el horizonte superficial del suelo (0-30 cm)

3.2. Metodología de recolección de las muestras de desfronde

La recogida de las muestras de desfronde se realizó mensualmente desde octubre a diciembre, durante el primer periodo vegetativo de la segunda rotación (R4T1). Se dispusieron de forma aleatoria doce contenedores (cajas de plástico con superficie de 0,17 m² y altura de 23 cm) en las filas de cada bloque y parcela, ubicándose dentro de la fila a una distancia equidistante entre 2 plantas. El número total de recogedores fue treinta y seis.

En las muestras de desfronde se separaron tres fracciones: hojas, ramales y otros. En esta última fracción se incluyeron cortezas, semillas, yemas, hojas de otras especies y otros restos. Una vez separadas las distintas fracciones se secaron en estufa a 65°C hasta peso constante. El aporte de desfronde en cada subparcela ha sido calculado mediante la suma del desfronde recogido en los diferentes recogedores. El cálculo de la cantidad de desfronde acumulado por unidad de área se ha realizado dividiendo la suma del peso total de las distintas fracciones por el área de los recogedores de cada subparcela, extrapolando el resultado obtenido a una hectárea, expresándose el aporte del desfronde en Mg ha⁻¹ año⁻¹. Antes de la abscisión foliar (finales de agosto) se recogieron en el árbol muestras de hoja verde en las mismas subparcelas en las que se dispusieron los recogedores de desfronde para su posterior análisis foliar. En las parcelas mixtas se analizó la mezcla de hojas recogidas de las 2 especies.

3.3. Análisis foliares

Tanto en hoja verde recogida en el mes de agosto como en hoja senescente recogida en los 3 meses de muestreo se analizó la concentración de: Fe, Mn, Zn, B y Cu previa digestión húmeda de la muestra en un sistema cerrado por microondas (Ethos plus) y posterior determinación por espectroscopia de emisión por ICP-OES (Perkin Elmer, mod. Optima 5300 DV).

Se calculó el porcentaje de retraslocación eficiente de nutrientes (PRE) mediante la siguiente ecuación (Huang et al. 2007):

$$\text{PRE} = (\text{Nu}_\text{verde} - \text{Nu}_\text{senescente}) / \text{Nu}_\text{verde} * 100,$$

donde Nu_{verde} es la concentración del nutriente en la hoja verde madura y Nu_{senescente} es la concentración del nutriente en la hoja senescente.

3.4. Tratamiento de datos

Se ha realizado un análisis multivariante para evaluar el efecto del tipo de parcela (monoclonales o mixta) así como la época de muestreo y la interacción entre ambas sobre la producción de desfronde y su composición química. En el caso de obtener diferencias significativas se ha utilizado el test de Tukey para establecer aquellas medias que son estadísticamente diferentes con una significación de 0,05. Se han realizado análisis no paramétricos (test de Kruskal-Wallis), para aquellas variables que no cumplían con el criterio de normalidad. Para el análisis se ha utilizado el paquete informático Spss Statistics 21. Dada la elevada variabilidad en la cantidad de desfronde mensual se ha utilizado medias de todo el periodo de desfronde (oct-nov) ponderadas por el peso mensual para el análisis a nivel de subparcela de los datos relacionados con las concentraciones de micronutrientes en hojas senescentes.

4. Resultados

4.1. Aporte anual de biomasa proveniente del desfronde

En todas las subparcelas de la plantación la fracción más representativa del desfronde ha correspondido a las hojas con un 98%, por lo que se utilizará esta fracción para el estudio de la producción y composición química del mismo. En las subparcelas mixtas, la producción de desfronde ha sido del 55% para *P. alba* y del 45% para *R. pseudoacacia*..

Tabla 2. Producción anual de desfronde (fracción hojas) en subparcelas puras de *P. alba* y *R. pseudoacacia* y mixtas de ambas especies 50PA:50RP.

Subparcelas	Desfronde (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
<i>P.alba</i>	3,37a ± 0,79
50PA:50RP	2,82a ± 0,37
<i>R.pseudoacacia</i>	2,55a ± 0,16

Letras diferentes indican diferencias significativas entre los tres tipos de cultivos

Aunque no se observan diferencias significativas entre la producción total de desfronde (Tabla 2) entre los monocultivos y la mezcla 50PA:50RP ($p\text{-value}=0,2160$), la producción anual de desfronde ha sido un 24% más elevada en subparcelas puras de *P. alba* respecto a las subparcelas puras de *R. pseudoacacia*, presentando las subparcelas mixtas valores intermedios, aunque más próximos a las puras de *R. pseudoacacia* a pesar de tener las subparcelas mixtas una mayor contribución de hojas de *P. alba*.

4.2. Concentración de micronutrientes en hoja verde y hoja senescente

Tanto en hoja verde como en hoja senescente no se han obtenido diferencias significativas en las concentraciones medias de Fe, Mn, Zn, B y Cu entre los tres tipos de masas estudiadas probablemente atribuibles a la elevada variabilidad obtenida en las concentraciones de dichos micronutrientes (Fig. 1).

En el caso de hojas senescentes, las concentraciones absolutas de Fe, Mn, Zn, B y Cu han sido más elevadas en la mezcla 50PA:50RP (Fig. 1), con valores entre el 5 y 28% más altos que los obtenidos en las subparcelas puras de *P. alba* y entre el 4 y 44% más altos que los de subparcelas puras de *R. pseudoacacia*. La excepción fue Fe en el que los valores de la mezcla han sido muy similares a las concentraciones obtenidas en *R. pseudoacacia*. Las concentraciones medias más bajas de Fe, B y Cu han correspondido a monocultivos de *P. alba* mientras que en monocultivos de *R. pseudoacacia* se han observado las concentraciones más bajas de Mn y Zn (Fig. 1).

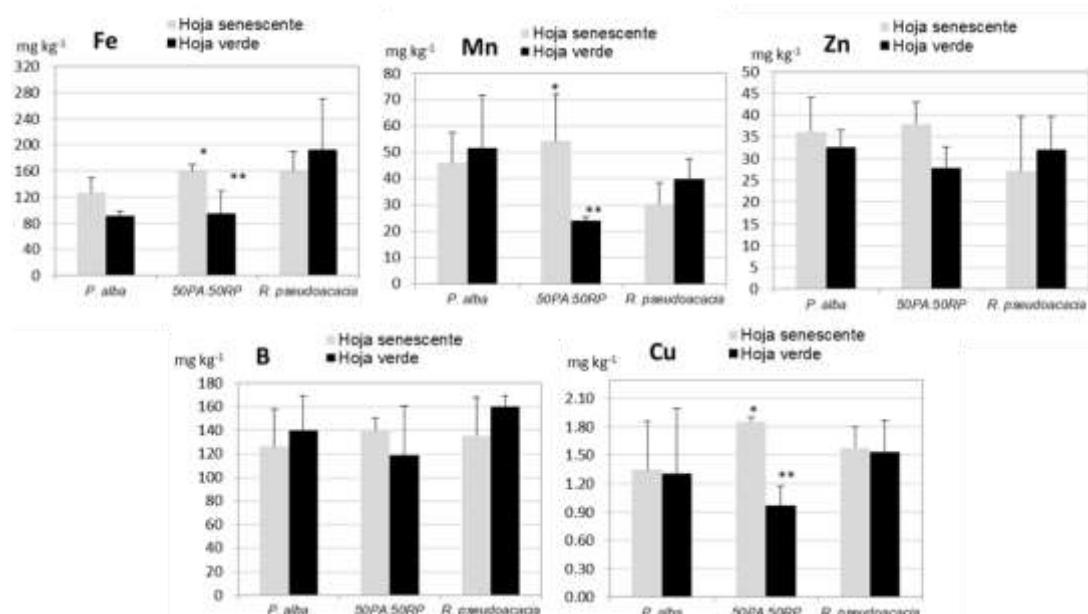


Figura 1. Concentraciones medias ponderadas del desfronde ± desviación estándar para cada uno de los micronutrientes estudiados tanto en hoja verde como en hoja senescente en subparcelas puras de *P. alba* y *R. pseudoacacia* y mixtas de ambas especies 50PA:50RP. El nº de asteriscos diferentes indica la presencia de significación entre hoja verde y hoja senescente.

En hoja verde, las concentraciones medias foliares de todos los micronutrientes fueron superiores en las masas puras, a excepción del Fe donde las masas puras de *P. alba* y la mezcla obtuvieron concentraciones similares. En las masas puras de *R. pseudoacacia* destaca principalmente la elevada concentración de Fe observada (doblando los valores observados en la masa pura de *P. alba* y en la mezcla), aunque también para Cu y B, mientras que *P. alba* ha mostrado las concentraciones de Mn más altas, siendo en el caso del Zn muy similares entre ambos monocultivos.

4.3. Retraslocación

En subparcelas puras de *R. pseudoacacia* todos los micronutrientes, a excepción del Cu, se han retraslocado con porcentajes que van desde un 23,7 % en Mn, donde se produce la mayor retraslocación hasta el 15,5 % en el Zn, donde se observa el menor porcentaje (Fig. 2).

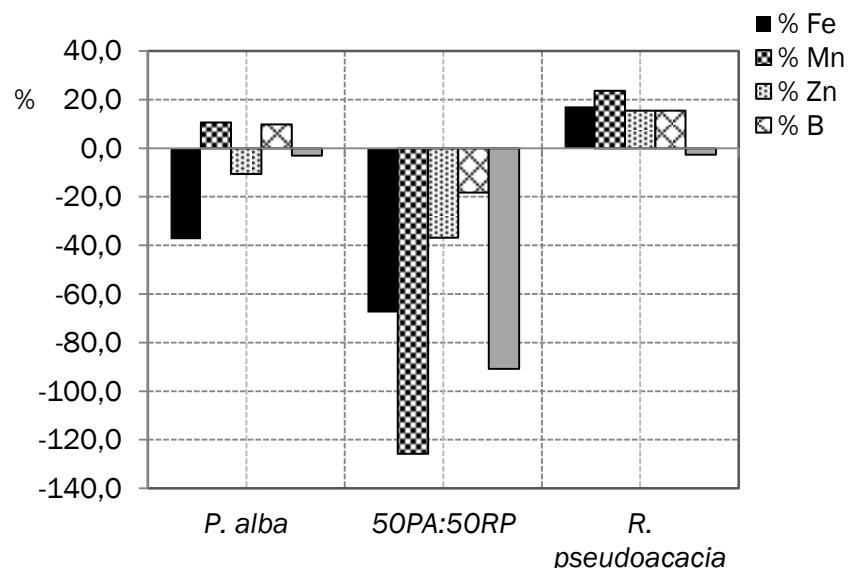


Figura 2. Porcentajes medios de retraslocación y acumulación de Fe, Mn, Zn, B y Cu en subparcelas puras de *P. alba* y *R. pseudoacacia* y mixtas de ambas especies 50PA:50RP

En subparcelas puras de *P. alba* los porcentajes de retraslocación han sido en general inferiores (Fig. 2). Es destacable la escasa variación en la concentración del Cu entre hoja verde y hoja senescente, posiblemente debido a su escasa movilidad y situación de deficiencia (Bergmann et al. 1992). En las parcelas mixtas todos los micronutrientes se han acumulado en las hojas senescentes, siendo el Mn y Cu los micronutrientes que se ha acumulado en mayor porcentaje con un 126 % y 91% respectivamente, coincidiendo con que en hoja verde sus concentraciones han sido las más bajas.

4.4 Potencial aporte de nutrientes al suelo con el desfronde

El retorno de los micronutrientes al suelo con el desfronde previsiblemente será en general más elevado en el monocultivo de *P. alba* y en el cultivo mixto (Tabla 3), consecuencia de la mayor producción de biomasa foliar en estas subparcelas, si bien las diferencias en ningún caso han sido significativas. No obstante, los mayores aportes de Fe y Cu, en términos absolutos se producen en el cultivo mixto, debido a que sus concentraciones en hoja senescente son más elevadas que en *P. alba*. Sin embargo en el resto de micronutrientes, especialmente en el caso del Mn, los aportes anuales han sido ligeramente inferiores a pesar de que las concentraciones medias en hoja senescente han sido también más elevadas en el cultivo mixto, lo que podría ser debido a la elevada variabilidad de los aportes de este micronutriente en el monocultivo de *P. alba*.

Tabla 3. Aportes medios con el desfronde de Fe, Mn, Zn, B y Cu ($g\ ha^{-1}\ año^{-1}$) en masas monoestáticas de *P. alba* y *R. pseudoacacia* y mixtas 50PA:50RP.

Subparcelas	Fe	Mn	Zn	B	Cu
	$g\ ha^{-1}\ año^{-1}$				
<i>P. alba</i>	430±180	160±80	120±50	440±190	4,49±2.30
50PA:50RP	450±50	150±40	110±20	400±60	5,30±0.80
<i>R. pseudoacacia</i>	410±90	80±20	70±30	350±100	4,00±1.40

5. Discusión

5.1. Aporte anual de biomasa proveniente del desfronde

La mayor producción anual de desfronde obtenida para *P. alba* se contrapone a lo que han descrito otros autores (Medina-Villar et al. 2015), donde la producción de desfronde ha sido más alta en *R. pseudoacacia*, coincidiendo por tanto con la idea de que las especies invasoras como *R. pseudoacacia* tienen mayores tasas de crecimiento que las especies nativas (Castro-Díez et al. 2014). En este estudio sin embargo la tasa de crecimiento ha sido más elevada en *P. alba* (Oliveira et al. 2018) por lo que las diferencias obtenidas entre especies en la producción de biomasa foliar se corresponden con las también obtenidas en la producción de biomasa leñosa. Así el monocultivo de *P. alba* muestra una producción 33% y 9% mayor respecto a las obtenidas en el monocultivo de *R. pseudoacacia* y en el cultivo mixto, respectivamente (Oliveira et al. 2018). La biomasa foliar representa un 24% respecto al total de la biomasa aérea en el caso de monocultivo de *P. alba*, un 22% en el caso del monocultivo de *R. pseudoacacia* y un 26 % en el caso de la mezcla 50PA:50RP.

5.2. Concentración de micronutrientes en hoja verde y hoja senescente

La hojarasca procedente de la mezcla de especies presenta una composición química del desfronde más enriquecida en micronutrientes, aunque no significativa, lo cual podría influir sobre los procesos de descomposición de la materia orgánica. Las tasas de descomposición en el caso de mezcla de especies pueden ser más rápidas (o lentas según las especie) respecto a las originadas con el desfronde individual (Gartner & Cardon 2004; Jacob et al. 2010). En las etapas finales de la descomposición la tasa va a estar dominada por la degradación de la lignina, la cual va a depender entre otros factores de las concentraciones de determinados micronutrientes en el desfronde. Tanto el Mn, Zn, Fe y Cu actúan como cofactores de enzimas que intervienen en la degradación de la lignina (Zhang et al. 2016; Janusz et al. 2017). Así concentraciones adecuadas de Mn en el desfronde tanto de especies de coníferas como de frondosas caducifolias (*B. pendula* Roth., *B. pubescens* Ehrh, *A. incana* L., *P. tremula* L., *P. simonii* y *R. pseudoacacia*, L.) aumentan la tasa de descomposición tanto en las etapas iniciales (de Santo et al. 2009; Zhang et al. 2016) como en las etapas finales de la descomposición (Berg et al 2007). Zhang et al. (2016) citaron concentraciones más elevadas de Mn en el desfronde de *R. pseudoacacia* ($210\ mg\ kg^{-1}$) y *P. simonii* ($220\ mg\ kg^{-1}$) aunque en suelos ácidos donde la disponibilidad del Mn es mayor, lo que se reflejaría en concentraciones más elevadas de Mn en hoja. Harvey & van den Driessche (1999) obtuvieron en hojas senescentes de híbridos de chopos concentraciones también mucho más elevadas de Mn ($335\ mg\ kg^{-1}$), Zn ($69\ mg\ kg^{-1}$) y Cu ($3,8\ mg\ kg^{-1}$) pero inferiores de B ($76\ mg\ kg^{-1}$) que las obtenidas en este trabajo. Además del Mn, las diferentes concentraciones de Cu, Fe y Zn en el desfronde también van a influir favoreciendo la descomposición, tanto en especies de coníferas como de frondosas (Laskowski & Berg 1993; de Santo et al. 2002). Las concentraciones más elevadas de micronutrientes, especialmente de Mn y Cu obtenidas en este trabajo en el desfronde de la mezcla 50PA:50RP podrían por tanto favorecer su descomposición respecto al de las masas puras.

En hoja verde las concentraciones medias de Fe obtenidas han sido especialmente destacables en *R. pseudoacacia*, con valores medios por encima de los rangos óptimos de crecimiento establecidos para frondosas exigentes ($40\text{--}90\ mg\ kg^{-1}$) (Bonneau 1988). Para especies del género

Populus se han referido síntomas de deficiencias para concentraciones de Fe inferiores a 70 mg kg⁻¹ (Lombard et al. 2010; Martín-García et al. 2012), estando en nuestro caso todos los valores por encima de 80 mg kg⁻¹.

En el caso de *R. pseudoacacia*, especie fijadora de N₂, la mayor concentración obtenida de Fe podría indicar un mayor requerimiento de este nutriente, dado que el Fe forma parte de la enzima nitrogenasa implicada en la fisiología de la fijación del N₂ (Fernández-Pascual et al. 2002). A pesar de que por la basicidad de estos suelos (Tabla 1) la absorción del Fe se puede ver limitada, la flora microbiana en la rizosfera de algunas especies puede producir mayores exudados de H⁺ que aumenten la reducción del Fe a formas más solubles Fe²⁺ ó Fe³⁺ (Neumann & Romheld 2011), lo que podría explicar las elevadas concentraciones de este micronutriente encontrada en este estudio. Sin embargo otros estudios no han obtenido un efecto del pH del suelo en la absorción de Fe (Martín-García et al. 2012).

En hoja verde las concentraciones medias foliares de Mn para *P. alba* se encuentran dentro del rango óptimo establecido por Bergmann (1992) para chopos (35-150 mg kg⁻¹), estando también en el caso de *R. pseudoacacia* muy por encima de los requerimientos fisiológicos mínimos de este elemento por las plantas, que se han estimado entre 10 y 20 mg kg⁻¹ (Goransson 1994). En esta plantación, la especie *P. alba* en monocultivo tiene una tasa de crecimiento más alta que *R. pseudoacacia* (Oliveira et al. 2018) por lo que la mayor concentración de Mn en *P. alba* podría indicar un mayor requerimiento de este nutriente, al jugar este un papel muy importante en el metabolismo de proteínas, carbohidratos y sobre la fotosíntesis, procesos directamente implicados en el crecimiento. Al igual que para el Fe, las diferencias en la absorción del Mn podrían ser debidas a las diferencias en la flora microbiana de la rizosfera específica para cada especie y que está implicada en los procesos de reducción y oxidación de Mn de los que depende la disponibilidad del mismo por la planta (Marschner et al. 2004).

La disponibilidad del Mn va a depender principalmente del pH de suelo siendo óptima con valores de pH alrededor de 5,0 disminuyendo progresivamente a medida que aumenta el pH (Pinno et al. 2010), por lo que en este estudio con suelos alcalinos (Tabla 1) las concentraciones foliares de Mn han sido inferiores a las obtenidas en la bibliografía en suelos básicos. Así para *Populus spp.* de similar edad se han obtenido concentraciones de Mn de 83 mg kg⁻¹ y 157 mg kg⁻¹ en suelos de pH 8,1 y 7,5 respectivamente (Martín-García et al. 2012). Para robinia creciendo sobre suelos básicos se han obtenido concentraciones muy similares a las referidas en este trabajo (Tzvetkova & Petkova 2014; Samara et al. 2020). Además, la disponibilidad tanto de Mn como de Fe se ven favorecidas por la disponibilidad de agua (Peuke & Rennerberg 2011), lo que facilita su absorción, situación que se puede producir en este estudio al tratarse de plantaciones regadas a capacidad de campo.

Las concentraciones de Zn en hoja verde se encuentran dentro del rango óptimo de crecimiento referido por Bergmann (1992) para chopos (15-50 mg kg⁻¹) y de acuerdo con los valores establecidos por Bonneau (1988) para frondosas exigentes (>19). La bibliografía para diferentes especies de híbridos de *Populus* muestra sin embargo concentraciones de Zn más elevadas, con valores comprendidos entre 54 y 125 mg kg⁻¹ (Teng & Timmer 1990; Martín-García 2012; Samara et al. 2020). Estos resultados pueden estar influenciados por la diferente disponibilidad del Zn que tiende a disminuir con el aumento del pH (Bergmann 1992). La especie *R. pseudoacacia* creciendo sobre suelos básicos han mostrado concentraciones de Zn entre 11 y 52 mg kg⁻¹ (Tzvetkova & Petkova 2014; Papaioannou et al. 2016; Samara et al. 2020) similares a las obtenidas en este trabajo.

Las concentraciones medias de Cu en hoja verde se encuentran en el caso de *P. alba* por debajo del rango óptimo establecido por Bergman (1992) para las especies del género (6-12 mg kg⁻¹) y en el límite crítico establecido por Van de Driessche (2000) para chopos híbridos (<2,4 mg kg⁻¹). En

el caso de *R. pseudoacacia* las concentraciones de Cu también estarían por debajo del rango óptimo establecido por Bonneau (1988) para frondosas exigentes ($10\text{-}20 \text{ mg kg}^{-1}$).

La disponibilidad del Cu también está asociada al pH del suelo disminuyendo cuando los valores de pH son superiores a 6 (Brady & Weil 2008) por lo que parece coherente que en estas plantaciones con suelos alcalinos su disponibilidad fuese muy baja. Además la baja movilidad del Cu desde la raíz a las hojas puede también contribuir a estas bajas concentraciones foliares, según indica Bergmann (1992). En ocasiones también la deficiencia en Cu ha estado asociada a desequilibrios inducidos por el P, si bien esta circunstancia no parece ser la responsable al haberse detectado valores medios de P tanto para *P. alba* como para *R. pseudoacacia* de $0,50 \text{ g kg}^{-1}$ y $0,48 \text{ g kg}^{-1}$ según González et al. (2020) obteniéndose ratios de P/Cu de 385 y 312 respectivamente, inferiores a 600, que es el indicado por Teng & Timmer (1990) como valor de referencia por encima del cual se pueden producir desequilibrios en chopos híbridos.

Las concentraciones de Cu referidas en la bibliografía para especies e híbridos de *Populus* spp desarrollados sobre suelos básicos (pH entre 7,5 y 8,1) se mueven en un rango entre 3,6 y $11,7 \text{ mg kg}^{-1}$ (Martín-García et al. 2012; Samara et al. 2020) muy superiores a las obtenidas en este trabajo. También en suelos básicos Samara et al. (2020) refirió para *R. pseudoacacia* concentraciones de Cu superiores ($8,6 \text{ mg kg}^{-1}$).

En relación al B, las concentraciones han mostrado valores superiores a los rangos óptimos para chopos ($15\text{-}40 \text{ mg kg}^{-1}$) y para frondosas exigentes ($30\text{-}70 \text{ mg kg}^{-1}$) definidos por Bergmann (1992) y Bonneau (1988). Las altas concentraciones obtenidas pueden ser consecuencia de una alta disponibilidad en el suelo y de una fácil absorción pasiva y translocación vía xilema a las hojas mediante el flujo de transpiración, que junto con la reducida movilidad del B (Barber 1995) van a dar lugar a su acumulación en la hoja, especialmente cuando hay exceso (Hagen-Thorn & Stjernquist 2005). Además plantas con bajas concentraciones de P y altas concentraciones Ca, como es el caso de los monocultivos de este estudio con concentraciones de Ca de $17,4 \text{ mg kg}^{-1}$ (*P. alba*) y $29,0 \text{ mg kg}^{-1}$ (*R. pseudoacacia*) referidas en González et al. (2020), están generalmente asociadas con altas concentraciones de B debido al importante papel del B en los procesos de fosforilación y a la mayor tolerancia al B en plantas con altas concentraciones de Ca (Bergmann 1992). Altas concentraciones de B están también asociadas a plantaciones jóvenes (3 a 7 años), como las de este estudio, y con altas tasas de crecimiento (Martín-García et al. 2012).

En el caso de las masas mixtas (50PA:50RP) las concentraciones medias foliares de todos los micronutrientes en hoja verde están, con la excepción del Cu, dentro del rango óptimo de crecimiento, aunque el hecho de haber resultado inferiores a las obtenidas en masas puras podría sugerir que la mezcla de especies puede influir en los requerimientos nutricionales y en los mecanismos de absorción de cada especie, aunque este hecho no se puede constatar al no haberse realizado los análisis foliares de micronutrientes de manera individualizada para cada especie dentro de la mezcla.

5.3. Retraslocación

Para el caso de los macronutrientes se asume que contenidos más bajos en hoja verde normalmente están asociados con una mayor eficiencia en la retraslocación (Yuan et al. 2005). En nuestro estudio, esta asunción solo sucede en el caso del Mn donde la mayor eficiencia ha correspondido a *R. pseudoacacia*, especie que ha presentado concentraciones en hoja verde inferiores a las de *P. alba*. El rango de porcentajes de retraslocación obtenidos para los micronutrientes (10%-24%) son inferiores a los obtenidos para NPK (40% -78%) en estas mismas parcelas (González et al. 2020) hecho esperable debido principalmente a la menor movilidad de los micronutrientes junto a menores requerimientos por la planta.

Bajos porcentajes de retraslocación sugieren una estrategia menos conservadora, más dependiente de la circulación de nutrientes desde el suelo (Townsend et al. 2007). Por lo general *R. pseudoacacia* mostraría una estrategia más conservadora y con menor dependencia de la disponibilidad de micronutrientes en el suelo que *P. alba*. En el cultivo mixto las dos especies parecen mostrar estrategias menos conservadoras que en las masas monoespecíficas al no producirse retraslocación para ninguno de los micronutrientes. Esto posiblemente, es consecuencia de los menores requerimientos nutricionales de ambas especies en este escenario, como sugerían las menores concentraciones obtenidas en hoja verde.

La retraslocación de micronutrientes ha mostrado frecuentemente datos contradictorios en la literatura. Así para híbridos de chopo, algunos autores han referido retraslocaciones en Cu (Killingbeck 1990; Harvey & van den Driessche 1999), mientras que Mn, Zn y B parece que se acumulan en las hojas senescentes (Harvey & van den Driessche 1999). En otras especies de frondosas caducifolias (*Nothofagus*, por ejemplo) Bahamonte et al. (2019) refieren que el Mn y el Fe se acumulan en las hojas senescentes mientras que el Zn y B se retraslocan en porcentajes de 25% y 10% respectivamente, mientras que el Cu apenas varía su concentración entre hoja verde y hoja senescente. Esta variabilidad pone de manifiesto la influencia de factores como la especie o la diferente disponibilidad de otros nutrientes sobre los mecanismos de la retraslocación.

6. Conclusiones

Las diferentes concentraciones de micronutrientes obtenidas tanto en hoja verde como en hoja senescente en *P. alba* y *R. pseudocacia* bajo similares condiciones de sitio, reflejarían diferentes requerimientos nutricionales para ambas especies y por tanto diferentes mecanismos de absorción de micronutrientes, así como diferentes estrategias de conservación entre las que se encuentra la retraslocación. Las diferencias en la retraslocación son por tanto debidas a las diferentes respuestas ecofisiológicas que cada planta tiene a las condiciones de sitio. En este sentido *R. pseudoacacia* parece ser una especie más conservadora, con mayor control interno y menor dependencia de los niveles de micronutrientes en suelo que *P. alba*.

La magnitud de las diferencias entre las concentraciones en hoja verde en ambas especies es dependiente del nutriente. Así Fe y Mn son los micronutrientes que muestran mayores diferencias, resultando ser Mn más demandado por *P. alba* con alta tasa de crecimiento, probablemente por tener este micronutriente un papel muy importante en procesos directamente implicados en el crecimiento y Fe más demandado por *R. pseudoacacia* probablemente debido a su implicación en la fisiología de la fijación del N₂.

En suelos básicos, donde en general la disponibilidad de los micronutrientes es baja, las concentraciones foliares obtenidas en estas plantaciones se encuentran dentro del rango establecido para un crecimiento adecuado, probablemente consecuencia de las diferentes estrategias utilizadas por las especies como el aumento de la disponibilidad a nivel radicular o la retraslocación.

El uso combinado de ambas especies en la plantación podría resultar ventajosa en términos de aporte de micronutrientes derivados de la producción de hojarasca ya que parece influir en los requerimientos nutricionales de cada especie a nivel individual al no necesitar la utilización de estrategias conservadoras como la retraslocación, dando lugar a una mayor acumulación de nutrientes en hojas senescentes. Este hecho, sin embargo, resulta especulativo al no haber realizado análisis individualizado para cada especie en el pool de hojas que componen el desfronde de la mezcla.

Si bien no se obtuvieron ventajas relevantes sobre la producción de biomasa leñosa como consecuencia del uso combinado de ambas especies en la proporción 50PA:50RP (Oliveira et al.

2018), sí parece que el uso combinado de estas especies con diferentes estrategias conservadoras pueda ofrecer ventajas en términos de reducir futuras necesidades de fertilización a nivel tanto de macronutrientes (González et al. 2020) como de micronutrientes. No obstante, para unos resultados más concluyentes sería necesario el estudio de la dinámica de descomposición del desfronde y de la incorporación de los micronutrientes al suelo.

7. Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado dentro del Proyecto RTA2017-00015-C02-01: Optimización y modelización de la producción de biomasa lignocelulósica para la obtención de bioproductos bajo escenarios de cambio climático (LIGBIO).

8. Bibliografía

- ARES, A.; GLEASON, S.M.; 2007. Foliar nutrient resorption in tree species. In New Research on Forest Ecology. A.K. Scaggs (Ed), Nova Scince Publishers. 33 pp. New York.
- BAHAMONDE, H.A.; FERNÁNDEZ, V.; GYENGE, J.; MATTENET, F.; PERI, P.L.; 2019. Essential Nutrient and Trace Element Foliar Resorption of Two Co-Existing *Nothofagus* Species Grown Under Different Environmental Conditions in Southern Patagonia. *Frontiers in Plant Science*, 10 1–13.
- BARBER, S.A.; 1995. Soil nutrient bioavailability : a mechanistic approach / (2nd ed.). John Wiley and Sons. 432pp. New York.
- BERG, B.; STEFFEN, K.T.; MCCLAUUGHERTY, C.; 2007. Litter decomposition rate is dependent on litter Mn concentrations. *Biogeochemistry* 82(1) 29–39.
- BERGMANN, W.; 1992. Nutritional Disorders of Plants: Developments, Visual and Analytical Diagnosis. Gustav Fischer. 698 pp. New York.
- BONNEAU, M.; 1988. Le diagnostic foliaire. *Rev For Fr* 40 19–28.
- BRADY, N.C.; WEIL, R.; 2008. The Nature and Property of Soils. 14 ed. Pearson Prentice Hall. 980 pp. New Jersey.
- CASTRO-DÍEZ, P.; VALLE, G.; GONZÁLEZ-MUÑOZ, N.; ALONSO, Á.; 2014. Can the life-history strategy explain the success of the exotic trees *Ailanthus altissima* and *Robinia pseudoacacia* in Iberian floodplain forests? *PLoS One* 9(6) 30–32.
- CHAPIN, F.S.; MATSON, P.A.; MOONEY, H.A.; 2002. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. Springer.-Verlag. 423 pp. New York.
- DAVEY, M.P.; BERG, B.; EMMETT, B.A.; ROWLAND, P.; 2007. Decomposition of oak leaf litter is related to initial litter Mn concentrations. *Can J Bot* 85(1) 16–24.
- DE SANTO, A.V.; DE MARCO, A.; DE FIERRO, A.; BERG, B.; RUTIGLIANO, F. A.; 2009. Factors regulating litter mass loss and lignin degradation in late decomposition stages. *Plant Soil* 318 217–228.

ERICSSON, T.; RYTTER, L.; LINDER, S.; 1992. Nutritional dynamics and requirements of short rotation forests. in Mitchell, CP.; Ford-Robertson, J.B.; Hinckley, T.; SennerbyForsse, L. (eds): Ecophysiology of Short Rotation Forest Crops 35–65. Elsevier Applied Science. London, New York.

FERNÁNDEZ-PASCUAL, M.; MARÍA, N.; FELIPE, M.; 2002. Fijación biológica del nitrógeno: factores limitantes. *Ciencia y Medio Ambiente - Segundas Jornadas Científicas Sobre Medio Ambiente del CCMA-CSIC*. 195–202.

FISHER, R.F.; BINKLEY, D.; 2000. Ecology and Management of Forest Soils. John Wiley and Sons (eds). 512 pp. Oxford, Hoboken.

FRESCHET, G.T.; CORNELISSEN, J.H.C.; VAN LOGTESTIJN, R.S.P. et al.; 2010. Substantial nutrient resorption from leaves, stems and roots in a subarctic flora: what is the link with other resource economics traits? *New Phytol* 186(4) 879–889.

GARTNER, T.B.; CARDON, Z.G.; 2004. Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter. *Oikos* 104(2) 230–246.

GONZÁLEZ, I.; SIXTO, H.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R.; OLIVEIRA, N.; 2020. Nutrient contribution of litterfall in a short rotation plantation of pure or mixed plots of populus alba and robinia pseudoacacia. *Forests* 11(11) 1–19.

GÖRANSSON, A.; 1994. Growth and nutrition of small *Betula pendula* plants at different relative addition rates of manganese. *Tree Physiol* 14(4) 375–388.

HAGEN-THORN, A.; STJERNQUIST, I.; 2005. Micronutrient levels in some temperate European tree species: A comparative field study. *Trees* 19, 572–579.

HARVEY, H.P.; VAN DEN DRIESSCHE, R.; 1999. Poplar nutrient resorption in fall or drought: influence of nutrient status and clone. *Can J For Res* 29(12) 1916–1925.

HUANG, J.J. ; WANG, X.H. ; YAN, E.; 2007. Leaf nutrient concentration, nutrient resorption and litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in eastern China. *For Ecol Manage* 239(1–3) 150–158.

JACOB, M.; VIEDENZ, K.; POLLE, A.; THOMAS, F. M.; 2010. Leaf litter decomposition in temperate deciduous forest stands with a decreasing fraction of beech (*Fagus sylvatica*). *Oecologia* 164(4) 1083–1094.

JANUSZ, G.; PAWLIK, A.; SULEJ, J.; SWIDERSKA-BUREK, U.; JAROSZ-WILKOLAZKA, A.; PASZCZYNSKI, A.; 2017. Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution. *FEMS Microbiol Rev* 41(6) 941–962.

KILLINGBECK, K.T.; MAY, J.D.; NYMAN, S.; 1990. Foliar senescence in an aspen (*Populus tremuloides*) clone: the response of element resorption to interrmet variation and timing of abscission. *Can J For Res* 20(8) 1156–1164.

KOUPAR, S.A.M.; HOSSEINI, S.M.; MODIRRAHMATI, A.; TABARI, M.; GOLCHIN, A.; RAD, F.H.; 2011. Effect of pure and mixed plantations of *Populus deltoides* with *Alnus subcordata* on growth, nutrition and soil properties. *Asian J Chem* 23(3) 950–954.

KUMAR, B.M.; 2008. Litter Dynamics in Plantation and Agroforestry Systems of the Tropics—A Review of Observations and Method. In Batish, D.R.; Kohli, R.K.; Jose, S. and Singh, H.P. (Eds.), *Ecological Basis of Agroforestry*. 181-216. CRC Press. Boca Raton, FL.

LASKOWSKI, R.; BERG, B.; 1993. Dynamics of some mineral nutrients and heavy metals in decomposing forest litter. *Scand J For Res* 8(1-4) 446–456.

LINDER, S.; 1995. Foliar Analysis for Detecting and Correcting Nutrient Imbalances in Norway Spruce. *Ecol Bull* 44 178–190.

LOMBARD, K.; O'NEILL, M.; MEXAL, J.; ULERY, A.; ONKEN, B.; BETTMANN, G.; HEYDUC, R.; 2010. Can soil plant analysis development values predict chlorophyll and total Fe in hybrid poplar? *Agrofor Syst* 78(1) 1–11.

MARRON, N.; PRIAULT, P.; GANA, C.; GÉRANT, D.; EPRON, D.; 2018. Prevalence of interspecific competition in a mixed poplar/black locust plantation under adverse climate conditions. *An For Sci* 75(23) 1-12.

MARSCHNER, P.; CROWLEY, D.E.; YANG, C.H.; 2004. Development of specific rhizosphere bacterial communities in relation to plant species, nutrition and soil type. *Plant Soil* 261, 199–208.

MARTÍN-GARCÍA, J.; MERINO, A.; DIEZ, J. J.; 2012. Relating visual crown conditions to nutritional status and site quality in monoclonal poplar plantations (*Populus × euramericana*). *Eur J For Res* 131(4) 1185–1198.

MEDINA-VILLAR, S.; CASTRO-DÍEZ, P.; ALONSO, A.; CABRA-RIVAS, I.; PARKER, I. M.; PÉREZ-CORONA, E.; 2015. Do the invasive trees, *Ailanthus altissima* and *Robinia pseudoacacia*, alter litterfall dynamics and soil properties of riparian ecosystems in Central Spain? *Plant Soil* 396(1-2) 311–324.

NEUMANN, G.; RÖMHELD, V.; 2012. Rhizosphere Chemistry in Relation to Plant Nutrition. In Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants. 347–368. Academic Press. London, San Diego.

OLIVEIRA, N.; DEL RIO, M.; FORRESTER, D. I.; RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R.; PEREZ-CRUZADO, C.; SIXTO, H.; 2018. Mixed short rotation plantations of *Populus alba* and *Robinia pseudoacacia* for biomass yield. *For Ecol Manage* 410 48–55.

PAPAIOANNOU, A.; CHATZISTATHIS, T.; PAPAIOANNOU, E.; PAPADOPoulos, G.; 2016. *Robinia pseudoacacia* as a valuable invasive species for the restoration of degraded croplands. *Catena* 137, 310–317.

- PEUKE, A. D.; RENNENBERG, H.; EPRON, D.; 2011. Impacts of drought on mineral macro- and microelements in provenances of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings. *Tree Physiol* 31(2) 196–207.
- PINNO, B.D.; THOMAS, B.R.; BÉLANGER, N.; 2010. Predicting the productivity of a young hybrid poplar clone under intensive plantation management in northern Alberta, Canada using soil and site characteristics. *New For* 39(1) 89–103.
- SAMARA, T.; SPANOS, I.; PLATIS, P.; PAPACHRISTOU, T.G.; 2020. Heavy metal retention by different forest species used for restoration of post-mining landscapes, N. Greece. *Sustainability* 12(11):4453.
- SCHWEIER, J.; ARRANZ, C.; NOCK, C. A., JAEGER, D.; SCHERER-LORENZEN, M.; 2019. Impact of Increased Genotype or Species Diversity in Short Rotation Coppice on Biomass Production and Wood Characteristics. *Bioenergy Res* 12(3) 497–508.
- STEFAN, K.A.; FÜRST, R.; HACKER, B. U.; 1997. Forest foliar condition in Europe. Results of large-scale foliar chemistry surveys. European Commission—United Nations/Economic Commission for Europe. 207 pp. Brussels, Geneva.
- TENG,Y & TIMMER, V.R.; 1990. Phosphorus-induced micronutrient disorders in hybrid poplar. *Plant Soil* 126(1) 41–51.
- THELIN, G.; ROSENGREN-BRINCK, U.; NIHLGÅRD, B.; 1999. Can Graphical Vector Analysis be Used to Identify Micro Nutrient Deficiency? In Sheppard, L.J.; Cape, J.N. (Eds.). *Forest Growth Responses to the Pollution Climate of the 21st Century*. 383–388. Netherlands.
- TOWNSEND, A.R.; CLEVELAND, C.C.; ASNER, G.P.; BUSTAMANTE M.C.; 2007. Controls over foliar N : P ratios in tropical rain forests. *Ecology* 88(1) 107–118.
- TZVETKOVA, N.; PETKOVA, K.; 2014. Bioaccumulation of heavy metals by the leaves of *Robinia pseudoacacia* as a bioindicator tree in industrial zones. *J Environ Biol* 36(1) 59–63.
- VAN DEN BURG, J.; 1990. Foliar analysis for determination of tree nutrient status: A compilation of literature data: Literature 1985-1989. “De Dorschkamp” Institute for Forestry and Urban Ecology (Ed). 220 pp. Wageningen, Niederlande.
- VAN DE DRIESEN, R.; 2000. Phosphorus , copper and zinc supply levels influence growth and nutrition of a young *Populus trichocarpa* (Torr . & Gray) × *P. deltoides* (Bartr. ex Marsh) hybrid. *New For* 19 143–157.
- YUAN, Z.Y.; LI, L.H.; HAN, X.G.; HUANG, J. H.; JIANG, G.M.; WANG, S.Q. et al.; 2005. Nitrogen resorption from senescing leaves in 28 plant species in a semi-arid region of northern China. *J Arid Environ* 63(1) 191–202.
- ZHANG, X.; LIU, Z.; LIU, X.; LIANG, X.; 2016. Relationship between soil humus dissimilation, soil biological and chemical properties, and leaf litter characteristics in pure forests. *Emirates J Food Agric* 28(9) 616–624.