

Respuesta del álamo euroamericano *Populus x canadensis* 'Conti12' a la fertilización nitrogenada en el Alto Valle de Río Negro, Argentina

Response of hybrid poplar *Populus x canadensis* 'Conti 12' to nitrogen fertilization in Alto Valle de Río Negro, Argentina

Esteban Thomas*

Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle de Río Negro, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

Hernán Cancio

Asesor privado, Argentina

Stella Maris Ortiz

Estación Experimental Agropecuaria Alto Valle de Río Negro, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

Gonzalo Caballé

Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Argentina

Corina Graciano

Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata, Argentina

Revista de la Facultad de Agronomía

Universidad Nacional de La Plata, Argentina

ISSN: 1669-9513

Periodicidad: Semestral

vol. 121, núm. 2, 2022

redaccion.revista@agro.unlp.edu.ar

Recepción: 27 Agosto 2021

Aprobación: 21 Agosto 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/23/233665002/>

DOI: <https://doi.org/10.24215/16699513e106>

*Autor de correspondencia: thomas.esteban@inta.gob.ar

Resumen

El objetivo de este trabajo fue evaluar el crecimiento de álamos en respuesta a la aplicación de diferentes dosis de un fertilizante nitrogenado luego del establecimiento del macizo forestal. La evaluación se realizó en una plantación de álamo híbrido euroamericano (*Populus x canadensis* 'Conti12') de tres años de edad con una densidad de 555 árboles · ha⁻¹. Se utilizó un diseño de bloques completos aleatorizados con 4 repeticiones y 20 árboles por parcela. Se establecieron 4 niveles de fertilización con la aplicación a principios de octubre de 0, 90, 180 y 360 g de urea (N-P-K: 46-0-0) por árbol, equivalentes a 0, 50, 100 y 200 kg de urea · ha⁻¹. Se realizaron evaluaciones del contenido de clorofila en hojas durante los primeros 120 días posteriores a la fertilización, y del crecimiento en diámetro (DAP; cm) y altura total (Ht; m) de los árboles durante las dos temporadas posteriores a la fertilización. Durante la primera temporada se observaron diferencias en los incrementos absolutos del DAP entre los árboles fertilizados con respecto a los no fertilizados. La respuesta a la fertilización nitrogenada fue mayor en los árboles de menor DAP (<10 cm) y para las dosis más altas de nitrógeno. En las parcelas con menor relación carbono/nitrógeno del suelo, el incremento del DAP en respuesta a la fertilización nitrogenada fue mayor, resultado que remarca la importancia de la materia orgánica del suelo en la respuesta a la fertilización inorgánica. Si bien estos resultados significan un importante avance, se deberían profundizar estos estudios en el Alto Valle de Río Negro para poder realizar recomendaciones silvícolas con el fin de incrementar los rendimientos y/o acortar el turno de cosecha.

Palabras clave: Salicáceas, urea, fertilizante, Patagonia

Abstract

The aim of this work was to evaluate the response of poplar to different doses of nitrogen fertilization after afforestation establishment. The experiment was carried on in a 3-years old hybrid poplar stand of clone *Populus x canadensis* 'Conti12' with a plantation density of 555 trees · hectare⁻¹. A complete randomized block design was used, with 4 replications and 20 trees per plot. Four levels of fertilization were applied in October 2014, corresponding to 0, 90, 180 and 360 grams of urea (N-P-K: 46-0-0) per plant, equivalent to 0, 50, 100 and 200 kg urea · ha⁻¹. Chlorophyll content was evaluated throughout the first 120 days and diameter at breast height (DBH; cm) and height (H; m) was evaluated for two years. Differences in absolute increment in DBH between fertilized and control trees were observed only after the first growing season. The response to nitrogen fertilization was greater in trees with lower DBH (<10 cm) and for higher doses of nitrogen. In plots with lower carbon/nitrogen rate in the soil, the increment in DBH in response to fertilization was higher, being a result that highlight the relevance of soil organic matter in the response to inorganic fertilization. In conclusion, the response to nitrogen fertilization was higher with higher N-dose and in trees with smaller DBH, mainly during the first growing season after fertilization. It is necessary to deepen the knowledge in Alto Valle de Río Negro to recommend silvicultural practices to increase yield and/or to short harvest rotation.

Keywords: Salicaceae, urea, fertilizer, Patagonia

INTRODUCCIÓN

El cultivo de álamos (*Populus* spp.) en la Argentina se concentra en el Delta del Río Paraná, en la Pampa Húmeda, y en las regiones de regadío de Cuyo y Patagonia Norte (Baridón et al., 2008), con una superficie aproximada de 99.845 ha (Borodowski, 2017). En los valles irrigados de las provincias de Río Negro y Neuquén se estima la existencia de aproximadamente 1.520 hectáreas de macizos con salicáceas (Bava, 2017), principalmente con álamos híbridos euroamericanos (*P. x canadensis*), cuyos turnos de cosecha varían entre 12 y 15 años según la calidad de sitio y el manejo silvícola.

El nitrógeno limita el crecimiento de los álamos cuando su disponibilidad es menor al requerimiento nutricional (Stanturf et al., 2001; Achinelli et al., 2003a; Otto et al., 2009), y la demanda máxima se produce a los 5-6 años de edad (Stanturf et al., 2001). El elevado requerimiento de nitrógeno por parte de los álamos, en particular de algunos híbridos (*P. trichocarpa*, *P. deltoides*, *P. canadensis*), se debe a su elevada productividad en cortos períodos de tiempo (Stanturf & van Oosten, 2014; Stanturf et al., 2001; Heilman y Xie, 1993). Los álamos poseen una alta eficiencia en la utilización del nitrógeno y su productividad aumenta en la medida que aumenta la disponibilidad de este nutriente a partir de la mejora en la eficiencia del uso del agua (Ripullone et al., 2004).

El clima predominante en el Alto Valle de Río Negro es árido templado, con una precipitación media anual inferior a 250 mm, por lo que la demanda hídrica de los cultivos se complementa a través del riego por manto (Rodríguez y Muñoz, 2006). Los suelos del Alto Valle son de origen aluvional, en general con texturas arenosas a franco arcillosas, originalmente escasos en materia orgánica y con poco desarrollo (FAO, 2014). La escasa disponibilidad de nitrógeno en el suelo, asociada a los bajos niveles de materia orgánica, y la lixiviación que provoca el riego por manto puede suplirse con prácticas de fertilización. La aplicación de nitrógeno puede realizarse mediante el agregado de fertilizantes inorgánicos directamente a los álamos (Brown y van den Driessche, 2005; Achinelli et al., 2003a) o mediante el intercultivo con pasturas que también pueden ser fertilizadas (Otto et al., 2009). La inclusión de un plan de fertilización en la planificación de las tareas silvícolas permite acelerar el establecimiento del cultivo y el crecimiento de los árboles durante los primeros años de la forestación (Achinelli et al., 2003a; Stanturf et al., 2001).

La fertilización se realiza comúnmente en el momento de la plantación, lo que permite lograr un crecimiento en altura superior a la vegetación espontánea, aunque puede continuarse durante toda la rotación (Stanturf y van Oosten, 2014), especialmente en suelos de textura gruesa y/o con escaso contenido de materia orgánica como los del Alto Valle de Río Negro. Stanturf et al. (2001) mencionan que con el agregado de 180 y 250 kg N · ha⁻¹ en el primer y segundo año respectivamente se pueden obtener óptimos crecimientos en plantaciones de álamos euroamericanos en suelos con las características mencionadas.

Si bien existe información sobre la respuesta a la fertilización nitrogenada de algunas especies de álamos en diferentes regiones del país y del mundo, esta respuesta depende de la interacción especie-clon con el ambiente. Por lo tanto, en función de las características de los suelos de la región, los objetivos de este trabajo fueron, por un lado, evaluar durante dos temporadas el incremento en diámetro y altura de álamos euroamericanos Conti 12 en respuesta a la aplicación de un fertilizante nitrogenado en diferentes dosis con el fin de aumentar el crecimiento en la etapa posterior al establecimiento de las forestaciones en el Alto Valle de Río Negro, y por el otro, ajustar un modelo descriptivo de esta respuesta utilizando variables de caracterización del suelo y dosis de fertilizante.

MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación se realizó en una forestación de álamos híbridos euroamericanos (*Populus x canadensis* 'Conti12') de tres (3) años de edad con una densidad de 555 árboles · ha⁻¹ (6 m x 3 m), ubicada en la localidad de Cervantes, Provincia de Río Negro, Argentina (39°03'45" S; 67°25'25" O). El macizo forestal, establecido en 2011 con barbados de un año de edad, se regó por manto con una frecuencia quincenal entre los meses de octubre y marzo de cada año (15 riegos · año⁻¹) y fue podado hasta los 2 m de altura al finalizar la segunda temporada de crecimiento, previo al establecimiento del ensayo en 2014.

Para realizar la caracterización físico-química del suelo se tomó una muestra compuesta de cada bloque, conformada por 5 submuestras extraídas de los primeros 30 cm de profundidad. Se realizaron las determinaciones de pH real, relación 1:2,5 de suelo: agua, por vía potenciométrica; carbono orgánico total (COT), por Walkley y Black, micrométodo; la materia orgánica se estimó empleando el factor 1,724 x COT; nitrógeno total (Nt), por digestión húmeda y evaluación por MicroKjeldahl; la

relación carbono nitrógeno (C/N), empleando los valores de COT y Nt; la salinidad se evaluó mediante la conductividad eléctrica en el extracto de saturación y la sodicidad midiendo la relación de adsorción de sodio (RAS) en el extracto de saturación. El fósforo extractable se determinó por el método Bray Kurtz N°1. Todas estas determinaciones se realizaron según SAMLA (2004). La distribución de tamaño de partículas, de la que se obtuvo la textura y la clase textural, se realizó por el método de la pipeta de Robinson según Gee & Bauder (1986). Las determinaciones se realizaron en el laboratorio de Edafología de la Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de La Plata.

Se utilizó un diseño experimental de Bloques Completos Aleatorizados (DBCA), con 4 repeticiones y 20 árboles por parcela (= 320) separadas por una bordura conformada por dos árboles dentro de las filas. Debido a que no existían antecedentes en la región y en base a resultados en otras regiones de la Argentina y del mundo, se establecieron cuatro (4) niveles de fertilización según las diferentes dosis de fertilizante (urea, 46% de N) agregado el 6 de octubre de 2014: 0, 90, 180 y 360 g · árbol⁻¹, equivalentes a 0 (T), 50 (50U), 100 (100U) y 200 (200U) kg urea · ha⁻¹. El fertilizante se aplicó en forma manual, por única vez, previo al primer riego de la temporada de crecimiento 2014-2015, realizándose un hoyo de 10-15 cm de profundidad en el suelo, a una distancia de aproximadamente 30 cm del árbol.

ESTIMACIÓN DEL CONTENIDO DE CLOROFILA EN HOJAS

Durante la primera temporada de crecimiento (2014-2015) se realizaron evaluaciones indirectas del contenido de clorofila en hojas, conocido como Índice Verde (IV), mediante la utilización de un SPAD Minolta 502. El SPAD mide la transmitancia de la luz a través de la hoja, estimando el contenido de clorofila, el cual está directamente relacionado con el contenido de nitrógeno (Lombard et al., 2010). Las mediciones se realizaron sobre cinco (5) hojas por árbol, en ramas ubicadas en el sector norte e inferior de la copa de dos árboles elegidos al azar en cada parcela de cada bloque y en tres momentos diferentes de la temporada: 26 de noviembre de 2014, 19 de diciembre de 2014 y 2 de febrero de 2015. Debido a que la orientación de las filas es este-oeste, las mediciones se realizaron sobre hojas completamente expuestas al sol, sobre la cara norte de las copas de los árboles.

EVALUACIÓN DEL CRECIMIENTO DEL DIÁMETRO A LA ALTURA DEL PECHO (DAP) Y LA ALTURA TOTAL (Ht)

En septiembre de 2014, previo a la fertilización, se realizó una caracterización dasométrica a través de la medición del diámetro del fuste a la altura del pecho -a 1,3 m desde la base- (DAP; cm) mediante cinta diamétrica, y de la altura total (Ht) de los árboles utilizando una vara telescópica. La distribución de árboles por clase diamétrica y por clase de altura total (Ht) al momento de la fertilización se muestra en la Figura 1.

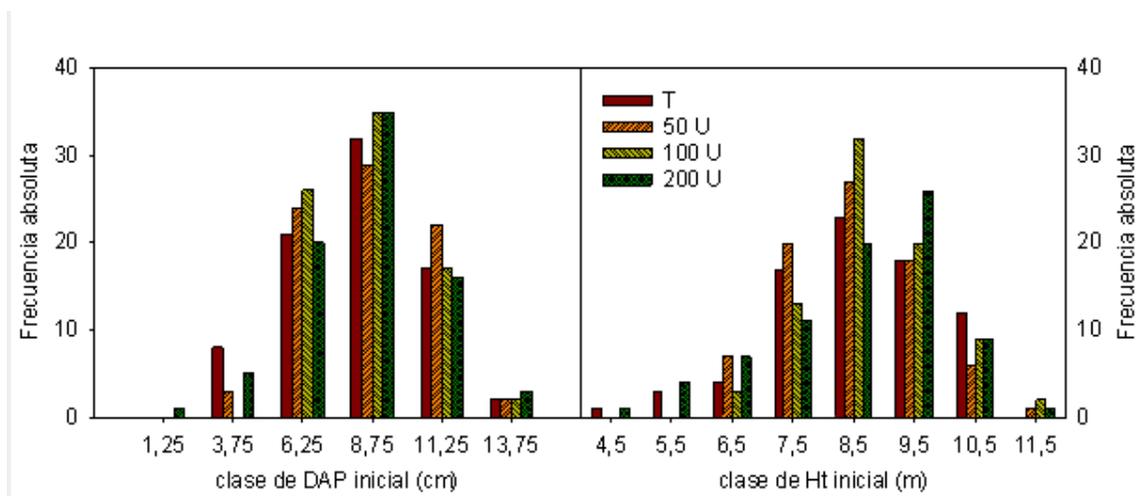


Figura 1
Frecuencia absoluta de distribución de los árboles según la clase de DAP y la clase de altura total (Ht) al momento de la aplicación del fertilizante. La fertilización se realizó con 0 (T), 50 (50U), 100 (100U) y 200 (200U) kg urea · ha⁻¹.

La evaluación del crecimiento de los árboles en función de las diferentes dosis de fertilizante aplicadas se realizó durante dos temporadas de crecimiento, repitiendo las mediciones de DAP y Ht en el invierno de los años 2015 y 2016 utilizando el mismo instrumental.

A partir de los datos de campo se generaron datos adicionales que se utilizaron para los análisis estadísticos: los incrementos absolutos de DAP y Ht, por diferencia entre los valores iniciales y finales de cada temporada; y los incrementos relativos al valor inicial de DAP y Ht para cada temporada. Asimismo, se seleccionaron seis (6) clases diamétricas distribuidas homogéneamente y representativas del rango de DAP.

ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Se analizaron diferencias significativas en contenido de clorofila, DAP y Ht entre dosis de fertilizante, fecha de respuesta y la interacción de estos dos factores a través del siguiente modelo lineal mixto:

$$Y_{ijkl} = \mu + F_i + A_j + FA_{ij} + b_k + e_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

donde μ es la media general; F_i es el efecto fijo del factor fertilizante con cuatro niveles; A_j es el efecto fijo del factor año para DAP y Ht, o fecha en el caso de contenido de clorofila, con dos niveles el primer caso y tres el segundo; FA_{ij} es la interacción de efecto fijo entre los dos factores; b_k es el efecto aleatorio de los bloques; e_{ijk} es el error principal $N(0, \sigma)$, y ε_{ijkl} es el error de subparcela $N(0, \sigma)$.

Cuando se logró probar por medio de ANDEVA el efecto significativo de uno de los factores o la interacción, se compararon las medias de cada nivel a través del test LSD de Fisher. Además, se analizaron los incrementos absolutos en DAP y altura para cada una de las temporadas tomando como factor fijo la dosis de fertilizante y clase diamétrica a la que pertenecían los árboles en el momento de la fertilización (2014) con intervalos de 2,5 cm de DAP. No analizamos la interacción entre dosis de fertilizante y clase diamétrica porque algunas clases diamétricas están vacías, y porque no resulta relevante dicha interacción.

Debido a que se observó efecto diferencial de la fertilización de acuerdo a la clase diamétrica de los individuos, se ajustaron modelos de regresión múltiple para predecir el incremento diamétrico durante el primer año posterior a la fertilización, evaluando como variables predictoras la dosis de fertilizante aplicada ($\text{kg de urea} \cdot \text{ha}^{-1}$), DAP inicial y las variables del suelo del bloque al que pertenecía cada planta: pH (1:2,5), COT, MO, Nt, relación C/N, P, CE, RAS, % Arena, % Limo y % Arcilla. Se ajustaron todos los modelos posibles, y dentro de los ajustes significativos (con $p < 0,05$), se seleccionó el modelo con menor valor de criterio de información de Akaike (AIC). A modo informativo, reportamos también los R ajustados de todos los modelos y los modelos más sencillos. Todos los análisis se realizaron con el software Infostat (Di Rienzo et al., 2017).

RESULTADOS

CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

El suelo presentó textura franca a franco-arcillosa, con algunas diferencias entre los bloques, siendo el bloque 4 el que presentó la textura más fina. El contenido de materia orgánica (MO) y nitrógeno total (Nt) fue levemente superior en los bloques 3 y 4, y el contenido de fósforo disponible (P) fue mayor en los bloques 2 y 3. Los valores de conductividad eléctrica (CE) y Relación de Adsorción de Sodio (RAS) indican ausencia de salinidad y sodicidad en los 30 cm superiores del perfil (Tabla 1).

CONTENIDO DE CLOROFILA EN HOJAS

Luego de transcurridos 50 días desde la aplicación del fertilizante se observó un aumento en el contenido de clorofila en las hojas de los árboles fertilizados. Las diferencias entre los álamos fertilizados con 100U y 200U respecto de los no fertilizados se incrementaron gradualmente hacia el final del verano (febrero), observándose un aumento en la concentración de clorofila a mayor dosis de fertilizante (Figura 2).

Tabla 1

Análisis de suelo en los cuatro (4) bloques del ensayo. Se determinó pH, carbono orgánico total (COT), materia orgánica (MO), concentración de N total (Nt), concentración de P extractable (P), conductividad eléctrica (CE), relación de adsorción de sodio (RAS) y porcentajes de arena limo y arcilla.

Determinación	Unidades	Bloque 1	Bloque 2	Bloque 3	Bloque 4
pH (1:2,5)		7,02	7,96	8,03	7,97
COT	[%]	1,49	1,29	1,59	1,84
MO	[%]	2,57	2,23	2,74	3,18
Nt	[%]	0,139	0,138	0,172	0,174
Relación C/N		10,7	9,3	9,2	10,6
P	[ppm]	8,2	12,6	11,5	7,7
CE	dS m ⁻¹	0,49	0,58	0,55	0,63
RAS		1,01	0,87	0,96	1,01
Arena	%	47,8	40,6	45,3	23,1
Limo	%	36,6	32,3	23,5	44,4
Arcilla	%	15,6	27,1	31,2	32,5

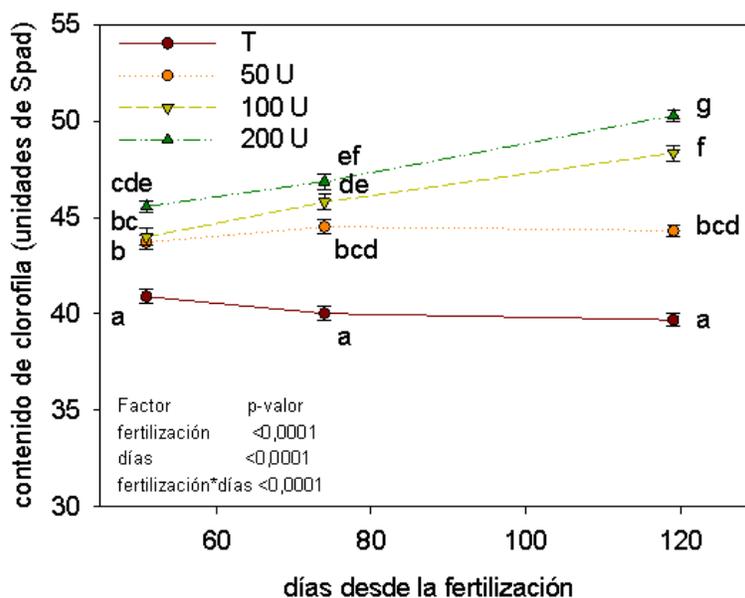


Figura 2

Contenido de clorofila para las dosis de fertilización con N en diferentes fechas posteriores a la aplicación de fertilizante. La fertilización se realizó el 6 de octubre de 2014 con 0 (T), 50 (50U), 100 (100U) y 200 (200U) kg urea · ha⁻¹. Letras diferentes indican diferencias significativas (p<0,05). Las barras indican el error estándar.

INCREMENTO DE DIÁMETRO (DAP) Y ALTURA TOTAL (HT)

La altura total de los árboles fue mayor en los tratamientos fertilizados con diferencias significativas entre la menor (50U) y la mayor dosis (200U) en comparación con las plantas no fertilizadas (T)

(Figura 3). El DAP al año siguiente de la fertilización (2015) fue mayor que el testigo en cualquiera de las dosis de fertilización aplicadas, diferencia que se mantuvo a los dos años (2016) (Figura 3).

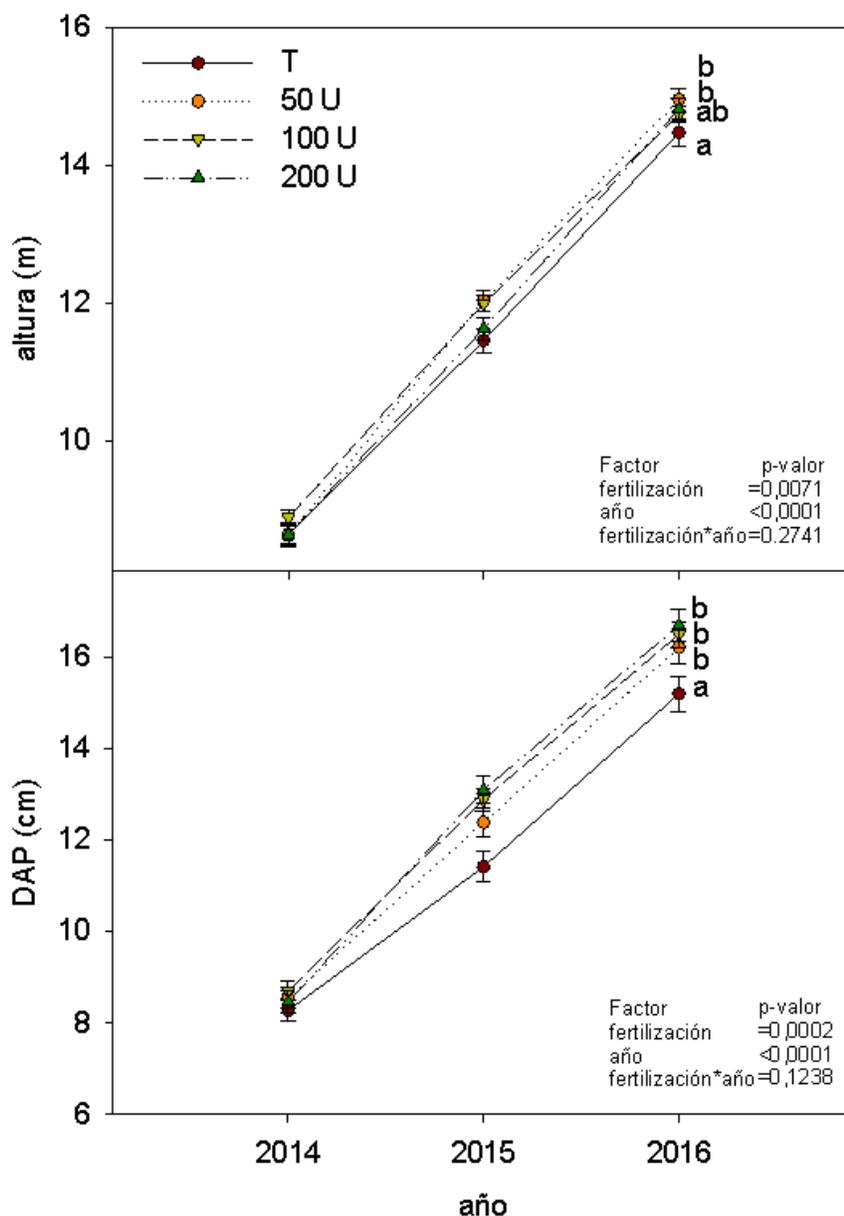


Figura 3
 Altura y DAP en cada año de los árboles fertilizados en 2014 con 0 (T), 50 (50U), 100 (100U) y 200 (200U) kg urea · ha⁻¹. Letras diferentes indican diferencias significativas entre las medias (p<0,05) en el año 2016. Las barras en cada signo indican el error estándar.

Si se analiza el incremento en altura por clase diamétrica, se observa que la clase diamétrica no afecta el incremento en altura en ninguno de los dos años. En el primer año, el mayor incremento en altura se observó en las plantas que recibieron la menor dosis de fertilización (50U). En el segundo año, el incremento en altura fue menor en las plantas que recibieron la dosis intermedia (100U) en comparación con el testigo (datos no mostrados).

Si se analiza el incremento en DAP con respecto al DAP inicial (2014), se observa que después de un año, el efecto de la fertilización en el incremento en DAP fue mayor en las clases diamétricas menores que en las mayores. De hecho, el incremento diamétrico de la clase diamétrica mayor fue similar en árboles fertilizados y no fertilizados. En el segundo año, el incremento diamétrico fue similar en los árboles fertilizados y no fertilizados en todas las clases diamétricas (Figura 4). Cuando el incremento diamétrico 2015-2016 se analizó dividiendo los árboles en las clases diamétricas del 2015, tampoco se observó efecto de la fertilización (fertilización: $p=0,6765$, DAP inicial $<0,0001$) (datos no mostrados).

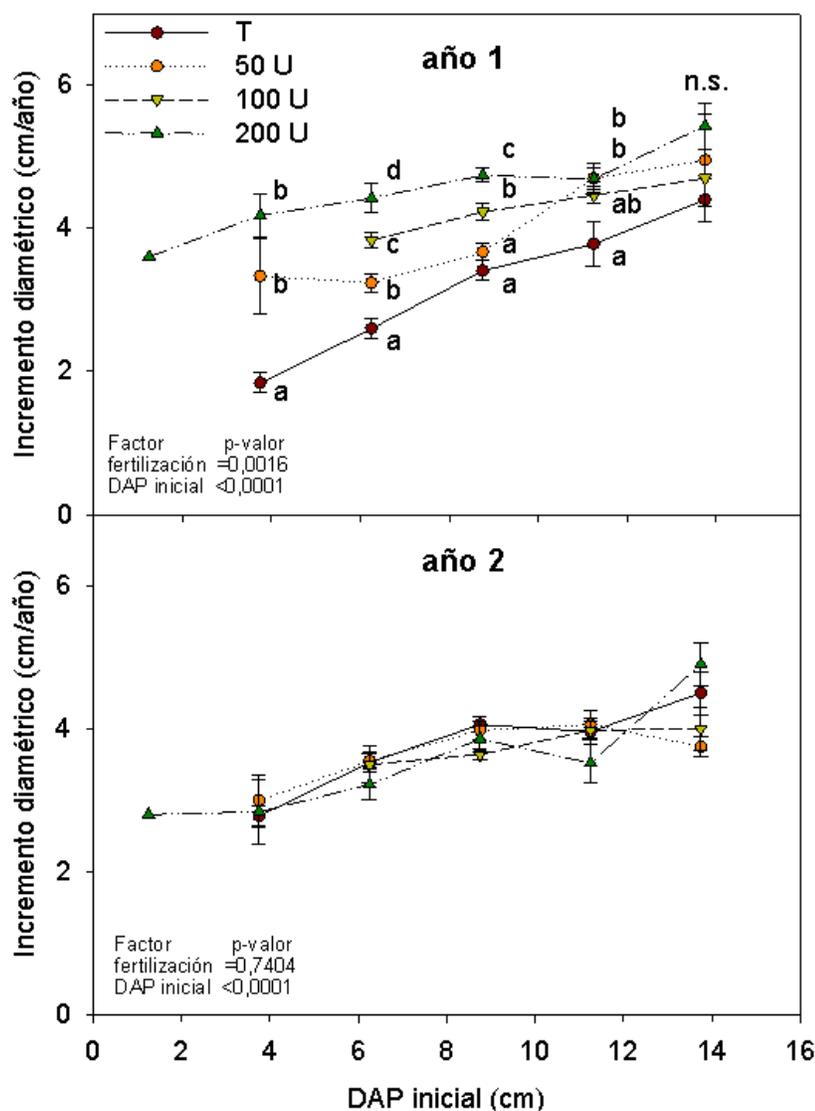


Figura 4

Incremento diamétrico durante el primer año (2014-2015) y el segundo año (2015-2016) por clase diamétrica. En el año 1, letras diferentes indican diferencias significativas entre tratamientos, para cada clase diamétrica ($p < 0,05$). En el año 2 no hay efecto de la fertilización en ninguna clase diamétrica. Las barras en cada signo indican el error estándar.

Al realizar las regresiones múltiples para predecir el incremento en DAP durante el primer año posterior a la fertilización, considerando todas las variables de suelo incluidas en la Tabla 1, el mejor

ajuste se obtuvo al incluir la relación C/N, el DAPI en 2014 (DAP inicial -2014-) y la dosis de N aplicada como kg de urea por hectárea. A los efectos comparativos, en la Tabla 2 se incluyen los modelos significativos ($p < 0,05$) más simples y la bondad de ajuste de cada uno. Todas las variables incorporadas en los modelos reportados tienen un $p < 0,0001$.

Tabla 2
Ecuaciones de regresión para predecir el DAP al primer año de aplicada la fertilización nitrogenada (se incluyen los mejores modelos de acuerdo a su simplicidad y menor valor de criterio de información de Akaike (AIC).

R ² aj	AIC	Variables Incorporadas	modelo	p-valor
0,30	779	N aplicado	$3,30 + 0,01 \text{ N aplicado}$	<0,0001
0,37	747	N aplicado, C/N	$6,91 + 0,01 \text{ N aplicado} - 0,36 \text{ C/N}$	<0,0001
0,49	679	N aplicado, DAPI	$1,63 + 0,01 \text{ N aplicado} + 0,20 \text{ DAPI}$	<0,0001
0,52	660	N aplicado, C/N, DAPI	$4,29 + 0,01 \text{ N aplicado} - 0,25 \text{ C/N} + 0,18 \text{ DAPI}$	<0,0001

DISCUSIÓN

Los valores de MO y Nt en el suelo se corresponden con los de suelos de la región que fueron cultivados bajo riego durante 20 años o más (Giuffré et al., 2003; Aruani & Sánchez, 2003). Se observa una disponibilidad relativamente baja de nitrógeno respecto a los suelos del Delta del Paraná, y similares a los suelos de la Pampa Húmeda (Tabla 1). Los suelos forestados en el Delta del Paraná poseen más de 6% de materia orgánica y aproximadamente 8 ppm de fósforo, y los suelos forestados en la Pampa Húmeda poseen baja a media capacidad de N total y aproximadamente 12 ppm de fósforo (Achinelli et al., 2003a; Cortizo, 2013). Considerando el análisis de suelo, es esperable una respuesta positiva a la fertilización nitrogenada tal como se observó en este ensayo. Como se analizará más adelante, la característica más importante del suelo que se relacionó con la respuesta a la fertilización fue la relación C/N (Tabla 2). Cuando la relación C/N en el suelo es alta, la materia orgánica es menos lábil y se mineraliza a menor velocidad, cediendo lentamente el N al cultivo (Cornwell et al., 2008).

El incremento en la concentración de clorofila en las plantas fertilizadas durante los dos meses posteriores a la fertilización (Figura 2) es un claro indicio de que los álamos estaban limitados por la disponibilidad de N en el suelo. El incremento en la concentración de clorofila es una respuesta de las plantas cuando se revierte la limitación de N, se relaciona con el incremento en la actividad fotosintética y, por lo tanto, con la acumulación de C y el crecimiento (Zhang et al., 2013). De manera similar, en estaqueros de dos clones de *Populus deltoides* establecidos en el Delta del Paraná se observó un incremento en la concentración de clorofila en respuesta a la fertilización nitrogenada (Faustino et al., 2016). Dado que la concentración de clorofila se incrementó a mayor dosis aplicada (Figura 2), se evidencia que, al menos en esta etapa inicial, la dosis máxima de N aplicada no permitió alcanzar valores asintóticos de concentración de clorofila en hojas.

Concluida la primera temporada de crecimiento posterior a la fertilización, se observaron mayores valores de DAP y Ht en plantas fertilizadas respecto a las no fertilizadas (Figura 3). Una respuesta similar se observó también en álamos euroamericanos, en suelos con valores similares de N total, donde el crecimiento en altura total y el volumen con corteza aumentaron significativamente frente a la aplicación de 50 y 75 gramos de urea por planta durante la primera temporada de crecimiento (Achinelli et al., 2003b). Asimismo, en cuatro clones de álamos híbridos (*P. deltoides* x *P. petrowskyana*) la respuesta frente de la aplicación de diferentes dosis de nitrógeno (0, 150 y 300 kg N · ha⁻¹) durante el primer y segundo año de edad, fue significativa en el crecimiento en altura y en volumen al final de la segunda temporada de crecimiento (Booth, 2008). No obstante, en clones de álamos híbridos (*P. trichocarpa* x *P. deltoides*) la aplicación de una dosis alta de N (500 kg N · ha⁻¹)

repartida en tres dosis iguales al comienzo de la segunda, tercera y cuarta temporada de crecimiento, produjo también respuestas significativas de crecimiento en DAP y altura al finalizar la tercera temporada de crecimiento (Heilman y Xie, 1993). En ese ensayo, la fertilización provocó un aumento del 21% de rendimiento al cuarto año de edad en comparación a las plantas no fertilizadas, demostrando que la respuesta no es exclusiva de los primeros dos años de implantación del cultivo y podría prolongarse en el tiempo (Heilman y Xie, 1993).

Cuando analizamos el incremento en DAP y Ht por clase diamétrica se observa que la menor dosis permitió el incremento en altura durante el primer año de manera muy marcada, especialmente en los individuos de mayor clase diamétrica. En el segundo año no se evidencian diferencias entre las dosis aplicadas. La escasa respuesta en el segundo año puede deberse a que el fertilizante que no fue absorbido por los árboles o incorporado en una forma estable de materia orgánica del suelo, puede haber salido del sistema por lixiviación con la percolación profunda al aplicarse el riego por manto. Para corroborar esta posibilidad, sería importante realizar un análisis de suelo y probar la aplicación anual de fertilizante. Sin embargo, la mayor respuesta a la fertilización se dio en los árboles de menor DAP, que tuvieron incrementos similares a los de mayor DAP (Figura 4). En general, en plantaciones coetáneas monoespecíficas, los árboles de mayor DAP son los que más recursos obtienen y ganan en la competencia a los árboles de menor DAP (Forrester, 2019). Eso se observa claramente en este ensayo cuando se analiza el crecimiento de los árboles no fertilizados: los individuos de la clase diamétrica superior fueron los que más incrementaron su DAP. Sin embargo, la fertilización logró, durante el primer año, que el incremento diamétrico de los árboles de menor DAP sea similar a los de mayor DAP. Esto se visualiza en los individuos de la clase diamétrica inferior, donde el incremento diamétrico de los árboles fertilizados fue mayor a mayor dosis de N aplicada. Por el contrario, en la clase diamétrica superior, el incremento diamétrico fue similar en los árboles fertilizados y no fertilizados (Figura 4). Es así que en las parcelas fertilizadas el incremento diamétrico de los árboles con menor DAP fue similar al de los árboles con mayor DAP, fenómeno que puede conducir a una dominancia reversa, donde los árboles más pequeños son los que más aportan al crecimiento del rodal (Binkley, 2004). En este sentido, la fertilización puede ser visualizada como una práctica que homogenice la estructura diamétrica del rodal.

En este ensayo el incremento diamétrico estuvo directamente vinculado con la dosis de fertilizante aplicada y con el tamaño inicial de los árboles que se fertilizaron (Figura 4). Asimismo, la relación C/N del suelo contribuye a explicar la variabilidad de incremento en DAP (Tabla 2), pese a que los valores de dicha relación son similares entre los bloques (Tabla 1). El modelo que mejor explica la respuesta en el incremento del DAP luego de un año desde la fertilización se logra al incluir la dosis de fertilización, el DAP inicial y la relación C/N del suelo (Tabla 2). La regresión múltiple indica que el DAP fue mayor en los árboles fertilizados en suelos con menor relación C/N, esto es, en los bloques con materia orgánica más lábil. Es importante remarcar que la determinación de C/N fue anterior a la aplicación del fertilizante, por lo tanto, la fertilización con urea no logró diluir el efecto de la calidad de la materia orgánica del suelo. Este resultado nos indica que variaciones en la relación C/N en el suelo entre 9,2 a 10,7 son relevantes para explicar el efecto de la fertilización. Si bien la fertilización con urea aporta N al suelo, y por lo tanto reduce la relación C/N, la existencia de materia orgánica lábil, rica en N, va a condicionar la respuesta a la fertilización inorgánica. Por tanto, son recomendables las prácticas que mejoren la calidad de la materia orgánica del suelo por más que se realice fertilización inorgánica.

Estos resultados indican que es recomendable profundizar en el conocimiento de la respuesta de los álamos a la fertilización en las regiones de regadío, ya que evidencian que el crecimiento de los álamos está limitado por el nitrógeno. Sin embargo, como sólo se observó respuesta al fertilizante durante el primer año, se considera relevante evaluar la aplicación de la dosis más baja, con aplicaciones anuales, sobre todo considerando que el riego por manto puede remover del suelo cantidades importantes de nitrógeno inorgánico. Asimismo, las variaciones microambientales en la calidad física del suelo pueden modificar la respuesta a la fertilización. En particular, la relación C/N en el suelo es un factor a considerar, por lo tanto, sería relevante evaluar la aplicación de fuentes de nitrógeno orgánico, que pueden contribuir a mejorar este cociente. Finalmente, la fertilización puede contribuir a homogeneizar la estructura diamétrica de los rodales, que es una cualidad deseable en los rodales manejados con el fin de producir madera de calidad. Por tanto, además de evaluar los efectos de la fertilización a nivel de rodal, este trabajo aporta una metodología de análisis útil para evaluar la variabilidad entre individuos clonales en la respuesta a la fertilización.

CONCLUSIONES

Los resultados de este ensayo mostraron una mayor respuesta a la fertilización nitrogenada con las mayores dosis en los árboles de las clases diamétricas inferiores, y su efecto estuvo acotado a la primera temporada de crecimiento posterior a la aplicación. Por lo tanto, se podrían sugerir aplicaciones anuales de fertilizantes nitrogenados con dosis entre 50 y 100 kg N · ha⁻¹ en árboles menores a 10 cm de DAP. Teniendo en cuenta que la calidad de la materia orgánica del suelo, en particular la relación C/N, condiciona la respuesta a la fertilización con urea, será indispensable realizar los análisis de suelo correspondientes para conocer este parámetro antes de la aplicación del fertilizante.

Agradecimientos

Al Ing. Ftal. Pablo Gelati (FCAYF, UNLP) por los valiosos aportes al trabajo, y a Samir Ahmad (INTA Alto Valle) por la colaboración en las mediciones de campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Achinelli, F., E. Baridón, M. Coleman, M. Francisco, A. Aparicio & R. Marlats.** 2003a. Estado nutricional y respuesta a la fertilización localizada en *Populus*. Actas del XII Congreso Forestal Mundial 2003, Quebec, Canadá; Memoria N° 0386, Sesión B4c, Área B- Bosques para el planeta, p. 351.
- Achinelli, F., M. Francisco, A. Aparicio, A. Gennari, E. Prada, J. Giunchi & R. Marlats.** 2003b. Análisis comparado de las respuestas de clones de álamo al control de malezas químico-mecánico, químico total y a la fertilización de arranque con urea en plantaciones de la Provincia de Buenos Aires. XVIII Jornadas Forestales de Entre Ríos. Concordia, Entre Ríos.
- Aruani, M.C. & Sánchez, E.E.** 2003. Fracciones de micronutrientes en suelos del Alto Valle de río Negro, Argentina. *Rev. Ciencia del Suelo*. 2003, 21: 78-81.
- Baridón, E., M. Palenzona, R. Marlats; G. Senisterra & G. Millán.** 2008. *Populus* spp., respuestas clonales de crecimiento en suelos argiudoles y hapludoles, de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Ciencia e Investigación Agraria* 35 (3): 287-292.
- Bava, J.** 2017. Inventario nacional de plantaciones forestales. Inventario de plantaciones forestales bajo riego. Región Patagonia. Ministerio de Agroindustria, CIEFAP, UCAR, Pcias. del Chubut, Río Negro y Neuquén, UNPSJB, UNComahue. 46p.
- Binkley, D.** 2004. A hypothesis about the interaction of tree dominance and stand production through stand development. *Forest Ecology and Management*, Volume 190, Issues 2–3, Pages 265-271. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2003.10.018>
- Booth, N.W.H.** 2008. Nitrogen fertilization of hybrid poplar plantations in Saskatchewan, Canada. M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Canada, 140 pp.
- Borodowski, E.D.** 2017. Situación actual del cultivo y uso de las Salicáceas en la Argentina. Jornadas de Salicáceas 2017. V Congreso Internacional de las Salicáceas. Talca, Republica de Chile, 13 al 17 de noviembre de 2017.
- Brown, K.R. & R. van den Driessche.** 2005. Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on the growth and nutrition of hybrid poplars on Vancouver Island. *New Forests* 29: 89-104.
- Cornwell, W.K., Cornelissen, J.H.C., Amatangelo, K., Dorrepaal, E., Eviner, V.T., Godoy, O., Hobbie, S.E., Hoorens, B., Kurokawa, H., Pérez-Harguindeguy, N., Queded, H.M., Santiago, L.S., Wardle, D.A., Wright, I.J., Aerts, R., Allison, S.D., Van Bodegom, P., Brovkin, V., Chatain, A., Callaghan, T.V., Díaz, S., Garnier, E., Gurvich, D.E., Kazakou, E., Klein, J.A., Read, J., Reich, P.B., Soudzilovskaia, N.A., Vaieretti, M.V. & Westoby, M.** 2008. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, 11: 1065-1071. doi:10.1111/j.1461-0248.2008.01219.x
- Cortizo, S.** 2013. Efecto de la roya del álamo sobre el crecimiento del año y del rebrote de la siguiente temporada en tres clones con distinta susceptibilidad y arquitectura del canopy. Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires, Área de Producción Vegetal, Buenos Aires, Argentina.
- Di Rienzo, J.A., F. Casanoves, M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada & C.W. Robledo.** 2017. InfoStat versión 2017. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>

- FAO.** 2014. Disponibilidad de recursos y condiciones agroclimáticas de la Provincia de Río Negro. Proyecto FAO UTF ARG 017 Desarrollo Institucional para la Inversión. <http://www.fao.org/3/a-br168s.pdf>
- Faustino, L.I.; M.E. Rodríguez; J.A. Álvarez; G.N. Doffo; S.C. Cortizo & C. Graciano.** 2016. Rendimiento y extracción de nutrientes en estaqueros de álamo del Delta del Paraná fertilizados con nitrógeno o fósforo. *Rev. Fac. Agron.* Vol 115 (2): 179-190.
- Forrester, D.I.** 2019. Linking forest growth with stand structure: Tree size inequality, tree growth or resource partitioning and the asymmetry of competition. *Forest Ecology and Management*, Volume 447, Pages 139-157, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.053>
- Gee, G.W. y Bauder, J.W.** 1986. Particle size analysis. Methods of soil analysis, part 1. Physical and mineralogical methods. *Agronomy Monograph* N° 9. Second Edition. Pp. 383-411.
- Giuffré, L., O. Heredia, D. Cosentino, C. Pascale Medina & M.E. Conti.** 2003. Caracterización de suelos en el Valle del río Negro utilizados para cultivo de manzano de alto rendimiento. *Revista de la Facultad de Agronomía*, 23, (1) p.19-24.
- Heilman, P.E. & F. Xie.** 1993. Influence of nitrogen on growth and productivity of short-rotation *Populus trichocarpa* × *Populus deltoides* hybrids. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 1863-1869.
- Lombard, K., M. O'Neill, J. Mexal, A. Ulery, B. Onken, G. Bettmann & R. Heyduck.** 2010. Can soil plant analysis development values predict chlorophyll and total Fe in hybrid poplar? *Agroforest Syst.* 78: 1. doi:10.1007/s10457-009-9214-1.
- Otto, G.M., A.C.V. Motta & C.B. Reissman.** 2009. Adução nitrogenada em sistema silvipastoril álamo-pastagens de inverno. *Revista Árvore*, v.33, n.3, p. 433-441.
- Ripullone, F., M. Lauteri, G. Grassi, M. Amato & M. Borghetti.** 2004. Variation in nitrogen supply changes water-use efficiency of *Pseudotsuga menziesii* and *Populus x euroamericana*; a comparison of three approaches to determine water-use efficiency. *Tree Physiology* 24: 671-679.
- Rodríguez, A. & A. Muñoz.** 2006. Síntesis agrometeorológica para el período 1990-2004. EEA Alto Valle. Ed. INTA. Boletín Divulgación Técnica n° 53, 38 p.
- SAMLA.** 2004. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación Argentina. Dirección de Producción Agrícola. Sistema de Apoyo Metodológico a los Laboratorios de Análisis de Suelos Agua, Vegetales y Enmiendas Orgánicas.
- Stanturf, J.A. & C. van Oosten.** 2014. Operational poplar and willow culture. In: Poplars and willows: Trees for society and the environment. Chapter 5, pp. 200-257. Isebrands J.G. and Richardson J. (Eds.), FAO and CABI, UK.
- Stanturf, J.A., C. van Oosten, D.A. Netzer, M.D. Coleman, & C.J. Portwood.** 2001. Ecology and silviculture of poplar plantations. In: Poplar Culture in North America. Part A, Chapter 5. Edited by D.I. Dickmann, J.G. Isebrands, J.E. Eckenwalder, and J. Richardson. NRC Research Press, National Research Council of Canada, Ottawa, ON KIA OR6, Canada. pp. 153-206.
- Zhang, W., Calvo-Polanco, M., Chen, Z.C., Z.C. & Zwiazek, J.J.** 2013. Growth and physiological responses of trembling aspen (*Populus tremuloides*), white spruce (*Picea glauca*) and tamarack (*Larix laricina*) seedlings to root zone pH. *Plant Soil* 373, 775–786. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1843-5>