

Recomendación de fertilizantes para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes, Argentina utilizando balance nutricional

N.I. Stahringer^{1*}, J.C.L. Neves¹, R.B. Paulucio¹, J.L. Teixeira¹, P.A. Sussini², R.T. Argüelles³, y L.L. Chamorro⁴

- *Alcanzar metas de productividad deseadas en bosques implantados requiere suministrarles las cantidades de nutrientes que estos demandan.*
- *La calibración de modelos de balance nutricional para especies forestales plantadas en Argentina es una alternativa promisoría para recomendar fertilizantes con un fundamento más científico y menos empírico.*
- *Estos modelos permiten entender cuando es preciso fertilizar y con qué dosis según cada situación en busca de optimizar el uso de recursos y mantener la sustentabilidad de la producción forestal.*

Introducción

En Argentina existen aproximadamente 1 300 000 ha plantadas con especies forestales de rápido crecimiento entre las que se destacan los géneros *Pinus* y *Eucalyptus* (Argentina, 2018). La provincia de Corrientes posee la mayor superficie de bosques implantados del país con aproximadamente 500 000 ha, de las cuales alrededor de 70% son *Pinus* y 30% *Eucalyptus* (Elizondo, 2015).

La superficie de bosques implantados anualmente en Corrientes ronda las 20 000 ha (Elizondo, 2009, 2015), generalmente sobre suelos de baja fertilidad (Larocca et al., 2004; Aparicio et al., 2005). A su vez, las prácticas de fertilización y enclavado no son frecuentes en estas plantaciones forestales. Goya et al. (2003) advierten que, en caso de realizarse prácticas de cosecha más extractivas de nutrientes, como la retirada de toda la parte aérea de los árboles y/o la quema de los residuos tras la cosecha, se alcanzarán niveles críticos de estabilidad para P y K en aproximadamente 2 rotaciones forestales si no se realizan aportes por fertilización. Cabe destacar que este estudio fue realizado en Misiones, en suelos rojos (*Kandiudultes*). Estos suelos son similares a los de mayor índice de producción de Corrientes (Cruzate y Panigatti, 2008), resta entonces pensar en cuál es el panorama para los demás suelos forestales que son menos fértiles.

La obtención de elevadas productividades en bosques implantados, de manera sustentable, depende de un adecuado manejo nutricional entre otros factores. Este tipo de manejo contempla la provisión de nutrientes minerales vía fertilización, cuando el suministro de nutrientes por parte del suelo no alcanza a cubrir la demanda nutricional prevista para una determinada meta de productividad forestal.

Actualmente empresas forestales de Brasil, que en conjunto suman más de 1 000 000 ha, utilizan un modelo de balance nutricional desarrollado y mejorado en el

Departamento de Suelos de la Universidad Federal de Viçosa (UFV) (Barros et al., 1995), para obtener sus recomendaciones de fertilizantes. Dicho modelo ha contribuido significativamente para aumentar la productividad promedio de eucalyptus de 15 para 40 m³ ha⁻¹ año⁻¹ en los últimos 30 años.

En base a lo descrito, pensamos que, calibrar este modelo de balance nutricional para Corrientes, así como modelos ecofisiológicos y de diagnóstico nutricional, serían de gran utilidad para contribuir al desarrollo y a la sustentabilidad del sector forestal de la provincia y de la Argentina. A continuación, se describe la base teórica y la implementación del modelo de balance nutricional para plantaciones forestales en Corrientes, mayor información se puede consultar en Stahringer (2017).

Metodología de trabajo

El trabajo se realizó en Corrientes, provincia del noreste de Argentina, que limita al norte con Paraguay y al este con Brasil y Uruguay. La mayor parte de la provincia posee una altitud inferior a 80 m.s.n.m. (variando de 20 a 220 m.s.n.m.). Se caracteriza por tener un relieve con extensas planicies en el oeste, una parte deprimida en el centro de la provincia (Esteros del Iberá) y suaves colinas en el este. Posee un clima subtropical, muy cálido en verano, pero con heladas en invierno. Presenta frecuentes excesos hídricos en otoño y primavera, y moderados y eventuales déficit, principalmente en verano, con precipitaciones variando de 1100 a 1700 mm por año (Escobar et al., 1996; Cruzate y Panigatti, 2008).

El crecimiento de las especies forestales estudiadas varía según el tipo de suelo en Corrientes (Elizondo, 2009). Fueron realizados muestreos en diferentes regiones de la provincia. En cada región se muestreo una o más especies que fuesen especies representativas de la región (**Figura 1**). Dentro de cada especie se hizo el muestreo siguiendo una cronosecuencia, siendo que, para cada especie, y

¹ Departamento de Suelos, Universidad Federal de Viçosa. Minas Gerais, Brasil

² INTA Colonia Benítez, Argentina

³ Departamento de Agronomía, Universidad Nacional del Sur, Argentina

⁴ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

* Parte del trabajo de tesis del Dr. Nicolás Ignacio Stahringer, que fue reconocido con el Premio IPNI Scholar Award 2017

Autor de contacto. Correo electrónico: nicostahringer@hotmail.com

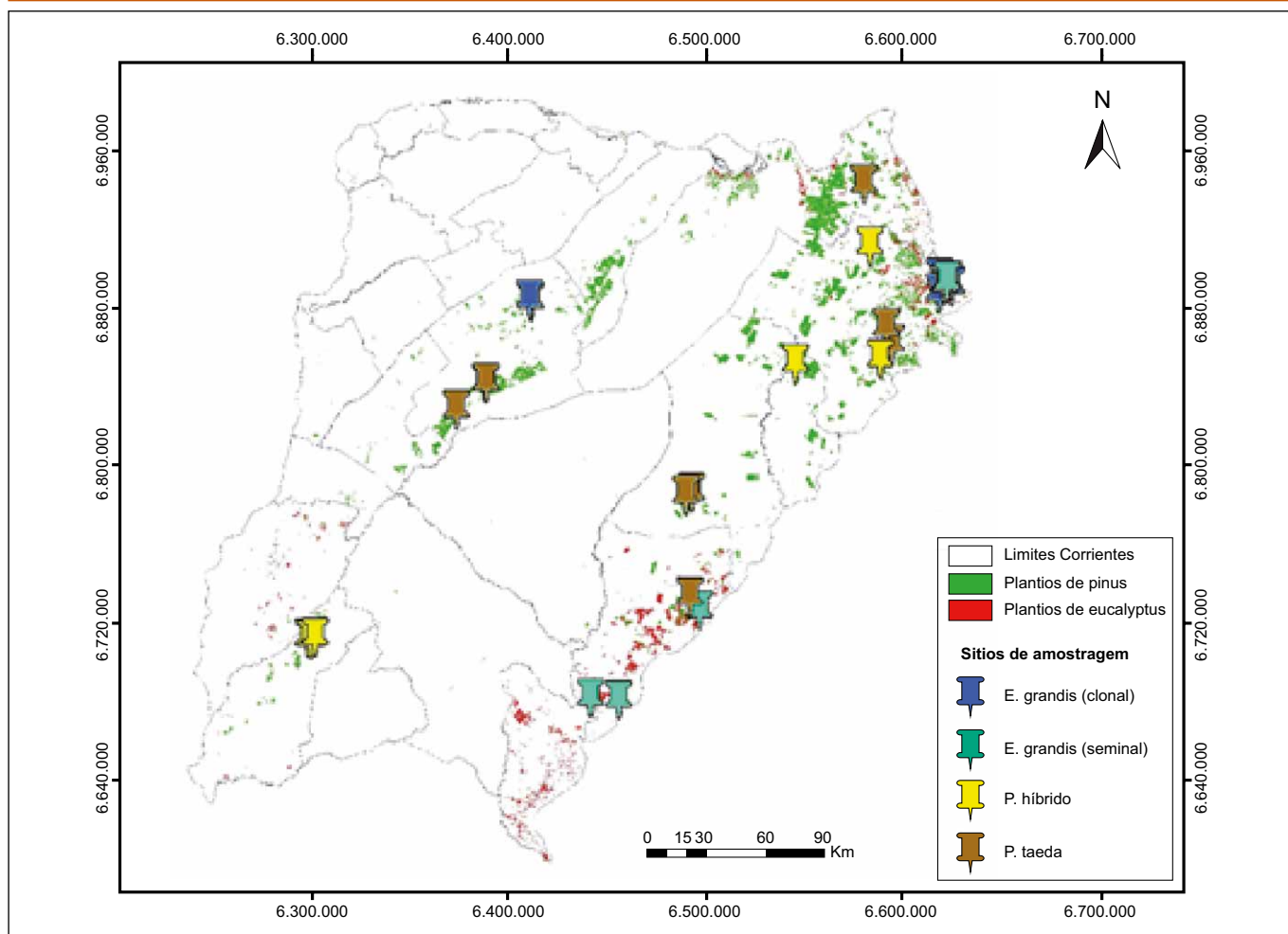


Figura 1. Mapa de la provincia de Corrientes con la distribución de los bosques cultivados y la ubicación de los puntos de muestreo de *P. taeda*, *P. híbrido*, *E. grandis* seminal y clonal. Fuente: Adaptado de (Elizondo, 2015).

dentro de cada región, se muestrearon por lo menos tres edades y tres clases diamétricas (superior, promedio e inferior) por edad. En este trabajo fueron muestreados árboles con edades variando de 10 meses hasta 16 años.

Para efectuar los muestreos se realizó un trabajo de campo que duró 35 días ininterrumpidos, recorriendo aproximadamente 5000 km a lo largo y ancho de la provincia. Previo al mismo se hizo un levantamiento de informaciones y se coordinó la logística con las cinco empresas forestales en cuyos campos se realizaron los muestreos.

Dentro del género *Pinus* se trabajó con *P. taeda* por ser la especie más plantada en Corrientes y con el pino entre *P. elliottii* var. *elliottii* x *P. caribaea* var. *hondurensis*, porque este último se está plantando cada vez más en la provincia. En cuanto que del género *Eucalyptus* se trabajó con la especie *E. grandis*. En Corrientes se planta *E. grandis* propagado por semilla (seminal) y vegetativamente (clonal). En trabajos realizados en la UFV se ha observado que materiales seminales y clonales poseen demandas nutricionales diferentes, razón por la cual se optó por muestrear tanto *E. grandis* (seminal) cuanto *E. grandis* (clonal) por separado.

El trabajo de campo consistió en muestreos de suelos y en la cubicación y muestreo de tejidos vegetales en

31 sitios forestales distribuidos por toda la provincia. Inicialmente se hizo una preselección en gabinete de los posibles sitios a muestrear en función de las características buscadas para cada especie y región. Ya a campo, se seleccionaron los mejores rodales de los que habían sido preseleccionados anteriormente. En los rodales seleccionados se midió el *cap* (circunferencia a la altura del pecho = circunferencia a 1.30 m de altura, x) en parcelas temporarias y se identificó un árbol superior ($\geq \bar{x} + s$), un árbol promedio ($\bar{x} - s < \bar{x} < \bar{x} + s$) y un árbol inferior ($\leq \bar{x} - s$). Una vez identificados los árboles, estos fueron apeados, se midió su altura, se retiraron discos de cada cuarto del fuste y se pesaron por separado todos los componentes (hojas, ramas y tronco) de cada árbol. A su vez, se tomaron muestras de hojas, ramas, madera, corteza y hojarasca para determinar materia seca y concentración de macronutrientes [nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S)] y micronutrientes [cobre (Cu), hierro (Fe), cinc (Zn), manganeso (Mn) y boro (B)]. En los mismos sitios, se muestreo el suelo hasta 1 m de profundidad (0-20, 20-40, 40-60 y 60-100 cm) para realizar análisis de rutina y se tomaron muestras sin disturbar para determinar la densidad aparente (0-20 y 20-40 cm). En total fueron recolectadas 1620 muestras de tejidos vegetales y 318 muestras de suelo.

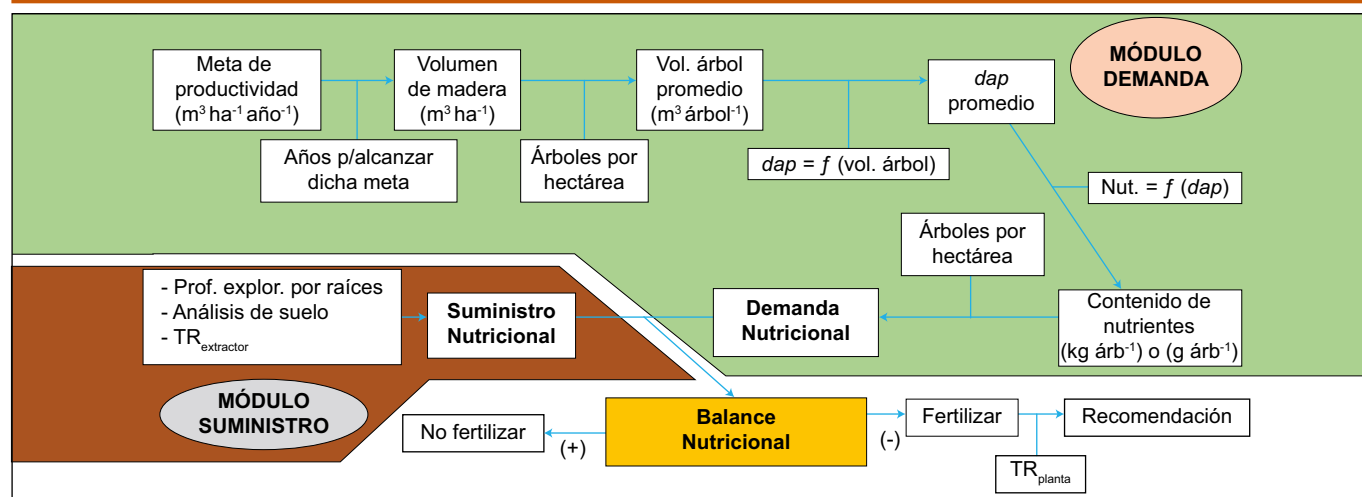


Figura 2. Diagrama de flujo del modelo de balance nutricional para cultivos forestales considerando el módulo demanda (planta) y el módulo suministro (suelo). Fuente: Adaptado de Stahinger et al. (2014).

Modelo de balance nutricional: Base teórica

Para llegar a recomendaciones de fertilizantes fundamentadas, que contemplen la demanda de nutrientes del cultivo y el suministro de nutrientes del suelo, utilizamos modelos basados en el balance nutricional entre estos componentes. Modelos de este tipo vienen siendo desarrollados en la UFV para diferentes cultivos (Novais et al., 2007). La lógica del modelo de balance nutricional para cultivos forestales que se utilizó en este trabajo se encuentra resumida en el diagrama de flujo de la **Figura 2**.

Para calcular la demanda nutricional del rodal se debe partir de una meta de productividad que se pretende alcanzar en un dado periodo de tiempo, expresada como incremento medio anual del tronco a una determinada edad (IMA_{tronco}). Dicha meta puede ser establecida por el productor forestal a partir de su experiencia y de conocer el sitio forestal donde se va a establecer la plantación, o bien puede ser estimada utilizando el modelo ecofisiológico 3-PG (*Physiological Principles in Predicting Growth*). Este modelo, desarrollado por Landsberg y Waring (1997) fue parametrizado para *Pinus* y *Eucalyptus* en Corrientes (Stahinger, 2017). A partir de esta meta, y teniendo en cuenta la edad para la cual fue establecida, se calcula el volumen de madera a producir por hectárea. Al dividir ese volumen por el número de árboles en una hectárea se obtiene el volumen de un árbol promedio de la población, y, a partir de este se calcula su *dap* (diámetro a la altura del pecho = diámetro a 1.30 m de altura) utilizando una ecuación alométrica ajustada para tal fin. Una vez calculado este *dap*, se lo utiliza en ecuaciones alométricas ajustadas en este trabajo, para calcular los contenidos de cada nutriente en los componentes de un árbol promedio de la población. Para ajustar las ecuaciones alométricas se usaron datos obtenidos en la cubicación de los árboles, así como los contenidos de nutrientes determinados a partir de los valores de materia seca y concentraciones. Los contenidos de macronutrientes se expresan en kg del nutriente por componente, y los contenidos de micronutrientes se expresan en g del nutriente por componente. A continuación, para calcular

la demanda de cada nutriente en un árbol promedio, se suman los valores de los contenidos obtenidos en cada componente. Al multiplicar el contenido de cada nutriente de un árbol promedio por el número de árboles en una hectárea se obtiene la demanda de cada nutriente en $kg\ ha^{-1}$ para macronutrientes y en $g\ ha^{-1}$ para micronutrientes (**Figura 2**).

Para conocer la cantidad de nutrientes suministrados por el suelo se debe tener en cuenta la profundidad explorada por las raíces del cultivo, la concentración de cada nutriente y la tasa de recuperación por el extractante (TR_{ext}). En este trabajo se consideraron las camadas de 0-20 y 20-40 cm ya que en las camadas superficiales (primeros 30-40 cm) se encuentran más de 70% de las raíces finas de *Pinus* y *Eucalyptus* (Nambiar, 1983; Neves, 2000), siendo que estas raíces y los pelos radiculares son los principales responsables por la absorción de nutrientes (Marschner, 1995). La concentración de cada nutriente en el suelo se obtiene a partir de análisis de rutina. Por su parte, la TR_{ext} sirve para determinar qué proporción del nutriente que se encuentra en el suelo, o que es aplicado vía fertilizante, efectivamente es recuperado por el extractante químico utilizado (**Figura 2**).

El balance nutricional consiste en hacer la diferencia entre la demanda, estimada para una determinada meta de producción, y el suministro provisto por el suelo. Si el balance arroja un valor positivo, para un dado nutriente, en principio no es necesario fertilizar con ese nutriente, pero siendo conscientes de que se está reduciendo la fertilidad del suelo (**Figura 2**). Sin embargo, pensando en la sustentabilidad del sistema productivo, es importante tener en cuenta la exportación de nutrientes con los productos cosechados para reponerlos vía fertilización. Además, para el caso particular del P, hay que destacar que independientemente de que el balance nutricional sea positivo, se recomienda una fertilización de implantación con 40 g de P_2O_5 por planta para eucalyptus ya que este nutriente favorece el desarrollo de raíces finas. Este estímulo del P en el arranque se debe a que el nivel crítico para la fase de implantación de eucalyptus es

Tabla 1. Resultados de análisis de suelo previo a un segundo ciclo de eucalyptus de dos sitios forestales de Corrientes, Argentina.

Característica	Unidad	Sitio 1		Sitio 2	
		0-20 cm	20-40 cm	0-20 cm	20-40 cm
pH ^{1/}		4.98	4.65	4.32	4.66
M.O. ^{2/}	% (dag kg ⁻¹)	1.86	1.19	1.39	0.72
P ^{3/}	ppm (mg kg ⁻¹)	2.93	1.72	1.54	0.29
K ^{4/}	cmol _c kg ⁻¹	0.09	0.06	0.04	0.02
Ca ^{4/}	cmol _c kg ⁻¹	3.27	1.22	0.21	0.25
Mg ^{4/}	cmol _c kg ⁻¹	0.78	0.46	0.43	0.22
Na ^{4/}	cmol _c kg ⁻¹	0.05	0.04	0.02	0.02
Acidez intercambiable (Al ³⁺) ^{5/}	cmol _c kg ⁻¹	0.11	0.69	0.8	0.71
C.I.C. efectiva (t)	cmol _c kg ⁻¹	4.3	2.47	1.5	1.22
C.I.C. total (T)	cmol _c kg ⁻¹	5.7	3.37	2.62	1.9
Saturación por bases (V)	%	73.4	52.8	26.6	26.8
Saturación por aluminio (m)	%	2.6	27.9	53.5	58.3
Arena ^{6/}	%	78.57	76.01	75.92	79.7
Limo ^{6/}	%	9.36	11.08	14.43	10.51
Arcilla ^{6/}	%	12.07	12.92	9.65	9.8
Densidad Aparente ^{7/}	g cm ⁻³	1.59	1.64	1.56	1.59
P-rem ^{8/}	mg L ⁻¹	46.4	33.9	34.4	37.7

^{1/} pH en agua, relación 1:2.5. ^{2/} Materia orgánica, mét.: Walkey & Black. ^{3/} P disponible, mét.: Bray- 1. ^{4/} Cationes intercambiables, mét.: Acetato de amonio 1 N a pH 7. ^{5/} Mét.: KCl 1 mol L⁻¹. ^{6/} Mét. de Bouyoucos. ^{7/} Mét.: cilindro de volumen conocido. ^{8/} P remanente = concentración de P en la solución de equilibrio, determinado luego de agitar por una hora una alícuota de suelo con CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, conteniendo 60 mg L⁻¹ de P, siendo la relación suelo:solución de 1:10 (Alvarez et al., 2000).

muy elevado, del orden de 60 a 80 mg dm⁻³ (Mehlich-1) para suelos arcillosos y arenosos respectivamente (Novais et al., 1986), lo cual equivale a aproximadamente 60 a 65 mg kg⁻¹ (Bray-1), según cálculos realizados con base en Bahia Filho et al. (1983) y Stahringer (2017). En pino también se han registrado efectos positivos para la fertilización fosfatada al momento de la implantación con dosis de 45-55 g P₂O₅ por planta (Fernandez et al., 1999; Ibañez et al., 2004).

Por otro lado, si el balance arroja un valor negativo, para un dado nutriente, es necesario fertilizar con dicho nutriente para que la meta de productividad no se vea comprometida por este elemento. La cantidad del dado nutriente que debe ser adicionada vía fertilizante equivale a la diferencia entre la demanda y el suministro del nutriente en cuestión dividido por la tasa de recuperación por la planta (TR_{planta}). Esta última se utilizó para ajustar la dosis a ser adicionada de cada nutriente debido a que los árboles no consiguen absorber el 100% de un nutriente aplicado al suelo vía fertilizante sino una fracción del mismo. El porcentaje de cada nutriente que consiguen absorber es la TR_{planta} (Figura 2).

Ejemplo de utilización del modelo de balance nutricional en Corrientes

Se plantea un ejemplo de utilización del modelo de balance nutricional considerando N, P, K, Ca y Mg a modo de un estudio de caso. El escenario hipotético es un cultivo de *E. grandis* (seminal), con 1000 árboles ha⁻¹, que sería implantado buscando un IMA_{tronco} a los 4 años (edad del primer raleo) de 35 m³ ha⁻¹ año⁻¹. Utilizando una ecuación alométrica ajustada se obtiene el *dap* de un árbol promedio de este rodal que sería de 15.6 cm. Se plantea este ejemplo para dos sitios forestales de Corrientes. Ambos sitios fueron ganaderos hasta aproximadamente 20 años atrás. Luego tuvieron un ciclo de eucalyptus y estarían entrando a un segundo ciclo de eucalyptus. Así, en un análisis de suelos hecho previo a la implantación al segundo ciclo de eucalyptus, es posible observar que los sitios se diferencian entre si principalmente porque uno posee una mayor fertilidad que el otro (Tabla 1).

A partir de los resultados de análisis de suelo presentados en la Tabla 1, teniendo en cuenta una profundidad explorada por las raíces de 40 cm y considerando las TR_{ext}, es posible estimar, en ambos sitios, el suministro de nutrientes por parte de los suelos (Tabla 2).

Tabla 2. Suministro de nutrientes y TR_{ext} en dos sitios forestales de Corrientes, Argentina.

Nutriente	Sitio 1					Sitio 2				
	0-20 cm		20-40 cm		Total	0-20 cm		20-40 cm		Total
	TR _{ext}	kg ha ⁻¹	TR _{ext}	kg ha ⁻¹		TR _{ext}	kg ha ⁻¹	TR _{ext}	kg ha ⁻¹	
N		409		117	526		300		69	369
P	0.59	16	0.57	10	26	0.64	7	0.64	1	9
K	0.68	158	0.85	93	251	0.84	56	0.90	32	87
Ca	0.93	2245	0.93	866	3111	0.93	138	0.93	169	307
Mg	0.94	321	0.94	194	515	0.94	175	0.94	91	265

El suministro de N fue calculado con base en los contenidos de materia orgánica de cada camada y teniendo en cuenta una tasa de mineralización de N de 3.0% y 1.3% para las camadas de 0-20 y 20-40 cm, respectivamente. Para llegar al valor de N suministrado por camada se utilizó el método desarrollado por Stanford & Smith (1972) y ajustado por Gonçalves et al. (2001) para condiciones de ecosistemas forestales. Las tasas de recuperación por los extractantes de P, K, Ca y Mg fueron obtenidas a partir de un experimento conducido como para tal fin (Stahring, 2017). La TR_{ext} de P considera el porcentaje de arcilla, o, en caso de disponer de la información, utiliza la variable P remanente (P-rem) que tiene la virtud de contemplar porcentaje de arcilla y su mineralogía en una determinación simple (Alvarez et al., 2000). Esta determinación ha mostrado ser útil como estimador del factor capacidad de P en suelos de México,

Brasil y Argentina (Boschetti et al., 1998). Para K, la TR_{ext} considera la capacidad de intercambio catiónica total (T) y el porcentaje de arcilla. Las tasas de recuperación por los extractantes para Ca y Mg son valores constantes.

La demanda nutricional se calculó con base en ecuaciones alométricas ajustadas por (Stahring, 2017). Este tipo de ecuaciones han sido ajustadas también para macro y micronutrientes de *E. grandis* (clonal), *P. taeda* y *P. híbrido*. Dichas ecuaciones permiten estimar el contenido de nutrientes en cada componente por árbol (Tabla 3).

La demanda de cada nutriente se calculó según la sumatoria de los contenidos del nutriente en todos los órganos del árbol y multiplicando este valor por el número de árboles por hectárea. Como en este trabajo se muestreo la parte aérea de los árboles, las ecuaciones ajustadas permitieron estimar los contenidos de

Tabla 3. Ecuaciones alométricas para estimar contenidos de N, P, K, Ca y Mg (en g árbol⁻¹) de los componentes de la parte aérea de *E. grandis* (seminal) en Corrientes, Argentina (Stahring, 2017).

Nutriente	Componente	Ecuación	R ²
N	Hojas	$\hat{y} = 34.581 e^{0.0791 dap}$	0.7795
	Ramas	$\hat{y} = 8.8358 e^{0.1043 dap}$	0.8890
	Madera	$\hat{y} = 0.0506 dap^{2.5202}$	0.9835
	Corteza	$\hat{y} = 0.0394 dap^{2.3137}$	0.9825
P	Hojas	$\hat{y} = 0.3465 dap^{1.1831}$	0.7627
	Ramas	$\hat{y} = 0.1107 dap^{1.5734}$	0.8457
	Madera	$\hat{y} = 0.0104 dap^{2.2632}$	0.9598
	Corteza	$\hat{y} = 0.0036 dap^{2.5474}$	0.9231
K	Hojas	$\hat{y} = 9.458 e^{0.0865 dap}$	0.8424
	Ramas	$\hat{y} = 9.6758 e^{0.1002 dap}$	0.8319
	Madera	$\hat{y} = 0.1099 dap^{2.2796}$	0.9777
	Corteza	$\hat{y} = 0.0346 dap^{2.4627}$	0.9569
Ca	Hojas	$\hat{y} = 1.7937 dap^{1.3616}$	0.7734
	Ramas	$\hat{y} = 11.754 e^{0.1087 dap}$	0.9135
	Madera	$\hat{y} = 0.0392 dap^{2.6135}$	0.9861
	Corteza	$\hat{y} = 0.077 dap^{2.8346}$	0.9692
Mg	Hojas	$\hat{y} = 2.8454 e^{0.0915 dap}$	0.8344
	Ramas	$\hat{y} = 1.3583 e^{0.121 dap}$	0.9140
	Madera	$\hat{y} = 0.0119 dap^{2.3414}$	0.9860
	Corteza	$\hat{y} = 0.0158 dap^{2.4955}$	0.9707

Tabla 4. Contenido de nutrientes por órgano y por árbol, y demanda nutricional de un rodal de *E. grandis* (seminal) con 1000 árboles ha⁻¹ para alcanzar un IMA_{tronco} = 35 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a los 4 años.

Nutriente	Hojas	Ramas	Madera	Corteza	Parte aérea	Raíces	Árbol	Rodal
	g árbol ⁻¹						kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹
N	119.2	45.2	51.8	22.9	239.1	37.6	276.7	276.7
P	9.0	8.4	5.3	4.0	26.6	2.5	29.0	29.0
K	36.6	46.4	58.1	30.2	171.3	26.3	197.6	197.6
Ca	75.9	64.4	51.9	187.2	379.3	30.6	409.9	409.9
Mg	11.9	9.0	7.5	15.1	43.5	19.4	62.9	62.9

nutrientes en los componentes de dicha parte (Tabla 3). A su vez, con base en datos de literatura sobre proporción de nutrientes en las raíces (Reis et al., 1987; Neves, 2000; Barros Filho, 2003; Witschoreck, 2008), se consideró también la cantidad de cada nutriente localizada en este órgano y, así, estimar la demanda total para cada nutriente en el árbol completo. A continuación, se explica un ejemplo con K para facilitar la comprensión de esta lógica.

K en hojas = 36.6 g árbol⁻¹ = 0.0366 kg árbol⁻¹ x 1000 árboles ha⁻¹ = 36.6 kg ha⁻¹

K en ramas = 46.4 g árbol⁻¹ = 0.0464 kg árbol⁻¹ x 1000 árboles ha⁻¹ = 46.4 kg ha⁻¹

K en madera = 58.1 g árbol⁻¹ = 0.0581 kg árbol⁻¹ x 1000 árboles ha⁻¹ = 58.1 kg ha⁻¹

K en corteza = 30.2 g árbol⁻¹ = 0.0302 kg árbol⁻¹ x 1000 árboles ha⁻¹ = 30.2 kg ha⁻¹

K en parte aérea = 36.6 + 46.4 + 58.1 + 30.2 = 171.3 kg ha⁻¹

Demanda total de K = [171.3 kg ha⁻¹ / (100-13.3)] x 100 = 197.6 kg ha⁻¹

En este ejemplo, 13.3% del K de los árboles está en las raíces. La demanda total de K para alcanzar una meta de productividad de 35 m³ ha⁻¹ año⁻¹ a los 4 años es de 197.6 kg ha⁻¹.

De la misma manera que fue ejemplificado para K, se calculan los contenidos y la demanda de los otros nutrientes (Tabla 4). A partir de los contenidos de nutrientes en la parte aérea se calculó cómo estos se distribuyeron en la parte que será cosechada al final del ciclo (Figura 3). Cabe destacar que la parte que será cosechada varía según el sistema de cosecha empleado.

A partir de la Figura 3, y si bien es en una edad joven (4 años), es posible evidenciar que el sistema de cosecha empleado, extracción del fuste entero (madera + corteza) o del árbol entero (madera + corteza + ramas + hojas), tiene una gran influencia en cuanto a la exportación de nutrientes que se haga, tal como ha sido demostrado también para *P. taeda* (Goya et al., 2003; Martiarena et al., 2011). En realidad, el producto de interés comercial es la madera, con lo cual la mejor recomendación, buscando exportar menos nutrientes con la cosecha, es la de dejar no solo hojas y ramas en el campo sino también la corteza

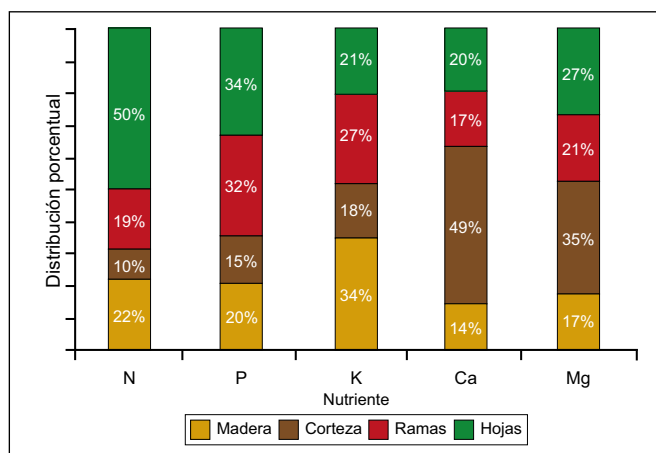


Figura 3. Distribución porcentual de nutrientes en los compartimientos de la parte aérea de un rodal de *E. grandis* (seminal) con 4 años.

debido a la elevada concentración de nutrientes que posee este compartimiento, principalmente Ca y Mg (Figura 3). Cabe destacar que la concentración de nutrientes en la corteza es mayor en eucalyptus que en pino (Stahinger, 2017). En esta misma línea, y trabajando con un banco de datos de 1217 árboles de eucalyptus muestreados en 20 regiones de Brasil, Santana et al. (2008) observaron que la corteza representa, en promedio, 13% del fuste entero (considerando edades de 4.5 años a 8.5 años) y contiene 72% del Ca, 66% del Mg, 47% del P, 43% del K y 30% del N en relación al total de nutrientes exportados en la cosecha del fuste entero. Estos mismos autores destacaron que la amplitud de variación de contenido de nutrientes en la corteza, en kg ha⁻¹, considerando diferentes productividades, fue de: 33 a 74 (N), 5 a 10 (P), 30 a 83 (K), 70 a 405 (Ca) y 12 a 46 (Mg). Dichas cantidades equivalen, en kg ha⁻¹, a: 70 a 160 kg urea ha⁻¹, 25 a 50 kg fosfato diamónico ha⁻¹, 60 a 166 kg cloruro de potasio ha⁻¹ y 229 a 1517 kg dolomita ha⁻¹. Estos números denotan la importancia de la corteza como destino de nutrientes dentro de los árboles estudiados, siendo que en la mayoría de los casos este compartimiento es retirado del campo con la cosecha cuando no es el órgano de interés real para la industria.

Actualmente, existe una tendencia creciente de proyectos para obtener energía eléctrica a partir de residuos forestales (residuos de cosecha, podas, raleos, etc.). Desde un punto de vista estrictamente económico puede ser considerado como un aprovechamiento de un material hasta ahora inutilizado (Mazzuchelli y Moroni,

Tabla 5. Balance nutricional para llegar a las recomendaciones de nutrientes, en kg ha⁻¹ de cada nutriente, en los sitios 1 y 2.

Nutriente	Suministro	Demanda	Balance nutricional	Fertilización de implantación	TR _{planta}	Recomendación
kg ha ⁻¹						
Sitio 1						
N	526	277	250	-	-	0
P	26	29	-3	-17.5	0.53	40
K	251	198	53	-	-	0
Ca	3111	410	2701	-	-	0
Mg	515	63	452	-	-	0
Sitio 2						
N	369	277	92	-	-	0
P	9	29	-20	-17.5	0.53	70
K	87	198	-110	-	0.71	155
Ca	307	410	-103	-	0.37	275
Mg	265	63	202	-	-	0

2013). Lo importante es destacar que en caso de que el aprovechamiento de los árboles sea integral o de que la cosecha realizada lleve a la retirada total de la parte aérea de los árboles, esto implicará que la cantidad de nutrientes exportados en cada ciclo necesariamente será mayor. Los sistemas productivos siempre serán interesantes cuando sean rentables, pero para que el análisis económico sea completo, se debería contemplar también el costo de reposición de los nutrientes exportados en busca de mantener la calidad de los sitios.

En el sitio 1 (sitio de mayor fertilidad), se observa que el suelo tiene la capacidad suministrar las cantidades demandadas de N, K, Ca y Mg, pero que se debe fertilizar con P (**Tabla 5**). La recomendación de dicho nutriente, en kg P ha⁻¹ (multiplicar por 2.29 para pasar a P₂O₅), se obtiene al dividir la demanda (3 + 17.5) por la TR_{planta} para P. Para estimar la TR_{planta} se utiliza la determinación de P-rem (Alvarez et al., 2000), o se estima a partir del porcentaje de arcilla (Freire, 2001). Se debe utilizar una fuente soluble de P, por ejemplo fosfato monoamónico, y la aplicación del mismo debe ser incorporado al suelo (en surco continuo u hoyos laterales a la planta) inmediatamente previo a la implantación o hasta una semana después de la misma (Santana et al., 2014). La localización del P cobra aun mayor importancia en suelos rojos de Misiones y el norte de Corrientes, muy utilizados para plantaciones forestales, ya que la fijación de P por parte de estos suelos es elevada (Quintero et al., 1999). Además, por lo que se observa en el balance de K, es probable que en el próximo ciclo se pueda tener respuesta positiva a la fertilización potásica en este sitio, ya que la cantidad que el suelo posee de este nutriente apenas cubre la demanda del ciclo actual.

Ya en el sitio 2 (sitio de menor fertilidad), el balance nutricional dio negativo para P, K y Ca, indicando que en este sitio el suministro de estos nutrientes no es suficiente para que el cultivo alcance la meta de productividad sin que el aspecto nutricional sea una limitante (**Tabla 5**). Como se indicó anteriormente, para llegar a las recomendaciones de la cantidad de cada nutriente que debe ser aplicada vía fertilizante se divide el valor absoluto obtenido del balance nutricional del mismo por su respectiva TR_{planta}. Para P, tener en cuenta que experiencias en diferentes empresas forestales de Brasil demuestran que no hay respuesta a la fertilización para dosis superiores a 150 kg ha⁻¹ de P₂O₅ vía fertilizantes solubles. Por lo tanto, debe considerarse ese valor como mayor dosis a ser recomendada para este nutriente. Las TR_{planta} de K y Ca consideran la dosis aplicada, siendo que cuanto mayores son las dosis aplicadas, menores son los valores de dichas tasas (Stahinger, 2017). La aplicación de K debe hacerse dividida en 3 veces, una pequeña dosis en la implantación (por ejemplo 6:30:6) y las restantes en los siguientes 2-3 años del cultivo como indican Barros y Novais (1996). Dividir la dosis de K cobra aún mayor importancia en suelos arenosos, como el de este sitio, ya que poseen baja C.I.C. y esto favorece importantes pérdidas por lixiviación en caso de no dividir la dosis recomendada. Además para eucalyptus no se recomiendan dosis mayores que 120 kg ha⁻¹ de K₂O en una sola aplicación (Santana et al., 2014). Respuestas importantes a la aplicación de K en suelos pobres en este nutriente han sido encontradas para eucalyptus (Silveira & Malavolta, 2000; Barros et al., 2014). Por su parte, el Ca debe ser aplicado en un lapso de tiempo que va desde antes de la implantación hasta los 6 meses posterior a la misma (Santana et al., 2014). Como fuente de Ca se recomienda usar calcáreos dolomíticos cuando Mg <

0.20 cmol_c dm⁻³ (Barros et al., 2014). En el caso de este ejemplo como la concentración es mayor que ese valor (**Tabla 1**), se recomienda utilizar un calcáreo sin Mg.

La comparación planteada en este ejemplo entre dos sitios forestales de fertilidad diferente permite vislumbrar que puede ser interesante utilizar esta lógica de balance nutricional no solo para recomendación de fertilizantes, sino también para la diagramación de experimentos. Considerar tanto la estimación de la demanda nutricional como la diferenciación de sitios de acuerdo a su fertilidad puede ayudar a entender mejor diferentes potenciales de respuesta a la fertilización según las características de los sitios.

Al realizar un cultivo forestal en un determinado sitio parte de los nutrientes son exportados con la cosecha. Es evidente que esa cantidad no equivale a toda la demanda nutricional estimada puesto que, independiente del sistema de cosecha empleado siempre las raíces quedarán en el campo, y con ellas algunos nutrientes (**Tabla 4**). Sin embargo, la mayor cantidad de nutrientes está presente en la parte aérea de los árboles y, por ello, cuanto mayor sea la cantidad de residuos que se dejen el campo menor será la cantidad de nutrientes exportados. Consecuentemente, menor será la cantidad de nutrientes que necesitaran ser reintegrados al sistema para mantener la sustentabilidad de la producción forestal. Trabajos como este sirven no solo para recomendar fertilizantes sino también para entender mejor la demanda, suministro y exportación de nutrientes. Seguramente al igual que Cruzate y Casas (2017) citan para cultivos de granos en Argentina, una elevada proporción de los nutrientes que son exportados por las cosechas forestales no son devueltos vía fertilización. Debemos ser conscientes de que esto está llevando al agotamiento de la fertilidad de los suelos forestales y provocará una disminución de las productividades al cabo de algunas rotaciones. Además, la tendencia en el país, y en general a nivel mundial, de acortar los turnos de corte para producir mayor volumen de madera en menos tiempo, lleva a una mayor exportación de nutrientes, debido a un menor ciclado biogeoquímico de los mismos, como fue señalado por ejemplo por Martiarena (2016) para *Pinus taeda*. Ante esta realidad todo indica que, si se quiere mantener la sustentabilidad de la producción forestal en Argentina, con elevadas productividades, habrá que comenzar a fertilizar los rodales de manera a restituir los nutrientes exportados y así mantener la capacidad productiva de los sitios.

Consideraciones finales

Las dosis de fertilizantes a utilizar deben tener en cuenta la demanda nutricional vinculada a una meta de productividad y el suministro de nutrientes relacionado con el análisis de suelo previo a la plantación del cultivo.

Comprender bien la demanda de nutrientes según la especie forestal y fase del cultivo, así como el suministro de nutrientes según el sitio forestal, son aspectos que

ayudan a entender mejor la respuesta a fertilizantes en cultivos forestales.

Conocer la disponibilidad de nutrientes en los suelos y la cantidad exportada con cada cosecha nos permitirá saber cuan sustentable es nuestro sistema productivo y cuantas rotaciones “tolerará” cada sitio forestal sino reponemos los nutrientes exportados.

Agradecimientos

Al Departamento de Suelos de la UFV, al programa PEC-PG del Ministerio de Relaciones Exteriores de Brasil, al Ministerio de Producción de Corrientes, a las empresas forestales Bosques del Plata, EVASA, MASISA, Pomera Maderas y Zeni, al INTA, a la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional del Nordeste y al Servicio Meteorológico Nacional. Un agradecimiento especial para cada uno por su contribución para la realización de este trabajo.

Bibliografía

- Alvarez V., V.H., R.F. Novais, L.E. Dias, y J.A. Oliveira. 2000. Determinação e uso do fósforo remanescente. Boletim Informativo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo 25(1):27-32.
- Aparicio, J.L., F. Larocca y F. Dalla Tea. 2005. Silvicultura de establecimiento de *Eucalyptus grandis*. IDIA XXI. 66-69 pp.
- Argentina, Ministerio de Modernización. 2018. Inventario nacional de plantaciones forestales por superficie. <http://datos.gob.ar/dataset/inventario-nacional-plantaciones-forestales-por-superficie>
- Bahia Filho, A.F.C., J.M. Braga, A.C. Ribeiro, y R.F. Novais. 1983. Sensibilidade de extratores químicos à capacidade tampão de fósforo. Rev Bras Ciência do Solo 7:243-249.
- Barros, N.F., J.C.L. Neves, y R.F. Novais. 2014. Nutrição e Adubação Mineral do Eucalipto. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência. Viçosa. SIF. Cap 9:187-208.
- Barros, N.F., y R.F. Novais. 1996. Eucalypt nutrition and fertilizer regimes in Brazil. En: Attwill, P.M. y M.A. Adams (ed.). Nutrition of eucalyptus. Australia: CSIRO. pp. 335-355.
- Barros, N.F., R.F. Novais, J.L. Teixeira, y E.I. Fernandes Filho. 1995. NUTRICALC 2.0 - Sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. Bosque 16(1):129-131.
- Barros Filho, N.F. 2003. Sistema de Recomendação de Fertilizantes para o *Pinus taeda* L. (NutriPinus). Universidade Federal de Santa Maria.
- Boschetti, N.G., C.E. Quintero, y R.A. Benavidez. 1998. Caracterização do fator capacidade-tampão de fosfatos em solos de Entre Ríos, Argentina. Rev Bras Ciência do Solo 22:95-99.
- Cruzate, G.A., y R.R. Casas. 2017. Balance de nutrientes en los suelos agrícolas de la Argentina en la campaña 2015/16. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica 28:14-23.
- Cruzate, G.A., y J.L. Panigatti. 2008. Suelos y ambientes de Corrientes. INTA.

- Elizondo, M.H. 2009. Primer Inventario Forestal de la provincia de Corrientes.
- Elizondo, M.H. 2015. Actualización del Inventario de Plantaciones Forestales de la provincia de Corrientes. Consejo Federal de Inversiones - provincia de Corrientes.
- Escobar, E.H., H.D. Ligier, R. Melgar, H. Matteio, y V. Vallejos. 1996. Mapa de Suelos de la provincia de Corrientes 1:500.000. Corrientes: Área de Producción Vegetal y Recursos Naturales E.E.A. INTA - Corrientes.
- Fernández, R., F. Rodríguez Aspillaga, A. Lupi, A. Hernández y H. Reis. 1999. Efectos de diferentes prácticas de preparación del terreno y fertilización sobre el crecimiento inicial del *Pinus* spp en el NE argentino. Bosque 20:47-55.
- Freire, F.J. 2001. Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar. Universidade Federal de Viçosa.
- Gonçalves, J.L.M., K.C.F.S. Mendes, y C.M. Sasaki. 2001. Mineralização de Nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do estado de São Paulo. Rev Bras Ciência do Solo 25(3):601-616.
- Goya, J.F., C. Pérez, J.L. Frangi, y R. Fernández. 2003. Impacto de la cosecha y destino de los residuos sobre la estabilidad del capital de nutrientes en plantaciones de *Pinus taeda* L. Ecología Austral 13:139-150.
- Ibañez, C., P. Nuñez, R. Pezzutti y F. Rodríguez. 2004. Efectos de la roturación del suelo y fertilización con fósforo en el crecimiento inicial de plantaciones de *Pinus taeda*, en suelos rojos del Noreste de la provincia de Corrientes, Argentina. Bosque 25(2):69-76.
- Landsberg, J.J., y R.H. Waring. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. For Ecol Manage 95:209-228.
- Larocca, F., F. Dalla Tea, y J.L. Aparicio. 2004. Técnicas de implantación y manejo de *Eucalyptus grandis* para pequeños y medianos forestadores en Entre Ríos y Corrientes. XIX Jornadas Forestales de Entre Ríos. VII 1-16.
- Marschner, H. 1995. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2nd Edition. London: Academic Press.
- Martiarena, R.A. 2016. Efecto de la disponibilidad de recursos sobre la eficiencia de uso y conservación de los nutrientes en función de las condiciones edafoclimáticas, edad y manejo de las plantaciones de *Pinus taeda* L. en la Mesopotamia Argentina. Universidad Nacional de La Plata - Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales.
- Martiarena, R.A., M.A. Pinazo, A. Von Wallis, O. Knebel, y N.M. Pahr. 2011. Alternativas de manejo silvícola para la conservación de nutrientes en sistemas forestales en Misiones, Argentina. Ciencia del Suelo. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo 29:39-48.
- Martiarena, R.A., A. Von Wallis, y O. Knebel. 2009. Pérdida de nutrientes durante la cosecha y el establecimiento forestal, en un rodal de *Pinus taeda* en Misiones, Argentina. Revista Forestal Venezolana 53(2):165-173.
- Mazzuchelli, T.A., y P.T. Moroni. 2013. Tratamientos de residuos forestales. UADE.
- Nambiar, E.K.S. 1983. Root development and configuration in intensively managed *radiata pine* plantations. Plant Soil 71:37-47.
- Neves, J.C.L. 2000. Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo. Universidade Estadual do Norte Fluminense.
- Novais, R.F., V.H. Alvarez V., N.F. Barros, R.L.F. Fontes, R.B. Cantarutti, y J.C.L. Neves. 2007. Fertilidade do Solo. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Novais, R.F., N.F. Barros, y J.C.L. Neves. 1986. Interpretação de análise química do solo para o crescimento e desenvolvimento de *Eucalyptus* spp. - níveis críticos de implantação e de manutenção. Rev Árvore. 10(1):105-111.
- Quintero, C.E., G.N. Boschetti, y R.A. Benavidez. 1999. Phosphorus Retention in Some Soils of the Argentinean Mesopotamia. Commun Soil Sci Plant Anal 30(9-10):1449-1461.
- Reis, M.G.F., N.F. Barros, y J.P. Kimmins. 1987. Acúmulo de nutrientes em uma sequência de idade de *Eucalyptus grandis* W. Hill (ex Maiden) plantado no cerrado, em duas áreas com diferentes produtividades, em Minas Gerais. Rev Árvore 11(1):1-15.
- Santana, R.C., N.F. Barros, R.F. Novais, H.G. Leite, y N.B. Comerford. 2008. Alocação de nutrientes em plantios de eucalipto no Brasil. Rev Bras Ciência do Solo 32:2723-2733.
- Santana, R.C., I.C.I. Fontan, y S.L. Oliveira. 2014. Implantação, manutenção e produtividade dos povoamentos. En: Vale, A.B., C.C. Machado, J.M.M. Pires, M.B. Vilar, C.B. Costa y A.N. Nacif (ed.). Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência. Viçosa. SIF. Cap. 8:161-186.
- Silveira, R.L.V.A., y E. Malavolta. 2000. Nutrição e adubação potássica em eucalyptus. Informações Agrônomicas 91:1-12.
- Stahringer, N.I. 2017. Parametrização de modelos de produtividade e de balanço nutricional para *Pinus* e *Eucalyptus* em Corrientes, Argentina. Universidade Federal de Viçosa.
- Stahringer, N.I., J.C.L. Neves, B.F. Martins, B.G. Andrade, J.P. Caliman, y C.A.A.S. Ribeiro. 2014. Índice de Qualidade de Sítio (IQS) como forma de prever o requerimento nutricional para eucalipto. FertBio 2014. Araxá, MG.
- Stanford, G., y S.J. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. Soil Sci Soc Amer Proc. 36(3):465-472.
- Witschoreck, R. 2008. Biomassa e nutrientes no corte raso de um povoamento de *Pinus taeda* L. de 17 anos de idade no município de Cambará do Sul - RS. Universidade Federal de Santa Maria. 🌸