



Níveis críticos e faixas de suficiência de fósforo em plantações de *Pinus taeda* no sul do Brasil

Matheus Severo de Souza Kulmann¹

Álvaro Luís Pasquetti Berghetti²

James Stahl³

Gabriel Agostini Orso²

Mauro Valdir Schumacher¹

¹Universidade Federal de Santa Maria (matheuskulmann@hotmail.com), (mauro.schumacher@ufsm.br),

²Universidade Federal do Paraná (alvaro.berghetti@ufpr.br) (gabrielorso16@gmail.com), ³Klabin (jstahl@klabin.com.br)

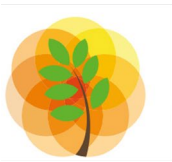
RESUMO: As plantações de *Pinus taeda* na América do Sul tem sido cultivada em solos de baixa fertilidade natural, especialmente fósforo (P), aumentando a necessidade da fertilização fosfatada. A proposição de níveis críticos (NC) e faixas de suficiência (FS) de P nas acículas e solo em plantações de *Pinus taeda* podem auxiliar na real importância da utilização de fertilizantes fosfatados. O estudo teve como objetivo propor níveis críticos e faixas de suficiência de fósforo em plantações de *Pinus taeda* no Sul do Brasil. Este estudo foi conduzido em 12 plantações de *Pinus taeda*, cultivados no Sul do Brasil. Os parâmetros incremento médio anual (IMA), concentração de P nas acículas e P disponível no solo foram avaliados. NC e FS de P nas acículas e solo foram calculados. A NC do P nas acículas em relação a MAI foi de 1,6 g P kg⁻¹ e NC de P no solo de 1,3 mg P dm⁻³. O uso de NC permitirá que silvicultores possam reverter qualquer deficiência de P, garantindo o equilíbrio nutricional das plantas, com recomendações de fertilizantes fosfatados ajustadas, reduzindo custos de produção e potencial de contaminação das águas superficiais adjacentes às plantações de *Pinus taeda*.

Palavras-chave: machine learning, fertilização fosfatada, métodos de diagnóstico nutricional, nutrição florestal, pinheiro

Introdução

As plantações de *Pinus taeda* L. são representativas na América do Sul, devido a região subtropical apresentar condições ótimas de crescimento para a espécie, seleção genética e condições climáticas favoráveis (Dobner & Campoe, 2019). No Brasil, as plantações de *Pinus* são importantes componentes na atividade econômica, ocupando 1,93 milhões de hectares, apresentando a maior produtividade do gênero no mundo, com incremento médio anual (IMA) de 30 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (IBÁ, 2022), podendo chegar a >50 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ (Mainardi et al., 1996).

Os solos das plantações de *Pinus taeda* desta região geralmente apresentam baixa fertilidade natural e, assim, baixa disponibilidade de fósforo (P) nativo do solo. Dessa forma, a fertilização fosfatada é essencial para garantir altas produtividades de *Pinus*. No entanto, esta prática ainda não é adotada no Brasil. Atualmente as recomendações de fertilização fosfatada no sul do Brasil são baseadas em análises químicas de folhas e solo (CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2019). Porém, os valores de referência foram baseados para o gênero *Pinus*, sem especificidade de cada espécie,



generalizando as repostas de *Pinus taeda* quanto à fertilização. Assim, identificar os níveis críticos (NC) e faixas de suficiências (FS) de nutrientes podem ser estratégias para garantir o equilíbrio nutricional das plantas, possibilitando uma recomendação da quantidade de fertilizantes fosfatados adequados, reduzindo custos de produção e potencial de contaminação de águas.

No entanto, são escassos estudos que determinem os valores de referência de NC e FS, em relação a produtividade de *Pinus taeda*. A definição de NC e FS pode ser uma estratégia para aumentar a eficiência do uso de P e produtividades de plantações de *Pinus taeda*. O estudo tem como objetivo propor níveis críticos e faixas de suficiência de fósforo em plantações de *Pinus taeda* no sul do Brasil.

Material e métodos

Área experimental e banco de dados

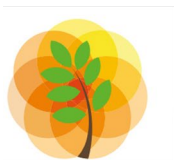
Selecionamos 12 sítios experimentais de plantações de *Pinus taeda*, localizados sul do Brasil, pertencentes ao projeto PPPIB – Programa Cooperativo sobre Pesquisa do Pinus no Brasil, coordenado pelo Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF). Os climas dos sítios experimentais são do tipo Cfa – subtropical, com verão quente; e Cfb – subtropical húmido com verão ameno.

As plantações de *Pinus taeda* foram implantadas em parcelas com 12 plantas por 8 linhas, com bordadura dupla. As parcelas foram fertilizadas e não fertilizadas. A fertilização foi realizada nas plantações aos oito anos de idade, contendo (kg ha^{-1}): 135 de N (ureia); 35 de P (superfosfato simples); 125 de K (cloreto de potássio); 414 de Ca; 190 de Mg; e 11,4 de S (calcário dolomítico); e 3,6 de B; 1,6 de C; 4,0 de Mn; 0,2 de Mo; 6,0 de Fe; e 18,0 de Zn (Micro FTEBr12). Ao longo do estudo realizados o controle entomológico de formigas cortadeiras e da vegetação concorrente.

Avaliação do crescimento das árvores e análise de P nas acículas e solo

O diâmetro à altura do peito (DAP) e altura total das árvores foi medido anualmente, usando fita métrica e hipsômetro, respectivamente. A partir disso, estimamos o incremento médio anual (IMA), calculado para cada idade.

Acículas recém-maduras foram coletadas do segundo verticilo, no terço superior da copa e amostras de solo foram coletadas nas parcelas na camada de 0,0– 0,2 m de superfície. As acículas e solo foram secos, moídos, peneiradas. O tecido das acículas foi submetido à digestão sulfúrica e o P no solo foi extraído por Mehlich⁻¹ (Tedesco et al., 1995). O P nas acículas e P disponível no solo



foram determinados por colorimetria, no comprimento de onda de 882 e 660 nm, respectivamente, em espectrofotômetro UV–visível.

Análise estatística e NC e FS de P nas acículas e solo

Para a proposição de NC e FS, o MAI foi convertido em produtividade relativa (%) considerando ano. Foram realizadas simulações de Monte Carlo Markov Chains (MCMC) (Gelman e Hill, 2007). A modelagem, utilizando modelos Bayesianos, foi realizada com auxílio do pacote “rjags” (Plummer, 2017), no ambiente R. Foi assumido que NC era o ponto em que a linha ajustada atingia o platô, não apresentando qualquer aumento na produtividade à medida em que a concentração de P aumenta. Finalmente, uma análise da densidade de frequência, assumindo um intervalo de confiança de 90%, foi realizada para determinar os FS.

Resultados e discussão

A NC de P nas acículas em relação à MAI relativo foi de 1,6 g P kg⁻¹ para todas as plantações de *Pinus taeda* (Figura 1a). A FS obtida em relação à MAI relativo foi de 1,1 a 2,1 g P kg⁻¹ (Figura 1b). Encontramos NC de P nas acículas em relação à MAI relativo foi de 1,6 g P kg⁻¹ para todas as plantações de *Pinus taeda* (Fig. 1a). Nossos resultados de NC de P nas acículas foram superiores do que os valores encontrados em plantações de *Pinus taeda* no Sul dos EUA 1,0–1,2 g kg⁻¹ (MacCarthy & Davey, 1976; Sybert, 2006). Com isso, possivelmente parte do P absorvido e diagnosticado pela análise nutricional das acículas foi proveniente da fertilização fosfatada, e contribuiu para o aumento do MAI de *Pinus taeda* (Sybert, 2006). Somado a isso, encontramos valores de FS de P nas acículas obtida em relação à MAI foi de 1,1 a 2,1 g P kg⁻¹, similares à superiores ao FS proposto por (CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2019), variando de 0,8 a 1,4 g P kg⁻¹. Nossos resultados de FS de P nas acículas foram ligeiramente superiores aos valores encontrados nos EUA (Gregoire & Fisher, 2004), que variaram de 0,09–0,18 g P kg⁻¹. Com isso, podemos visualizar que existem na literatura proposições de diferentes valores de referência de P em acículas para *Pinus*, que podem estar associados a diversos fatores, como clima, tipo de solo e espécies (Sybert, 2006). Dessa forma, utilizar valores regionalizados, como os obtidos em nosso estudo, pode contribuir para maior precisão de interpretações e recomendações.

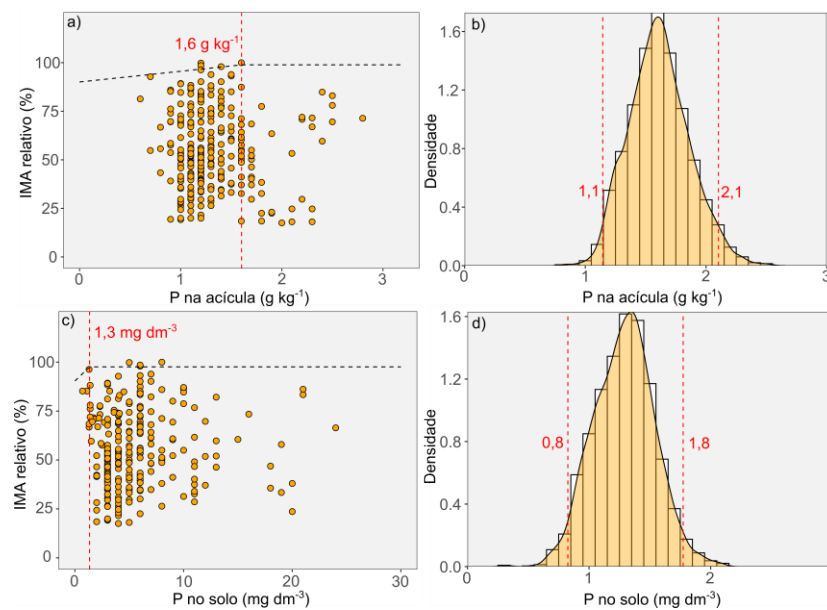
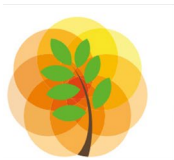


Figura 1. Níveis críticos (NC) e faixas de suficiência (FS) entre o MAI relativo e P na acícula (a, b) e solo (c, d) de plantações de *Pinus taeda* no sul do Brasil. As linhas tracejadas vermelhas representam NC de P em acículas e solo, com base na regressão linear do planalto no percentil 95 (linha tracejada preta).

A NC de P no solo em relação à MAI relativo foi de $1,3 \text{ mg P dm}^{-3}$ para todas as plantações de *Pinus taeda* (Figura 1c). A FS obtida em relação à MAI relativo foi de $0,8$ a $1,8 \text{ mg P dm}^{-3}$ (Figura 1d). A NC de P no solo em relação à MAI relativo para todas as plantações de *Pinus taeda* foi de $1,3 \text{ mg P dm}^{-3}$ (Fig. 5a). A proposição de NC para P no solo é uma importante ferramenta de diagnóstico para o manejo de fertilização fosfatada em plantações de *Pinus* spp. Apesar da importância dessa informação, a literatura até o momento apenas sugere NC para P nas acículas (CQFS- RS/SC, 2016; Pauletti e Motta, 2019; Gregoire & Fisher, 2004), sendo este um dos primeiros estudos propondo NC de P no solo para plantações de *Pinus taeda*. Vale destacar que o NC de P no solo encontrado no presente estudo é ligeiramente inferior aos valores de NC de P no solo encontrados em plantações de *Pinus taeda* na Carolina do Norte de 16 mg P dm^{-3} (MacCarthy & Davey, 1976). Isso nos mostra que as recomendações oficiais para o Sul do Brasil podem estar demasiadamente generalizadas, uma vez que os manuais disponibilizam recomendações para o gênero *Pinus*, sem especificidade de espécie (CQFS-RS/SC, 2016; Pauletti & Motta, 2019). Assim, a recomendação de fertilização fosfatada pela interpretação do teor de P no solo pode estar abaixo do suficiente, reduzindo a produtividade das plantações de *Pinus taeda*, ou acima do exigido, superior as demandas nutricionais das plantas e/ou a saturação dos sítios de adsorção do solo, sendo potencial de contaminação de águas.



Conclusões

O NC do P em relação a MAI foi de 1,6 g P kg⁻¹ nas acículas e 1,3 mg P dm⁻³ no solo. O uso da análise de limites com abordagem bayesiana nos permitiu propor valores para NC de P nas acículas e solo em plantações de *Pinus taeda* no sul do Brasil, permitindo que silvicultores possam reverter qualquer deficiência de P, na mesma rotação e/ou posterior plantações.

Referências bibliográficas

- CQFS-RS/SC, 2016. Manual de calagem e adubação dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. SBCS: Porto Alegre, ed.11, 2016. 376p.
- DOBNER, M.; CAMPOE, O.C. Meteorological effects on 30-years-grown *Pinus taeda* under a gradient of crown thinning intensities in southern Brazil. *Forest Ecology and Management*, v.453, p.117624, 2019.
- GELMAN, A.; HILL, J. *Data Analysis Using Regression and Multilevel/Hierarchical Models*. Cambridge: New York. ed.1, 2007. 529p.
- GREGOIRE, N., FISHER, R.F., 2004. Nutritional diagnoses in loblolly pine (*Pinus taeda* L.) established stands using three different approaches. *For Ecol Manage* 203, 195–208. <https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2004.07.049>
- IBÁ – Indústria brasileira de árvores. Relatório anual 2022. 2022, 87p.
- MACCARTHY, R.; DAVEY, C.B. Nutritional problems of *Pinus taeda* L. (loblolly pine) growing on pocsin soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.40, p.582–585, 1976. <https://doi.org/10.2136/SSSAJ1976.03615995004000040034X>
- MAINARDI, L.G.; SCHNEIDER, P.R.; FINGER, C.A.G. Yield of *Pinus taeda* L. for the region of Cambará do Sul, RS. *Ciência Florestal*, v.39, p.1-12, 1996.
- PAULETTI, V.; MOTTA, A.C.V. *Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná*. ed.2, 2019. 289p.
- PLUMMER, M., 2017. JAGS Version 4.3.0 user manual.
- SYPERT, R.H. Diagnosis of loblolly pine (*Pinus taeda* L.) nutrient deficiencies by foliar methods. V. 1, p. 1-123, 2006.
- TEDESCO, M.J., VOLKWEISS, S.J., BOHMEN, H., 1995. *Soil, plant and other material analysis*, 1st ed.

