Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

# Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades

**Adam da Cruz Rodrigues**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2022

Adam da Cruz Rodrigues
Engenheiro Florestal

# Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LEONARDO DE MORAES GONÇALVES**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Programa: Recursos Florestais. Opção: Silvicultura e Manejo Florestal

Piracicaba
2022

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Rodrigues, Adam da Cruz

Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades / Adam da Cruz Rodrigues. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2022.

43 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Eucalipto 2. Cultivo mínimo 3. Fertilização de P 4. Nutrição florestal I. Título

# DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rosinete e Edilson, por todos os ensinamentos, a dedicação, os sacrifícios para que eu pudesse estudar e chegar aonde estou hoje e por todo apoio às minhas escolhas.

Aos meus irmãos Karol, Karine e Andrey por estarem sempre ao meu lado.

Aos meus professores pelos ensinamentos e por me guiarem até aqui.

**A vocês, dedico este trabalho.**

# AGRADECIMENTOS

A Deus, por me dar sabedoria, saúde, paz e por colocar, em meu caminho, pessoas maravilhosas, que me apoiaram e que tornaram possível a conclusão deste trabalho;

Ao Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade, pela confiança, pela paciência e pelos ensinamentos na condução deste trabalho;

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP), ao Programa de Pós-graduação em Recursos Florestais e a todos os funcionários, em especial à Gi, que colaboraram para minha formação profissional;

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) do IPEF, por todo o apoio logístico e financeiro e ao Alexandre de Vicente Ferraz, por todo apoio e pelos ensinamentos;

À CAPES pela bolsa de mestrado concedida;

Aos meus amigos e colegas Amanda, Alvaro, Antônio, Ivanka, José Henrique, Liamara e Sílvio por todo o apoio, as discussões, as reflexões e os ensinamentos ao longo desses anos;

Aos estagiários do PTSM, em especial ao Flávio, ao Gustavo, à Isabella, ao Rafael e à Victória, por todo o apoio na realização das atividades;

À equipe da Estação Experimental de Itatinga, em especial ao Rildo Moreira, ao Lourival e à Elaine, por todo o apoio na realização das atividades;

Ao Prof. Dr. Paulo Sérgio Pavinato e à Ana Teles pela amizade e pelo suporte nas análises laboratoriais, nas discussões, nas reflexões e nas contribuições ao meu trabalho;

À equipe do Laboratório de Química do Solo-ESALQ, em nome do Luis Silva (*in memoriam*), por todo o apoio nas análises químicas de solo;

À equipe do LEA, Alba, Daiele, Juliana e Gisele, pelo apoio na realização das análises laboratoriais;

À Virginia, pelo apoio nos momentos dificeis, pelo carinho, pelo amor e pela compreensão;

Aos meus grandes amigos, Enrico, Eduardo e Lúcio, pelo apoio, pela recepção e pelos bons momentos compartilhados;

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que fosse possível a realização deste trabalho.

**Muito Obrigado!**

# EPÍGRAFE

*“Take these broken wings and learn to fly...”.*

Blackbird, The Beatles.

# SUMÁRIO

RESUMO ..... 8
ABSTRACT ..... 9

**1. INTRODUÇÃO GERAL ..... 11**

REFERÊNCIAS ..... 15

**2. ALTERAÇÕES NAS FRAÇÕES DE P NO SOLO, NA NUTRIÇÃO E NO CRESCIMENTO DE POVOAMENTOS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* CAUSADAS PELA APLICAÇÃO DE FOSFATOS SOLÚVEIS E POUCO SOLÚVEIS ..... 17**

RESUMO ..... 17
ABSTRACT ..... 18
2.1 INTRODUÇÃO ..... 19
2.2 CONCLUSÃO ..... 21
REFERÊNCIAS ..... 22

# RESUMO

## Resposta do *Eucalyptus* à aplicação de fontes fosfatadas com diferentes solubilidades

A fertilização fosfatada cumpre papel imprescindível na manutenção das altas produtividades das florestas de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente localizadas em áreas de solos de baixa fertilidade e de alta capacidade de fixação de P. Frente ao crescimento constante das áreas de florestas de *Eucalyptus* nos últimos anos e à demanda mundial pela produção cada vez mais sustentável e com menor emprego de insumos (e.g., fertilizantes), faz-se necessário o estudo de práticas de manejo sustentáveis que maximizem a eficiência de uso de fertilizantes fosfatados. Esse uso, em conjunto com fatores edafoclimáticos, afeta, de diferentes formas, a composição das frações de fósforo no solo, a eficiência de uso dos nutrientes pelas plantas e a produtividade florestal. Esse efeito se modifica ao longo da rotação de cultivo e necessita de avaliação cuidadosa. O manejo da fertilização fosfatada deve envolver o adequado suprimento do nutriente às plantas. Sendo o P um recurso proveniente de reservas finitas, é necessário aprofundar a compreensão, na fertilização fosfatada para o *Eucalyptus*, para utilizar, de forma mais eficaz, os fertilizantes sobre o solo e a consequente produtividade dos plantios. O objetivo geral, neste trabalho, foi analisar a influência do emprego de diferentes manejos da fertilização fosfatada com fontes solúveis e poucos solúveis no solo, sobre a nutrição e o crescimento de povoamentos de *Eucalyptus*. Estruturalmente, a dissertação foi dividida em dois capítulos. No primeiro, objetivou-se uma revisão focada na problemática do trabalho. No segundo, apresentaram-se as avaliações da aplicação de P com fontes de diferentes solubilidades nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo.

Palavras-chave: Eucalipto, Cultivo mínimo, Fertilização de P, Nutrição florestal

# ABSTRACT

## Response of *Eucalyptus* to application of phosphate sources with different solubilities

Phosphate fertilization plays an essential role in maintaining the high productivity of Eucalyptus forests in Brazil, mostly located in areas of low fertility soils with high capacity of P fixation. Given the constant growth of *Eucalyptus* forests in recent years and the worldwide demand for increasingly sustainable production with less use of inputs (e.g. fertilizers), it is critical to study sustainable management practices that maximize the efficiency of phosphate fertilizer use. This use, together with soil and climatic factors, affects, in different ways, the composition of phosphorus fractions in the soil, the efficiency of nutrient use by plants and forest productivity. This effect modifies along the crop rotation and needs thorough evaluation. The management of phosphate fertilization should involve an adequate supply of the nutrient to the plants. Since P is a resource that comes from finite reserves, it is essential to deepen the understanding of phosphate fertilization for *Eucalyptus*, in order to use, in a more efficient way, the fertilizers on the soil and the consequent productivity of the plantations. The general objective of this study was to assess the influence of the use of different managements of phosphate fertilization with soluble and low soluble sources in the soil, on the nutrition and growth of *Eucalyptus* stands. The dissertation was structurally divided into two chapters. In the first, it was aimed at a review focused on the issues of the present study. The second chapter presents the results of P application with sources of different solubility on the fractions and stocks of P in the soil, nutrition and growth of *Eucalyptus grandis* stands throughout a rotation of growth.

Keywords: Eucalyptus, Minimum tillage, Forest nutrition, P fertilization

# 1. INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, as plantações de eucalipto somaram, em 2019, área total de, aproximadamente, 7 milhões de hectares de florestas certificadas (IBÁ, 2020). Tal crescimento ocorreu anualmente, devido aos investimentos empresariais em melhorias tecnológicas e à expansão do portifólio de produtos para diversos setores. Em virtude desse aumento, crescem as demandas nacional e internacional por uma produção cada vez mais sustentável e eficiente de alimentos, de fibras e de energia, com menor emprego de insumos, tais como os fertilizantes (Cordell et al., 2009).

No contexto dos insumos, as rochas fosfáticas constituem as únicas fontes globais mais significativas para produzir fertilizantes e produtos químicos fosfatados (Jasinsk et al., 1999). Se mantida a atual taxa de consumo de fertilizantes fosfatados, espera-se que as reservas mundiais de minérios de alta qualidade se esgotem até o fim do século 21. Tal fato levaria ao consumo de fontes de menor qualidade e de maiores custos, impactando a sustentabilidade na utilização desse insumo (Hinsinger et al., 2011; Withers et al., 2018).

O consumo mundial de $P_2O_5$, contido em ácido fosfórico, em fertilizantes e em outros produtos, deverá aumentar para além de 50 milhões de toneladas (Mt) em 2022, em relação aos 47,0 Mt consumidos em 2018. África, Índia e América do Sul seriam responsáveis por cerca de 75% do crescimento projetado (Jasinsk, 2019).

Os depósitos desse minério se encontram amplamente distribuídos pelo mundo, sendo o Marrocos o maior detentor de reservas (71% das reservas mundiais). China, Marrocos e Estados Unidos representam, juntos, mais de 70% da produção global (Jasinsk, 2021, 2019). No Brasil, em 2020, a produção nacional de diferentes fontes fosfatadas foi de 6,1 Mt, equivalente a 46% dos fertilizantes fosfatados consumidos no país. A importação continua o principal meio de atender à demanda nacional, uma vez que, naquele mesmo ano, foram importadas mais de 7,1 Mt de diferentes fontes fosfatadas (Jasinsk, 2021; SGM, 2021).

A baixa disponibilidade natural de fósforo (P) nos solos tropicais, em razão de seu alto grau de intemperização, torna o manejo adequado da fertilização fosfatada um dos fatores imprescindíveis para manter a alta produtividade dos povoamentos florestais brasileiros. Esses solos são, em sua maioria, Latossolos e Argissolos bem desenvolvidos,

ácidos, distróficos e de mineralogia predominantemente caulinítica e oxídica, portanto, com elevada capacidade de fixação de P (Gonçalves et al., 2008; Laclau et al., 2000).

O P no solo ocorre na forma de compostos inorgânicos e orgânicos, que variam de íons em solução (formas lábeis) a compostos estáveis na fase sólida (formas não lábeis). Os compostos inorgânicos de P (Pi) possuem grande afinidade com as formas amorfas e cristalinas de Al, Fe, e Ca, com as quais podem formar compostos pouco estáveis, muito estáveis e até mesmo precipitados. Esse processo, denominado fixação ou adsorção de P no solo, é uma das razões para a queda do aproveitamento do P fornecido às plantas via fertilizantes fosfatados. Os compostos orgânicos com P (Po) encontram-se associados a moléculas orgânicas de variada taxa de decomposição, como ácidos nucleicos, fosfolipídios, fosfatos de açúcar, fosfatos de inositol (Foltran et al., 2019; Negassa e Leinweber, 2009).

Os plantios de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente, se estabelecem em sistema de cultivo mínimo do solo, com manutenção de resíduos de colheita e preparo do solo apenas nas linhas de plantio. Por isso, os teores de matéria orgânica nas camadas superficiais geralmente são altos, o que contribui para formar complexos organominerais entre coloides de argila e substâncias húmicas, e de quelatos entre essas substâncias e os cátions polivalentes (e.g., $Fe^{3+}$, $Al^{3+}$ e $Ca^{2+}$). Nessas circunstâncias, conjuntamente com a aplicação localizada dos fertilizantes fosfatados, o potencial de fixação de P é baixo, com presença de formas orgânicas lábeis desse nutriente, gradativamente mineralizadas e disponibilizadas às plantas (Bazani et al., 2014; Folli-Pereira et al., 2012; Foltran et al., 2019).

As concentrações de P total no solo — somando-se frações disponíveis e menos disponíveis, orgânicas e inorgânicas — variam na margem de $10^1$ a $10^3$ mg $kg^{-1}$ a depender do horizonte, da textura, do grau de intemperismo, do tipo e da intensidade de uso do solo (Kruse et al., 2015). Um dos fatores que condiciona o potencial de resposta do *Eucalyptus* à fertilização fosfatada é a disponibilidade de P no solo. Teores de P, extraído por resina, entre 0 e 2 mg $dm^{-3}$, 3 e 4 mg $dm^{-3}$ , 5 e 7 mg $dm^{-3}$ e ≥ 8 mg $dm^{-3}$ são considerados muito baixos, baixos, médios e altos, respectivamente. O potencial de resposta à fertilização diminui conforme a faixa de disponibilidade de P aumenta (Bazani et al., 2014; Gonçalves, 2011; Gonçalves et al., 2008).

A demanda de nutrientes em plantações de *Eucalyptus* pode ser basicamente dividida em dois momentos principais: antes e depois do fechamento das copas. Na fase anterior ao fechamento, há maior demanda nutricional, as plantas dependem do solo como

fonte de nutrientes para desenvolver as raízes e expandir a área foliar. Na fase posterior, há o franco crescimento da parte aérea e o estabelecimento da ciclagem de nutrientes. As respostas à fertilização tendem a diminuir nessa fase, que se estende até o fim do ciclo, pois as disponibilidades de água e de luz passam a ser mais limitantes ao crescimento das árvores do que a disponibilidade de nutrientes (Gonçalves, 2011; Laclau et al., 2010). A maior taxa de absorção de P pelo *Eucalyptus* ocorre até o segundo ano de idade da floresta, fase do fechamento da copa das árvores (Bazani et al., 2014).

As práticas de fertilização em plantações florestais caracterizam-se por recomendações baseadas no conteúdo de nutrientes disponíveis no solo e no potencial produtivo das espécies (Gonçalves et al., 2008). Em contraponto a cultivos agrícolas, onde os fertilizantes fosfatados são aplicados em quantidades até três vezes maiores que a de P removida na colheita (exportação) (Rodrigues et al., 2016), no cultivo de eucalipto, aplicam--se quantidades iguais ou inferiores ao exportado. Fatores, como ciclo de cultivo mais longo, resposta da cultura à fertilização fosfatada, alta eficiência na utilização de P (ciclagens bioquímica e biogeoquímica) e alta capacidade de associação com fungos micorrízicos, colaboram para as baixas quantidades aplicadas (Campos et al., 2011; Gonçalves, 2011; Pernambuco, 2013; Rocha et al., 2019b).

A exportação de P nos plantios de *Eucalyptus* varia de 30 a 60 kg $ha^{-1}$ de P em rotações de, aproximadamente, sete anos, considerando um IMA de 30 a 50 $m^3$ $ha^{-1}$ ano $^{-1}$, e a aplicação de fertilizantes fosfatados dificilmente supera 44 kg $ha^{-1}$ por rotação (Rocha et al., 2019b). Respostas de crescimento à fertilização fosfatada são esperadas em doses máximas de até 70 kg $ha^{-1}$ de $P_2O_5$, em solos com teor de argila superior a 35 % e valores muito baixos de P extraído por resina (0 e 2 mg $dm^{-3}$) (Bazani et al., 2014; Gonçalves, 2011; Gonçalves et al., 2008).

Ainda que os fertilizantes sejam aplicados em baixas quantidades, os custos da fertilização podem ultrapassar patamares convencionais (25% do custo total de implantação), devido à grande variação da taxa cambial do dólar (Bazani et al., 2014). Nesse contexto, um dos grandes desafios do setor florestal tem sido identificar o equilíbrio entre estratégias e métodos silviculturais que permitam alta produtividade de madeira no longo prazo, com o mínimo de impactos negativos ao meio ambiente (Gonçalves, 2011).

Diferentes formas de manejo da fertilização fosfatada são usuais no país, desde a utilização de misturas granuladas com diferentes formulações (e.g., NPK 04-28-06, 06-30-06,

06-26-06) à aplicação de fertilizantes solúveis (e. g., MAP, DAP, superfosfatos), de rápida disponibilização de P às plantas e pouco solúveis (e.g., Fosfato natural reativo), de disponibilização gradual — utilizados como fonte única ou aplicados conjuntamente (Bazani et al., 2014). A fertilização com fontes de diferentes solubilidades promove diferentes respostas ao crescimento inicial do *Eucalyptus* e, como consequência, alteram as características químicas do solo de diferentes formas (Foltran et al., 2019). Além das características dos fertilizantes, as respostas à fertilização de P são também produtos das condições do clima, da disponibilidade de água no solo, da eficiência na obtenção e no uso do nutriente pela cultura e da interação com microrganismos (Gonçalves et al., 2013).

O manejo da fertilização fosfatada deve envolver, de modo eficiente, o adequado suprimento do nutriente às plantas. Sendo o P um recurso proveniente de reservas finitas, é preciso levar em conta os custos inerentes à aquisição dos fertilizantes. É necessário aprofundar a compreensão da fertilização fosfatada para o *Eucalyptus*, explorando, ainda mais, os efeitos dos fertilizantes sobre o solo e sobre a produtividade dos plantios. Dessa forma, será possível abranger as suas implicações no custo de formação da floresta, tornando a produção nacional cada vez mais competitiva no mercado internacional (Bazani et al., 2014; Herring e Fantel, 1993; Van Vuuren et al., 2010).

Nesse contexto, para melhor entender o efeito da utilização de diferentes práticas de fertilização com fontes fosfatadas solúveis e reativas mais convencionais, avaliaram-se povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo. Essas informações se encontram no capítulo intitulado "**Alterações nas frações de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* causadas pela aplicação de fosfatos solúveis e pouco solúveis**".

## Referências


Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Melo, E.A.S.C., Prieto, M., 2014. Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. Informações Agronômicas 148, 28.

Campos, D.T. da S., Silva, M. de C.S. da, Luz, J.M.R. da, Telesfora, R.J., Kasuya, M.C.M., 2011. Colonização micorrízica em plantios de eucalipto. Rev. Árvore 35, 965–974. https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000600002

Cordell, D., Drangert, J.-O., White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. Glob. Environ. Chang. 19, 292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

Folli-Pereira, M. da S., Meira-Haddad, L.S., Bazzolli, D.M.S., Kasuya, M.C.M., 2012. Micorriza arbuscular e a tolerância das plantas ao estresse. Rev. Bras. Ciência do Solo 36, 1663–1679. https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000600001

Foltran, E.C., Rocha, J.H.T., Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rodrigues, M., Pavinato, P., Valduga, G.R., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., 2019. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. For. Ecol. Manage. 435, 170–179. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053

Gonçalves, J.L. de M., 2011. Fertilização de plantação de Eucalipto, in: Gonçalves, J.L. de M., Pulito, A.P., Arthur Junior, J.C., Silva, L.D. (Orgs.), Anais II Encontro brasileiro de silvicultura. PTSM/IPEF/FUPEF, Campinas, p. 342.

Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. For. Ecol. Manage. 301, 6–27. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030

Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. South. For. 70, 105–118. https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534

Herring, J.R., Fantel, R.J., 1993. Phosphate rock demand into the next century: Impact on wolld food supply. Nonrenewable Resour. 2, 226–246. https://doi.org/10.1007/BF02257917

Hinsinger, P., Brauman, A., Devau, N., Gérard, F., Jourdan, C., Laclau, J.-P., Le Cadre, E., Jaillard, B., Plassard, C., 2011. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? Plant Soil 348, 29–61. https://doi.org/10.1007/s11104-011-0903-y

Jasinsk, S.M., 2022. Phosphate rock, Mineral Commodity Summaries 2022. https://doi.org/10.3133/mcs2022

Jasinsk, S.M., 2019. Phosphate rock, Mineral Commodity Summaries 2019. Reston, VA.

Jasinsk, S.M., Kramer, D.A., Ober, J.A., Searls, J.P., 1999. Fertilizers: Sustaining Global Food Supplies, USGS Fact Sheet 155-99.

Kruse, J., Abraham, M., Amelung, W., Baum, C., Bol, R., Kühn, O., Lewandowski, H., Niederberger, J., Oelmann, Y., Rüger, C., Santner, J., Siebers, M., Siebers, N., Spohn, M., Vestergren, J., Vogts, A., Leinweber, P., 2015. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 178, 43–88. https://doi.org/10.1002/jpln.201400327

Laclau, J.P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A.T., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Deleporte, P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by

intensive monitoring in Congo and Brazil. For. Ecol. Manage. 259, 1771–1785. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010

Laclau, J.P., Ranger, J., Nzila, J. de D., Bouillet, J.P., 2000. Nutrient cycling in a short rotation Eucalyptus plantation and an adjacent savanna in Congo. Site Manag. Product. Trop. Plant. For. a Prog. report. Work. Proceedings, Kerala, India, 7-11 December 1999.

Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172, 305–325. https://doi.org/10.1002/jpln.200800223

Pernambuco, U.F. De, 2013. Aspectos Da Simbiose Micorrízica Arbuscular. An. da Acad. Pernambucana Ciência Agronômica 5, 180–208.

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. For. Ecol. Manage. 437, 295–303. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051

Rodrigues, M., Pavinato, P.S., Withers, P.J.A., Teles, A.P.B., Herrera, W.F.B., 2016. Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. Sci. Total Environ. 542, 1050–1061. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118

SGM, S. de G.M. e T. mineral, 2021. Anuário Estatístico: Setor de Transformação de Não Metálicos. Ministério de Minas e Energia.

Van Vuuren, D.P., Bouwman, A.F., Beusen, A.H.W., 2010. Phosphorus demand for the 1970–2100 period: A scenario analysis of resource depletion. Glob. Environ. Chang. 20, 428–439. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.04.004

Withers, P.J.A., Rodrigues, M., Soltangheisi, A., de Carvalho, T.S., Guilherme, L.R.G., Benites, V. de M., Gatiboni, L.C., de Sousa, D.M.G., Nunes, R. de S., Rosolem, C.A., Andreote, F.D., Oliveira, A. de, Coutinho, E.L.M., Pavinato, P.S., 2018. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. Sci. Rep. 8, 2537. https://doi.org/10.1038/s41598-018-20887-z

# 2. ALTERAÇÕES NAS FRAÇÕES DE P NO SOLO, NA NUTRIÇÃO E NO CRESCIMENTO DE POVOAMENTOS DE *EUCALYPTUS GRANDIS* CAUSADAS PELA APLICAÇÃO DE FOSFATOS SOLÚVEIS E POUCO SOLÚVEIS


## RESUMO

A fertilização fosfatada desempenha papel imprescindível na manutenção das altas produtividades de madeira nas plantações de *Eucalyptus* no Brasil, geralmente localizadas em áreas com solos de baixa fertilidade e de alta capacidade de fixação de P. Os fertilizantes fosfatados, em conjunto com fatores edafoclimáticos, afetam, de diferentes formas, as frações de P no solo, a eficiência de uso dos nutrientes e a produtividade florestal. Esse efeito se modifica ao longo da rotação de cultivo. Os objetivos deste estudo foram avaliar os efeitos da aplicação de P com fontes solúveis e pouco solúveis nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo. O experimento foi instalado na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, SP, em uma área com clima subtropical úmido (Cfa): média 1300 mm de precipitação pluvial anual, temperatura média anual de 20,4°C. O relevo da área é plano e o solo foi classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de textura média-arenosa (200 g $kg^{-1}$ de argila). O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Como fontes solúveis de P, testaram-se o superfosfato simples e o fosfato monoamônico, além de um fosfato natural reativo, aplicado isoladamente ou em mistura com essas fontes solúveis. Ao longo da rotação de cultivo, fizeram-se várias amostragens para quantificar as frações inorgânicas e orgânicas de P no solo (lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis), a absorção de nutrientes e o crescimento das árvores. A fertilização com fosfato reativo alterou os teores de P em profundidade no solo, mais do que as outras fontes. A fração de P mais alterada foi a moderadamente lábil, associada à solubilização de fosfato de cálcio, que sofreu diminuição de mais de 90% entre 36 e 93 meses pós-plantio. Nesse tratamento, as fontes principais de P absorvidas foram oriundas das frações P-Ca e Po, pois não ocorreu modificação do teor de P não lábil. Nos tratamentos que receberam aplicação de fosfato natural reativo, ocorreu alto acúmulo de P e de Ca no lenho, relacionado à alta solubilização P-Ca e à aplicação localizada deste no sulco de plantio. A fertilização fosfatada, seja com fonte solúvel, seja com pouco solúvel, favoreceu o maior crescimento das árvores, notadamente, nos primeiros anos de cultivo. As plantas fertilizadas com fontes solúveis de P apresentaram maior crescimento em relação às fertilizadas com fontes pouco solúveis. O fato pode ser atribuído ao ótimo arranque inicial de crescimento das árvores, diferença que se manteve ao longo da rotação de cultivo. As árvores absorveram o P fornecido pelos fertilizantes e parte do Po-lábil e moderadamente lábil, efeito detectado por meio da alteração dos teores dessas frações de P no solo. A mineralização de Po no solo teve papel essencial no crescimento das árvores, especialmente no tratamento Controle, que não recebeu aplicação suplementar de P. Constatou-se que a análise de rotina de P (extraído por resina) subestima a disponibilidade de P no solo para a nutrição de árvores de *E. grandis*.


Palavras-chave: Fertilização fosfatada, Fósforo orgânico, Fracionamento de Hedley

## ABSTRACT

Phosphate fertilization plays an essential role in maintaining high wood yields in *Eucalyptus* plantations in Brazil, usually located in areas with low soil fertility and high P fixation capacity. Phosphate fertilizers, together with edaphoclimatic factors, affect, in different ways, the fractions of P in the soil, the efficiency of nutrient use and forest productivity. This effect modifies along the crop rotation. The objectives of this study were to assess the effects of applying P using soluble and low-soluble sources on the fractions and stocks of P in the soil, nutrition, and growth of *Eucalyptus grandis* stands throughout a crop rotation. The experiment was set up at the Experimental Station of Forest Sciences in Itatinga, SP, in an area with a humid subtropical climate (Cfa): average annual rainfall of 1300 mm, average annual temperature of 20.4°C. The topography of the area is flat, and the soil was classified as Oxisols (Red Yellow Latosol in Brazilian classification) of medium-sandy texture (200 g kg-1 of clay). Experimental design was the randomized block layout, with four treatments and four repetitions. The soluble P sources tested were simple superphosphate and monoammonium phosphate, as well as a natural reactive phosphate, applied alone or in mixture with these soluble sources. Throughout the rotation, several samples were taken to quantify the inorganic and organic P fractions in the soil (labile, moderately labile, and non-labile), nutrient uptake and tree growth. Fertilization with reactive phosphate altered the P contents deeper in the soil than the other sources. The most altered fraction of P was moderately labile, associated with calcium phosphate solubilization, which decreased over 90% between 36- and 93-months post-planting. In this treatment, the main sources of absorbed P came from the P-Ca and Po fractions, since there was no change in the content of non-labile P. In treatments that received the application of reactive phosphate, there was a high accumulation of P and Ca in the wood, related to the high solubility of P-Ca and the localized application of this in the planting furrow. Phosphate fertilization, either with a soluble or a low-soluble source, resulted in greater tree growth, especially in the first years of cultivation. Plants fertilized with soluble sources of P showed greater growth than those fertilized with low-soluble sources. This fact could be explained by the excellent early growth of the trees, a difference that was maintained throughout the rotation. The trees absorbed the P supplied by the fertilizers and part of the labile and moderately labile Po; an effect detected due to the changes in the contents of P fractions in the soil. The mineralization of Po in the soil played an essential role in tree growth, especially in the Control treatment, which did not receive supplemental application of P. It was found that routine analysis of P (extracted by resin) underestimates the availability of P in the soil for the nutrition of *E. grandis* trees.

Keywords: Phosphate fertilization, Organic phosphorus, Hedley fractionation

## 2.1 Introdução

A definição da fonte ideal para a fertilização fosfatada em plantios florestais constitui assunto constantemente revisitado. Durante as décadas de 1980 e 1990, conduziram-se diversos estudos, em casas de vegetação e em condições de campo, para verificar a eficiência do uso de rochas fosfatadas brasileiras (fosfato de Araxá, Patos, Catalão) no fornecimento de P em plantações de *Eucalyptus* (Barros et al., 1990; Bazani et al., 2014).

Em trabalho sobre o efeito da solubilidade dos fertilizantes fosfatados na produção de madeira de *Eucalyptus*, em solos de textura argilosa (Latossolo Vermelho distrófico) e arenosa (Neossolo Quartzarênico), Gava (2003) comparou a eficiência do fosfato natural reativo (FNR) de Gafsa, considerado pouco solúvel, à do superfosfato triplo (SPT), considerado solúvel. Observou, portanto, maior eficiência econômica do fósforo com a utilização SPT em comparação à do FNR, para as duas condições de solo.

As quantidades necessárias de FNR foram, aproximadamente, cinco vezes maiores que a de SPT para a obtenção do mesmo crescimento em altura e volume no primeiro ano. Bazani et al. (2014) obtiveram resultados similares ao avaliar povoamentos até os dois anos de idade, onde a utilização de fontes solúveis de P promoveram o maior crescimento das plantas em diferentes aspectos (e.g., índice de área foliar, acúmulo de P, biomassa aérea).

As fontes solúveis de P (e.g., MAP, DAP, Superfosfatos), fornecidas via fertilização, são adsorvidas no solo e se tornam parte da fração moderadamente lábil (Foltran et al., 2019). No entanto essa adsorção pode ser considerada temporária, uma vez que o P se torna disponível após o segundo ano de cultivo devido à ação de ectomicorrizas associadas às raízes das plantas e de outros microrganismos do solo (Foltran et al., 2019; Hallama et al., 2019; Rocha et al., 2016a).

O fosfato natural reativo também promove incrementos no P-lábil, embora de forma mais gradativa. Dada a grande quantidade de fosfato de cálcio (P-Ca) nesse fertilizante, sua liberação ocorre de forma lenta e gera um estoque significativo de fósforo na fração moderadamente lábil no solo. Por meio do fracionamento de P no solo, observou-se que, aos 36 meses pós-plantio, o P-Ca ainda não havia sido completamente solubilizado (Foltran et al., 2019).

As respostas à fertilização encontradas na fase inicial do crescimento da floresta decrescem ao longo da rotação de cultivo e podem deixar de existir ao final da rotação (Gonçalves, 2011; Bazani et al., 2014). Nessa direção, os efeitos sobre as frações de P no solo podem também variar durante a rotação, alterando os teores de formas orgânicas e inorgânicas de P, podendo afetar a nutrição e o crescimento dos povoamentos (Costa et al., 2016; Rocha et al., 2019b).

Neste estudo, testaram-se as seguintes hipóteses:

I. O crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* é maior com a aplicação de fertilizantes fosfatados;
II. A fertilização com fontes solúveis de P (MAP e SPS) resulta em maior crescimento ao fim da rotação do que a com fontes menos solúveis (FNR);
III. Ocorre intensa modificação de frações lábeis e moderadamente lábeis ao longo de uma rotação de cultivo em povoamentos de eucalipto que receberam aplicações de fertilizantes fosfatados;
IV. Frações orgânicas lábeis e moderadamente lábeis de P são fundamentais para a nutrição do eucalipto, mesmo com a aplicação de fertilizantes fosfatados.

Os objetivos deste estudo foram avaliar os efeitos da aplicação de P com fontes solúveis e pouco solúveis, utilizadas como fontes únicas e conjuntas de P, nas frações e nos estoques de P no solo, na nutrição e no crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* ao longo de uma rotação de cultivo.

## 2.2 Conclusão

- A fertilização com fosfato natural reativo alterou os teores de P em profundidade no solo, mais do que as outras fontes. A fração de P mais alterada foi a moderadamente-lábil, associada à solubilização de fosfato de cálcio. Nesse tratamento, as fontes principais de P absorvidas originaram-se das frações P-Ca e Po, pois não ocorreu modificação do teor de P não-lábil;
- Nos tratamentos que receberam aplicação de fosfato natural reativo, observou-se alto acúmulo de P e Ca no lenho, relacionado à alta solubilização P-Ca e à aplicação localizada deste no sulco de plantio;
- Constatou-se que a análise de rotina de P (extraído por resina) subestima a disponibilidade de P no solo para a nutrição de árvores de *E. grandis*;
- A fertilização fosfatada, seja com fonte solúvel, seja com pouco solúvel, favoreceu o maior crescimento das árvores, notadamente, nos primeiros anos de cultivo. A diminuição do ritmo de crescimento das árvores, nos tratamentos fertilizados com P no fim da rotação de cultivo, relativamente ao Controle, associou-se à maior competição por luz e água nesses tratamentos, nos quais havia árvores de porte maior. Durante a rotação de cultivo, houve longos períodos de estiagem, causando estresse hídrico nas árvores, o que diminuiu os efeitos diferenciais entre tratamentos com fertilização fosfatada;
- As plantas fertilizadas com fontes solúveis de P (SSP) apresentaram maior crescimento em relação às fertilizadas com fontes pouco solúveis (RP). O fato pode ser atribuído ao ótimo arranque inicial de crescimento das árvores, diferença que se manteve ao longo da rotação de cultivo;
- As árvores absorveram o P fornecido pelos fertilizantes e parte do Po-lábil e moderadamente-lábil, efeito detectado por meio da alteração dos teores dessas frações de P no solo;
- A mineralização de Po no solo desempenhou papel essencial no crescimento das árvores, especialmente no Controle, que não recebeu aplicação suplementar de P.

## Referências

Alvares, C.A., Stape, J.L., Sentelhas, P.C., De Moraes Gonçalves, J.L., Sparovek, G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorol. Zeitschrift 22, 711–728. https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507

Barros, N.F. De, Novais, R.F. de, Neves, J.C.L., 1990. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. Relação solo-eucalipto. Viçosa, MG Folha Viçosa 127–186.

Bazani, J.H., 2014. Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis e pouco solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto. Universidade de São Paulo, Piracicaba. https://doi.org/10.11606/D.11.2014.tde-11112014-160156

Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Melo, E.A.S.C., Prieto, M., 2014. Nutrição fosfatada em plantações de Eucalipto. Informações Agronômicas 148, 28.

Costa, M., Gama-Rodrigues, A., Gonçalves, J., Gama-Rodrigues, E., Sales, M., Aleixo, S., 2016. Labile and Non-Labile Fractions of Phosphorus and Its Transformations in Soil under Eucalyptus Plantations, Brazil. Forests 7, 15. https://doi.org/10.3390/f7010015

Dias, L.E., Fernandez, J.Q.P., De Barros, N.F., De Novais, R.F., De Moraes, É.J., Daniels, W.L., 2000. Availability of phosphorus in a Brazilian oxisol cultivated with eucalyptus after nine years as influenced by phosphorus-fertilizer source, rate, and placement. Commun. Soil Sci. Plant Anal. 31, 837–847. https://doi.org/10.1080/00103620009370481

Foltran, E.C., 2017. Dinâmica do fósforo no sistema solo-planta em função da solubilidade de fertilizantes fosfatados, em plantios de *Eucalyptus grandis*. Universidade de São Paulo, Piracicaba. https://doi.org/10.11606/D.11.2017.tde-25072017-171626

Foltran, E.C., Rocha, J.H.T., Bazani, J.H., Gonçalves, J.L. de M., Rodrigues, M., Pavinato, P., Valduga, G.R., Erro, J., Garcia-Mina, J.M., 2019. Phosphorus pool responses under different P inorganic fertilizers for a eucalyptus plantation in a loamy Oxisol. For. Ecol. Manage. 435, 170–179. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.10.053

GAVA, J.L., 2003. Efeito comparativo de fontes e doses de fósforo em plantios de eucalipto. Relatório Técnico da Cia. Suzano Pap. e Celul. 25.

Gava, J.L., Gonçalves, J.L.M., Shibata, F.Y., Corradini, L., 1997. Eficiência relativa de fertilizantes fosfatados no crescimento inicial de eucalipto cultivado em solos do cerrado. Rev. Bras. Ciência do Solo 21, 497–504. https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000300020

Gonçalves, J.L. de M., 2011. Fertilização de plantação de Eucalipto, in: Gonçalves, J.L. de M., Pulito, A.P., Arthur Junior, J.C., Silva, L.D. (Orgs.), Anais II Encontro brasileiro de silvicultura. PTSM/IPEF/FUPEF, Campinas, p. 342.

Gonçalves, J.L. de M., Alvares, C.A., Higa, A.R., Silva, L.D., Alfenas, A.C., Stahl, J., Ferraz, S.F. de B., Lima, W. de P., Brancalion, P.H.S., Hubner, A., Bouillet, J.P.D., Laclau, J.P., Nouvellon, Y., Epron, D., 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. For. Ecol. Manage. 301, 6–27. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.12.030

Gonçalves, J.L.D.M., Alvares, C.A., Gonçalves, T.D., Moreira, R.M., Mendes, J.C.T., Gava, J.L., 2012. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de Eucalyptus grandis, com uso de sistema de informação geográfica. Sci. For. Sci. 40, 187–201.

Gonçalves, J.L.M., Stape, J.L., Laclau, J.P., Bouillet, J.P., Ranger, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. South. For. 70, 105–118.

https://doi.org/10.2989/SOUTH.FOR.2008.70.2.6.534

Hallama, M., Pekrun, C., Lambers, H., Kandeler, E., 2019. Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. Plant Soil 434, 7–45. https://doi.org/10.1007/s11104-018-3810-7

Johri, A.K., Oelmüller, R., Dua, M., Yadav, V., Kumar, M., Tuteja, N., Varma, A., Bonfante, P., Persson, B.L., Stroud, R.M., 2015. Fungal association and utilization of phosphate by plants: success, limitations, and future prospects. Front. Microbiol. 6, 1–13. https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00984

Laclau, J.-P., da Silva, E.A., Rodrigues Lambais, G., Bernoux, M., le Maire, G., Stape, J.L., Bouillet, J.-P., Gonçalves, J.L. de M., Jourdan, C., Nouvellon, Y., 2013. Dynamics of soil exploration by fine roots down to a depth of 10 m throughout the entire rotation in Eucalyptus grandis plantations. Front. Plant Sci. 4, 1–12. https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00243

Laclau, J.P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J.L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A.T., Nouvellon, Y., Saint-André, L., Bouillet, J.P., de Cassia Piccolo, M., Deleporte, P., 2010. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. For. Ecol. Manage. 259, 1771–1785. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.06.010

Malavolta, E., Vitti, G.C., Oliveira, S.A. de., 1997. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações, 2º ed, Potafos. Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, Piracicaba.

Melo, E.A.S.C., Gonçalves, J.L. de M., Rocha, J.H.T., Hakamada, R.E., Bazani, J.H., Wenzel, A.V.A., Arthur, J.C., Borges, J.S., Malheiros, R., de Lemos, C.C.Z., Ferreira, E.V. de O., Ferraz, A. de V., 2016. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. Forests 7, 1–15. https://doi.org/10.3390/f7010002

Negassa, W., Leinweber, P., 2009. How does the hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: a review. J. Plant Nutr. Soil Sci. 172, 305–325. https://doi.org/10.1002/jpln.200800223

O'Hara, C.P., Bauhus, J., Smethurst, P.J., 2006. Role of light fraction soil organic matter in the phosphorus nutrition of Eucalyptus globulus seedlings. Plant Soil 280, 127–134. https://doi.org/10.1007/s11104-005-2675-8

R Core Team, 2021. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Rafael, R.B.A., Fernández-Marcos, M.L., Cocco, S., Ruello, M.L., Weindorf, D.C., Cardelli, V., Corti, G., 2018. Assessment of Potential Nutrient Release from Phosphate Rock and Dolostone for Application in Acid Soils. Pedosphere 28, 44–58. https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60437-5

Raij, B. van., Andrade, J.C. de., Cantarella, H., Quaggio, J.A., 2001. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas.

Robin, A., Pradier, C., Sanguin, H., Mahé, F., Lambais, G.R., de Araujo Pereira, A.P., Germon, A., Santana, M.C., Tisseyre, P., Pablo, A.-L., Heuillard, P., Sauvadet, M., Bouillet, J.-P., Andreote, F.D., Plassard, C., de Moraes Gonçalves, J.L., Cardoso, E.J.B.N., Laclau, J.-P., Hinsinger, P., Jourdan, C., 2019. How deep can ectomycorrhizas go? A case study on Pisolithus down to 4 meters in a Brazilian eucalypt plantation. Mycorrhiza 29, 637–648. https://doi.org/10.1007/s00572-019-00917-y

Rocha, J.H.T., Gonçalves, J.L. de M., Ferraz, A. de V., Poiati, D.A., Arthur Junior, J.C., Hubner, A., 2019a. Growth dynamics and productivity of an Eucalyptus grandis plantation under omission of N, P, K Ca and Mg over two crop rotation. For. Ecol. Manage. 447, 158–168.

https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.060

Rocha, J.H.T., Gonçalves, J.L. de M., Gava, J.L., Godinho, T. de O., Melo, E.A.S.C., Bazani, J.H., Hubner, A., Arthur Junior, J.C., Wichert, M.P., 2016a. Forest residue maintenance increased the wood productivity of a Eucalyptus plantation over two short rotations. For. Ecol. Manage. 379, 1–10. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.07.042

Rocha, J.H.T., Marques, E.R.G., Gonçalves, J.L. d. M., Hübner, A., Brandani, C.B., Ferraz, A. d. V., Moreira, R.M., 2016b. Decomposition rates of forest residues and soil fertility after clear-cutting of Eucalyptus grandis stands in response to site management and fertilizer application. Soil Use Manag. 32, 289–302. https://doi.org/10.1111/sum.12283

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019b. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. For. Ecol. Manage. 437, 295–303. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051

Rocha, J.H.T., Menegale, M.L.C., Rodrigues, M., Gonçalves, J.L. de M., Pavinato, P.S., Foltran, E.C., Harrison, R., James, J.N., 2019c. Impacts of timber harvest intensity and P fertilizer application on soil P fractions. For. Ecol. Manage. 437, 295–303. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.01.051

Santos, H.G. dos, Jacomine, P.K.T., Anjos, L.H.C. dos, Oliveira, V.A. de, Lumbreras, J.F., Coelho, M.R., Almeida, J.A. de, Araujo Filho, J.C. de, Oliveira, J.B. de, Cunha, T.J.F., 2018. Sistema brasileiro de classificação de solos, Embrapa Solos.

Thornthwaite, C.W., Mather, J.R., 1955. The Water Balance. Publ. Climatol. 8, 104.