

SAMUEL VASCONCELOS VALADARES

**MODELAGEM DA AQUISIÇÃO DE FÓSFORO E DA EFICIÊNCIA
NUTRICIONAL DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2015

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

V136m
2015 Valadares, Samuel Vasconcelos, 1987-
Modelagem da aquisição de fósforo e da eficiência
nutricional de eucalipto / Samuel Vasconcelos Valadares. –
Viçosa, MG, 2015.
vii, 93f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Júlio César Lima Neves.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Inclui bibliografia.

1. *Eucalyptus*. 2. Eucalipto. 3. Fósforo. 4. Plantas -
Nutrientes. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Solos. Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de
Plantas. II. Título.

CDD 22. ed. 634.973766

SAMUEL VASCONCELOS VALADARES

**MODELAGEM DA AQUISIÇÃO DE FÓSFORO E DA EFICIÊNCIA
NUTRICIONAL DE EUCALIPTO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 17 de agosto de 2015

Prof. Nairam Felix de Barros
Coorientador

Prof. Luiz Arnaldo Fernandes

Prof. Hélio Garcia Leite
Coorientador

Prof. Haroldo Nogueira de Paiva

Prof. Júlio César Lima Neves
Orientador

*À minha mãe e irmão, Tânia e Rafael, que dão
sentido à minha vida e sonhos.*

*À minha noiva Thalita, presença companheira,
doce e carinhosa com quem busco amor.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização do curso.

À Universidade da Flórida, pela oportunidade de realização de parte deste trabalho e de trocar conhecimento com seus pesquisadores.

À Capes pela concessão de bolsa de estudos durante a fase inicial do curso.

À FAPEMIG pela concessão de bolsa de estudos durante a fase final do curso e pelo financiamento do doutorado sanduíche no exterior.

Ao Prof. Júlio César Lima Neves, pelo exemplo, por compartilhar sua sabedoria, pela excelente orientação e pela amizade.

Ao Prof. Hélio Garcia Leite, pela grande contribuição para com esta tese, por compartilhar seu conhecimento, pelo exemplo de humildade e trabalho.

Ao Prof. Nairam Felix de Barros, pela contribuição para com este trabalho, por compartilhar seu conhecimento e pelo exemplo de trabalho e dignidade.

Ao Prof. Wendell P. Cropper Jr., pelos ensinamentos, conversas e excepcional orientação durante minha estada na Universidade da Florida.

Ao Prof. Stefan Gerber, pelos ensinamentos e conversas que contribuíram para a realização deste trabalho.

À Prof. Karen A. Kainer e seus orientados, por cederem a infraestrutura necessária para que eu realizasse parte desta tese e pela excelente recepção em seu laboratório.

À Maola, por auxiliar na confecção dos mapas apresentados neste trabalho, sempre com muita dedicação e paciência.

Ao Prof. Ivo Ribeiro da Silva, pela orientação quanto à busca de dados, pelo exemplo de dedicação e pelas aulas.

Aos professores Nicholas B. Comerford, Philip Smethurst e Jean Paul Laclau, pelo envio de informações que contribuíram para com este trabalho.

Aos professores Roberto Ferreira Novais e Víctor Hugo Alvarez V., pelo exemplo de amor ao trabalho, pelas aulas e pelas conversas.

Aos professores Edson M. Mattiello, Genelício C. Rocha, Hugo A. Ruiz, Jaime Vargas de Melo, João Carlos Ker, Leonardus Vergütz, Liovando Marciano da Costa, Maurício P. F. Fontes, Raphael B. A. Fernandes, Renildes L. F. Fontes e Reinaldo Bertola Cantarutti, pelas aulas, ensinamentos e pelas conversas.

Aos professores Delacyr, Ernane e Luiz Arnaldo da Universidade Federal de Minas Gerais, pelas importantes orientações na fase inicial de minha vida científica, fundamentais para meu crescimento profissional e pessoal.

A todos os demais professores com quem muito aprendi.

À Luciana e ao Nayan, pelo apoio constante na secretaria do DPS - UFV.

À Sara, secretária do DFP - UFV, pelo auxílio e solução de dúvidas.

Aos laboratoristas e colegas Carlos, Edimaldo, Írio Fernando, Janilson, Jorge, José Alberto, José Roberto, Lula, Mario, Paulo, Poliana Gonçalves, que sempre auxiliaram em seus laboratórios.

Aos amigos Caio, Diogo, Gelton, Jefferson, Nairam Filho, Thiago Otávio e Wedisson, com quem construí laços fortes de afinidade e ajuda mútua.

Aos amigos e colegas Aridiano, Ecila, Evair, Ingrid, Maola, Mônica, Patricia e Nicolás, com quem partilhei excelentes momentos.

À Cristina, Natalie, Silvia, Todd, e demais colegas da UF, pela recepção e ajuda durante minha estada em Gainesville - FL.

Ao Prof. Donald W. Dickson e à pesquisadora Janete Brito, pelos ensinamentos e amizade.

Aos meus tios, tias, primos e primas, pela amizade, ajuda e carinho.

À minha noiva Thalita, pelo companheirismo, carinho e afeto.

Ao meu Irmão Rafael, pela amizade, apoio e confiança incondicionais.

À minha mãe Tânia, pelo amor, pelo carinho e apoio incondicionais.

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2 - Capítulo 1 - MODELAGEM MECANÍSTICA DA AQUISIÇÃO DE FÓSFORO POR PLANTAS DE EUCALIPTO EM SOLOS TROPICAIS	
2.1 - RESUMO	6
2.2 – ABSTRACT.	7
2.3 – INTRODUÇÃO.	8
2.4 - MATERIAL E MÉTODOS	11
2.5- RESULTADOS E DISCUSSÃO.	15
2.6- CONCLUSÕES	26
3 - Capítulo 2 - MODELAGEM DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE EUCALIPTO	
3.1 - RESUMO	32
3.2 – ABSTRACT	33
3.3- INTRODUÇÃO	34
3.3- MATERIAL E MÉTODOS	36
3.4- RESULTADOS	38
3.5- DISCUSSÃO	52
3.6- CONCLUSÕES	60
4 - Capítulo 3 - REDES NEURONAIAS ARTIFICIAIS PARA PREDIÇÃO DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E PARTIÇÃO DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE EUCALIPTO	
4.1 - RESUMO	66
4.2 – ABSTRACT	67
4.3- INTRODUÇÃO	68
4.4- MATERIAL E MÉTODOS	70
4.5- RESULTADOS E DISCUSSÃO	73
4.6 - CONCLUSÃO	81
CONCLUSÕES GERAIS	85
APÊNDICE	86

RESUMO

VALADARES, Samuel Vasconcelos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2015. **Modelagem da aquisição de fósforo e da eficiência nutricional de eucalipto**. Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientadores: Hélio Garcia Leite e Nairam Felix de Barros

Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aprimorar a modelagem mecanística da aquisição de fósforo e de gerar modelos para estimativa da eficiência de uso e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto. No primeiro capítulo, foram estabelecidas funções de pedotransferência para predição de parâmetros de modelos mecanísticos de aquisição de P. Também foram realizados aprimoramentos no modelo SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) e o modelo foi avaliado quanto à sua capacidade de predição do P absorvido por plantas de eucalipto em solos tropicais, pobres nesse nutriente, bem como de prever o efeito de fertilizações nesses solos. Nos capítulos dois e três foram obtidos modelos para predição da eficiência de uso e alocação de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil. Para tanto, foram adotadas duas estratégias. A primeira delas foi a utilização de regressão não linear, para estimativa dessas variáveis dependentes em função de variáveis independentes associadas ao clima (precipitação pluvial média), ao solo (teor de argila) e às características do povoamento (idade e espaçamento). A segunda estratégia foi baseada em redes neuronais artificiais. Para essa última, além das variáveis independentes anteriormente mencionadas, incluiu-se o genótipo. As duas abordagens foram também avaliadas com dados independentes. As modificações e as funções de pedotransferência desenvolvidas no primeiro capítulo deste trabalho facilitaram a obtenção de parâmetros do modelo SSAND, além de conferir um caráter mais dinâmico à modelagem da aquisição de P adotada. O modelo SSAND previu adequadamente a absorção de P por plantas de eucalipto em dois solos tropicais, bem como o efeito da fertilização com P. Ambas as estratégias de modelagem adotadas nos capítulos dois e três mostraram-se adequadas para predição da eficiência nutricional e alocação de nutrientes por plantas de eucalipto no Brasil.

ABSTRACT

VALADARES, Samuel Vasconcelos, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2015. **Modelling phosphorus uptake and nutrient use efficiency in eucalyptus**. Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-advisers: Hélio Garcia Leite and Nairam Felix de Barros

This research was conducted in order to improve P uptake modeling using a mechanistic approach and to estimate nutrient use efficiency and allocation in eucalyptus plantations in Brazil. In the first chapter, pedotransfer functions were developed to estimate parameters of a mechanistic model (Soil Nutrient Supply and Demand - SSAND). Modifications in the model were made so that it was possible to represent temporal variations in root growth, soil moisture and water influx into plant roots more dynamically. The modeling procedures adopted were evaluated using experimental data conducted with *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. grown in greenhouse conditions. In chapters two and three, two approaches were used to estimate N, P and K use efficiency and allocation in eucalyptus plantations in Brazil. First, non-linear regression equations were adjusted to estimate nutrient use efficiency (NUE) and allocation (NA) as a function of climate (average rainfall), soil (clay content) and stand characteristics (age and spacing). The second strategy was based on artificial neural networks which included genotype in addition to the above-mentioned independent variables. The generated models were evaluated. Modifications and pedotransfer functions developed in the first chapter of this work helped to simplify the use of SSAND beyond improving the simulation dynamics. The SSAND model adequately predicted P uptake by eucalyptus plants in two tropical soils as well as the effect of fertilization. Both modeling strategies adopted in chapters two and three were suitable for estimating the NUE and NA in Brazilian eucalyptus plantations.

INTRODUÇÃO GERAL

O sistema solo-planta é complexo e sua compreensão requer a integração de conhecimentos de diversos ramos da ciência. Do melhor entendimento e predição dos processos envolvidos nesse sistema dependem grandes e importantes desafios a serem resolvidos pela humanidade, entre os quais: a capacidade de atender à demanda mundial por alimentos, fibras e madeira; a conservação de ecossistemas naturais; a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa e a mitigação de seus impactos (OREN et al., 2001; BARROS & COMERFORD, 2002; OLIVER & GREGORY, 2015). Todas essas questões, entre muitas outras associadas às funções exercidas pelo solo, estão relacionadas, de forma direta e,ou, indireta, à ciclagem de nutrientes em sistemas naturais e modificados pelo homem. Esses processos, são entendidos e quantificados por modelos¹, conceituais e,ou, quantitativos.

A modelagem é, portanto, uma importante ferramenta para ampliar, organizar e utilizar o conhecimento científico acerca da relação solo-planta, mas também um grande desafio. Nas últimas décadas houve um grande esforço para desenvolver modelos conceituais e quantitativos para compreensão e predição dos processos envolvidos no fluxo de nutrientes no solo, sua absorção e utilização pelas plantas. Além de sua utilidade para predição desses processos, esses modelos são utilizados para testar hipóteses e para indicar falhas no conhecimento atual (HINSINGER et al., 2011).

Muitos dos trabalhos nessa área são dedicados à modelagem processual da aquisição de nutrientes (BARBER, 1995; TYNKER & NYE, 2000).

Apesar da evolução dessa modalidade de modelos (NYE & MARRIOTT 1969; BALDWIN et al. 1973; BARBER & CUSHMAN 1981; ITOH & BARBER 1983; BOULDIN 1989; SMETHURST & COMERFORD 1993; YANAI 1994; COMERFORD et al., 2006), algumas limitações têm sido identificadas, notadamente para predição da aquisição de nutrientes de menor mobilidade em solos de baixa fertilidade (ERNANI et al. 1994; MOLLIER et al., 2008).

¹ Embora existam muitas definições para o termo modelo, ele pode ser entendido como uma representação da realidade com maior ou menor simplificação (HAEFNER, 2005).

Ademais, esses modelos muitas vezes requerem a utilização de muitas variáveis de entrada, algumas delas de difícil obtenção. Por isso, o primeiro capítulo desse trabalho é dedicado à modelagem mecanística da aquisição de P em solos tropicais, pobres nesse nutriente, sendo propostas funções para facilitar a utilização desses modelos, bem como procedimentos para seu aperfeiçoamento.

Alguns modelos, empíricos e processuais, utilizam índices de eficiência de uso de nutrientes pelas culturas para calcular sua demanda nutricional (BARROS et al., 1995; COMERFORD et al., 2006) . Parte deles permite estimar também a alocação de nutrientes. No entanto, os trabalhos realizados para definição dessas variáveis são, muitas vezes, de extrapolação restrita. Além disso, ainda não foram incorporados a esses modelos os efeitos de alguns fatores conhecidos. Exemplo disso é a influência do fator capacidade do solo sobre a eficiência nutricional de P (MUNIZ et al., 1985; NOVAIS & SMITH, 1999). Esse tipo de abordagem tem importância particular para cultura do eucalipto no Brasil, cujas recomendações de adubação são realizadas com base em modelagem de balanço nutricional. Por isso, os capítulos dois e três deste trabalho são dedicados ao desenvolvimento de modelos para predição da eficiência nutricional e alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto.

REFERÊNCIAS

BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**, 2. ed. New York: Wiley, 1995. 414p.

BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.487-592.

BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; TEIXEIRA, J.J.; FERNANDES FILHO, E.I. Nutricalc 2.0 - sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**,16:129-131, 1995

BARBER, S. A. & CUSHMAN, J. H. **Nutrient uptake model for agronomic crops**. Pages 381–409 in I. K Iskander, ed. Modelling wastewater renovation land treatment. Wiley, New York, NY, 1981.

BALDWIN, J. P.; NYE, P. H.; AND.TINKER, P. B. Uptake of solutes by multiple root systems from soil. III. A model for calculating the solute uptake by a randomly dispersed root system developing in a finite volume of soil. **Plant and Soil** 38: 621–635, 1973.

BOULDIN, D. R. A multiple ion uptake model. **Journal of Soil Science**, 40: 309–319. 1989.

COMERFORD, N.B.; CROPPER, W.P.J.; HUA, L.; SMETHURST, P.J.; VAN REES, K.C.J.; JOKELA, E.J.; ADÉGBIDI, H.; BARROS, N.F. Soil supply and nutrient demand (SSAND): a general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. **Canadian Journal of Soil Science**, 86: 655–673, 2006.

ERNANI, P.R., SANTOS, J.C.P., KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D.S. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, 17:1067–1078, 1994.

HAEFNER, J.W. **Modeling biological systems, principles and applications**. Springer, New York (2005) 475 p.

HINSINGER, P.; BRAUMAN, A.; DEVAU, N.; GÉRARD, F.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.; LE CADRE, E.; JAILLARD, B.; PLASSARD, C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? **Plant and Soil**, 348:29–61, 2011

ITOH S. & BARBER, S. A. A numerical solution of whole plant nutrient uptake for soil root systems with root hairs. **Plant and Soil**, 70: 403–413, 1983.

MOLLIER, A., DE WILLIGEN, P., HEINEN, M., MOREL, C., SCHNEIDER, A., PELLERIN, S., A two dimensional simulation model of phosphorus uptake including crop growth and P response. **Ecological Modeling**, 210: 453–464, 2008.

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 9:237-243, 1985.

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NYE, P. H. AND MARRIOTT, F. H. C. A theoretical study of the distribution of substances around roots resulting from simultaneous diffusion and mass flow. **Plant and Soil**, 30: 459–472, 1969.

OLIVER, M. A. & GREGORY, P. J. Soil, food security and human health: a review. **European Journal of Soil Science**, 66: 257–276, 2015.

OREN, R.; ELLSWORTH, D.S.; JOHNSEN, K.H.; PHILLIPS, N.; EWERS, B.E.; MAIER, C.; SCHÄFER, K.V.R.; MCCARTHY, H.; HENDREY, G.; MCNULTY, S.G.; KATUL, G.G. Soil fertility limits carbon sequestration by forest ecosystems in a CO₂-enriched atmosphere. **Nature**, 411, 469–472, 2001.

SMETHURST, P. J. & COMERFORD, N. B. Simulating nutrient uptake by single or competing and contrasting root systems. **Soil Science Society of America Journal**, 57: 1361- 1367, 1993.

YANAI, R. D. A steady-state model of nutrient uptake accounting for newly grown roots. **Soil Science Society of America Journal** 58: 1562–1571, 1994.

TINKER, P.B.; NYE, P.H. **Solute movement in the rhizosphere**, 2. ed. Oxford, UK: Oxford Univ. Press, 2000.444p.

CAPÍTULO 1

Modelagem mecanística da aquisição de fósforo por plantas de eucalipto em solos tropicais

Resumo: Esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de aprimorar a modelagem mecanística da aquisição de fósforo e avaliar o modelo SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) para estimativa da absorção desse nutriente por plantas de eucalipto em solos tropicais. Foram realizadas modificações na versão codificada em Python desse modelo, de modo que fosse possível contemplar, de forma mais dinâmica, as variações temporais no crescimento radicular, na umidade do solo e no influxo de água nas raízes das plantas. Com base em dados de literatura, de experimentos realizados com solos tropicais de diferentes características físico-químicas, foram também estabelecidas funções de pedotransferência para predição de parâmetros do modelo a citar: o coeficiente de distribuição (k_d) das isothermas de dessorção de P e do teor desse nutriente na solução do solo. O modelo, com as modificações propostas, foi avaliado com dados de um experimento realizado em casa de vegetação com *Eucalyptus camaldulensis*. As modificações e as funções de pedotransferência desenvolvidas neste trabalho facilitaram a obtenção de parâmetros do modelo SSAND e conferiram um caráter mais dinâmico à modelagem da aquisição de P. A modelagem proposta mostrou-se adequada para estimativa da aquisição de P por plantas de eucalipto em solos tropicais.

Palavras - chave: transporte de solutos, absorção de P, *Eucalyptus spp.*, adubação.

Modeling phosphorus uptake by eucalyptus eucalyptus grown in tropical soils

Abstract: This work was conducted in order to improve P uptake modeling and to evaluate if the model SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) is suitable to predict the absorption of this nutrient by eucalyptus in tropical soils. Changes in the Python version of this model were made so that it was possible to represent temporal variations in root growth, soil moisture and water influx into plant roots more dynamically. Based on data from the literature, pedotransfer functions were adjusted for estimation of the distribution coefficient (K_d) of P desorption isotherms and P content in soil solution, of Brazilian soils. The modeling procedures adopted were evaluated using experimental data conducted with *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh grown in greenhouse conditions. The ability of SSAND to estimate the effect of fertilizations was also evaluated. The pedotransfer functions and modifications developed in this work helped to simplify the use of SSAND, beyond improving the simulation dynamics. The SSAND model adequately estimated P uptake by eucalyptus plants in two tropical soils as well as the effect of fertilizations.

Keywords: solute transport, P uptake, *Eucalyptus spp.*, fertilization.

INTRODUÇÃO

O fósforo é um dos nutrientes mais estudados no mundo e a otimização do uso desse recurso é estratégica, por razões diversas, entre as quais: a incerteza acerca da magnitude das reservas mundiais desse elemento; a concentração dos depósitos conhecidos em poucos locais do planeta; os múltiplos impactos ambientais provocados pelo uso irracional desse recurso e a baixa capacidade de suprimento natural de P por boa parte dos solos agricultáveis (SCHACHTMAN et al., 1998; NOVAIS & SMYTH, 1999; SMITH, 2002; SCHNUG & LOTTERMOSER, 2013; BAVEYE, 2015, JASINSKI, 2015).

A fração do P aplicado nos cultivos que é recuperada pelas plantas é de, maneira geral, muito baixa (BAVEYE, 2015). Por outro lado, melhor aproveitamento dos adubos fosfatados pode ser obtido com o adequado manejo desse nutriente (SYERS et al., 2008; FRANCISCO et al., 2015). Há ainda grande potencial para melhoria da eficiência de uso do P após sua absorção pelas plantas (VENEKLAAS et al., 2012). No Brasil, onde predominam solos de baixa fertilidade natural, com alta capacidade de sorção de P (NOVAIS & SMYTH, 1999), um grande esforço tem sido empreendido para otimização do uso desse nutriente, notadamente nas últimas décadas. Ainda assim, problemas por subutilização ou uso excessivo de fertilizantes fosfatados são recorrentes (FRANCISCO et al., 2015). Esforços adicionais são necessários, portanto, para o desenvolvimento de novas técnicas para racionalização do uso de P, bem como para a utilização e o aprimoramento das boas práticas para uso de fertilizantes já recomendadas pelos órgãos de pesquisa e extensão no país.

Os métodos utilizados para recomendação de fertilizantes são, em sua maioria, empíricos, baseados na utilização de extratores. Esses métodos funcionam, fundamentalmente, como índices de biodisponibilidade e não refletem muitos dos processos e interações entre os componentes do sistema solo-planta-atmosfera (BARBER, 1995; MARSCHNER, 2012; NOURA et al., 2013),

Entre as abordagens propostas para aprimorar a predição da disponibilidade de nutrientes no solo, de modo a considerar sua dinâmica no ambiente, é de se destacar o desenvolvimento de modelos de simulação

(BARBER, 1995). Esses modelos são potencialmente úteis para melhorar o entendimento da ciclagem de P nos agroecossistemas e para orientar tomadas de decisão que levem à otimização do uso desse importante recurso natural.

A modelagem da aquisição de nutrientes de plantas tem sido objeto de vários estudos, com progressivas melhorias (SILBERBUSH et al., 2013). Alguns modelos adotam uma abordagem empírica e outros, denominados modelos mecanísticos ou processuais, procuram descrever os processos associados ao fluxo de um ou mais nutrientes até as raízes e sua posterior absorção e, ou utilização pelas plantas.

Silberbush et al. (2013), descrevem a evolução dos modelos mecanísticos de aquisição de nutrientes e suas diferenças básicas. Em sua maioria, esses modelos baseiam-se na teoria de transporte de solutos, para determinar a concentração do (s) nutriente (s) em questão na superfície das raízes. Para tanto, são adotadas soluções numéricas ou analíticas para as equações diferenciais que descrevem o transporte de solutos no solo e o influxo de nutrientes para as raízes, que normalmente é descrito pela cinética de Michaelis-Menten (TYNKER & NYE, 2000). Para um entendimento detalhado das diferentes categorias de modelos de transporte de solutos, bem como suas vantagens e desvantagens, podem ser consultados os trabalhos de BARBER (1995), TYNKER & NYE (2000) e SILBERBUSH et al. (2013).

Apesar dos muitos avanços, a modelagem de aquisição de nutrientes ainda requer aprimoramentos e avaliações (HINSINGER et al., 2011), especialmente para condições tropicais, com culturas perenes, para as quais trabalhos nessa área são escassos. Outro entrave à utilização desses modelos é a necessidade de utilização de variáveis cujos procedimentos de obtenção são pouco usuais e, por vezes, de difícil realização. Nesse aspecto, funções de pedotransferência podem ser desenvolvidas para estimar valores correspondentes a variáveis de solo de difícil obtenção. Essas funções têm sido muito utilizadas para predição da dinâmica da água no solo, entre outras características e variáveis desse sistema, o que facilita o uso dos modelos existentes, com finalidades diversas.

Nesse trabalho foi utilizado o modelo SSAND - Soil Supply and Nutrient Demand (COMERFORD et al., 2006). Esse modelo mecanístico reúne

características desejáveis para simulação da aquisição de P entre as quais a possibilidade de simular o efeito de micorrizas e de fertilizações.

Os objetivos desse trabalho foram: desenvolver procedimentos para facilitar a utilização de modelos mecanísticos para simulação da aquisição de P; aprimorar o modelo SSAND e avaliar a modelagem adotada para predição da aquisição desse nutriente por plantas de eucalipto em solos tropicais.

MATERIAL E MÉTODOS

O modelo SSAND

O SSAND (Soil Supply and Nutrient Demand) é um modelo mecanístico geral (COMERFORD et al., 2006) baseado na modelagem descrita por Smethurst & Comerford (1993) (modelo COMP8), elaborada a partir dos conceitos de Nye e Tinker (1977).

Basicamente, o SSAND simula o fluxo de massa e a difusão de solutos no solo até as raízes, admitindo o equilíbrio dinâmico para esses processos e que a absorção pelas plantas é controlada pela concentração do nutriente na superfície radicular. Considera-se também que o fluxo de solutos da fase sólida para a solução do solo e vice-versa, é descrito pelas isothermas de dessorção e sorção. A cinética de absorção pela planta é descrita pelo modelo de Michaelis-Menten. O SSAND permite ainda simular o efeito da mineralização de compostos orgânicos e de fertilizações (SMETHURST & COMERFORD, 1993; COMERFORD et al., 2006; CROPPER Jr. & COMERFORD, 2005).

Assim como o modelo COMP8, o SSAND é capaz de simular a absorção de nutrientes por sistemas radiculares de mais de uma espécie, considerando mais de uma camada de solo (SMETHURST & COMERFORD, 1993; COMERFORD et al., 2006). Adicionalmente, a abordagem adotada permite variar parâmetros de solo e planta ao longo das simulações. É possível também levar em conta a contribuição de micorrizas, o que não ocorria no COMP8. O modelo permite ainda estimar a demanda da planta pelo nutriente para o qual se deseja simular a absorção, a partir da eficiência de uso dos nutrientes ou coeficiente de utilização biológica, de modo similar ao modelo NUTRICALC (BARROS et al., 1995), utilizado para recomendação de fertilizantes na área florestal no Brasil. No caso de diferenças entre as estimativas da demanda do nutriente pela planta e seu suprimento pelo solo, podem ser simuladas fertilizações.

O SSAND está disponível nas linguagens computacionais Visual Basic 6.0 e Python (versão utilizada nesse trabalho).

Funções de pedotransferência para estimativas de parâmetros do modelo

Modelos de regressão foram ajustados para predição do teor de P em solução, a partir de seu teor extraído em Mehlich-1 e do teor de argila no solo, métodos rotineiramente utilizados nos laboratórios de análise de solo no Brasil. Para o ajuste dessas funções foram utilizados os dados dos trabalhos de Vargas et al. (1982), Miranda et al. (1996), Marcolan (2006) e Fink (2012). Esses trabalhos foram realizados em diferentes classes de solo, localizados no sul e no sudeste do Brasil. A extração da solução do solo foi realizada por métodos de deslocamento e centrifugação (ADAMS, 1974; GILLMAN, 1976 e NOLLA, 2003).

Foram também ajustadas equações de regressão para predição do k_d (coeficiente de distribuição) referente à isoterma de dessorção de P a partir dos valores de k_d de sorção, para solos de Cerrado com diferentes características físico-químicas. Para tanto, foram utilizados os dados do trabalho de Barros Filho et al. (2005). Resumidamente, três doses de P foram aplicadas em Latossolos com teores de argila entre 13 e 81 % e capacidade máxima de adsorção de P entre 399 e 1172 mg kg⁻¹. Após a aplicação dos tratamentos, realizados com o propósito de alterar o *status* de P de cada solo, foram determinadas as isotermas de sorção e dessorção de P. A dessorção de P foi realizada por meio de extrações sequenciais com membranas de troca aniônica.

Modificações no modelo

A possibilidade de alteração de parâmetros de solo e planta em modelos de equilíbrio dinâmico tem sido explorada de diferentes maneiras (YANAI, 1994; MENDHAM et al., 1997; MENDHAM, 1998; CROPPER JR. & COMERFORD, 2005). Nesse trabalho, foram realizadas modificações no código da versão Python do modelo SSAND, para incluir procedimentos que permitem variar o densidade radicular, a umidade do solo e o influxo de água nas raízes das plantas, a partir da interpolação linear de dados fornecidos pelo usuário. Essa abordagem é similar à adotada por CROPPER Jr. &

COMERFORD (2005) para simulação do efeito de variações temporais da densidade radicular de plantas de pinus e grama. Logo, o usuário fornece os valores de densidade radicular, umidade e influxo de água na raiz, em uma sequência ordenada cronologicamente, e o modelo interpola os valores não fornecidos, considerando o intervalo de tempo escolhido para a simulação, que pode ser de até 1 segundo.

Avaliação do modelo quanto às estimativas da aquisição de P por plantas de eucalipto

Para avaliar a performance do modelo foram utilizados os dados de experimento com P, em casa de vegetação, apresentados no trabalho de Silva (2000). Sinteticamente, o experimento foi conduzido com *Eucalyptus camaldulensis*, semeado em dois solos, um Latossolo Vermelho de textura argilosa (LV) e um Latossolo Amarelo de textura franco-arenosa (LVA). Esses solos foram compactados de modo a estabelecer diferentes valores de densidade (0,91; 1,1; 1,3 e 1,35 g/cm³ para o LV e 1,35; 1,55 e 1,75 g/cm³, para o LVA). Foram também aplicadas doses crescentes de P (0, 150, 300 e 600 mg kg⁻¹ no LV e 0, 100, 200, 400 mg kg⁻¹ no LVA). As plantas foram colhidas 100 dias após sua emergência.

As variáveis utilizadas para simulação foram: densidade e umidade do solo, densidade radicular, raio médio das raízes, valores dos parâmetros das isotermas de adsorção de P. As doses de P, aplicadas no volume total do vaso, foram consideradas para simulação das fertilizações realizadas. Os valores iniciais de P na solução do solo e os valores de k_d (coeficiente de distribuição) das isotermas de dessorção de P, não determinados por Silva (2000), foram estimados, por meio das funções descritas no item anterior.

As constantes cinéticas do modelo de Michaelis-Menten foram extraídas do trabalho de Pinto (2009), sendo considerados os valores de I_{max}^2 e K_m^3 obtidos para *E. camaldulensis* x *E. urophylla*. Esse híbrido foi considerado por ser o genótipo mais próximo ao utilizado no trabalho de Silva (2000)

² Parâmetro da equação de Michaelis-Menten que indica o máximo influxo do nutriente na raiz.

³ Parâmetro da equação de Michaelis-Menten relativo à concentração do nutriente em solução associada à 50 % do valor de I_{max} .

encontrado na literatura. Admitiu-se $C_{min} = 0 \text{ mg L}^{-1}$, conforme também adotado em outros trabalhos (MENDHAM et al., 1997; MENDHAM, 1998), dado o baixo valor desse parâmetro para P. Os valores utilizados nas simulações são apresentados na tabela 1 do apêndice desse trabalho.

As estimativas dos modelos foram comparadas aos valores observados. Para tanto, foram estimados o erro absoluto médio (EAM - Eq.1), a raiz quadrada do erro quadrático médio (RQEQM - Eq. 2), o BIAS (Eq. 3) e o coeficiente de correlação (Eq. 4) entre a absorção de P estimada e o conteúdo total desse nutriente determinado nas plantas.

$$EAM = \frac{\sum_i^N |Pi - Oi|}{n} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$BIAS = \frac{\sum_i^N (Pi - Oi)}{n} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$RQEQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Pi - Oi)^2}{n}} \quad (\text{Eq. 3})$$

$$r = \frac{cov(Oi, Pi)}{\sqrt{s^2(Oi)s^2(Pi)}} \quad (\text{Eq. 4})$$

sendo :

Pi - Valor estimado

Oi - Valor observado

n - Número de observações

cov. - covariância

s^2 - Variância

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa do teor de P em solução

Um modelo de regressão não linear múltipla foi ajustado para predição da concentração de P na solução do solo a partir de seu teor extraído em Mehlich-1 e do teor de argila (figura 1).

$$\hat{y} = 0,04489 \text{ PM } e^{-0,055342 \text{ arg}} \quad R^2 = 0,73$$

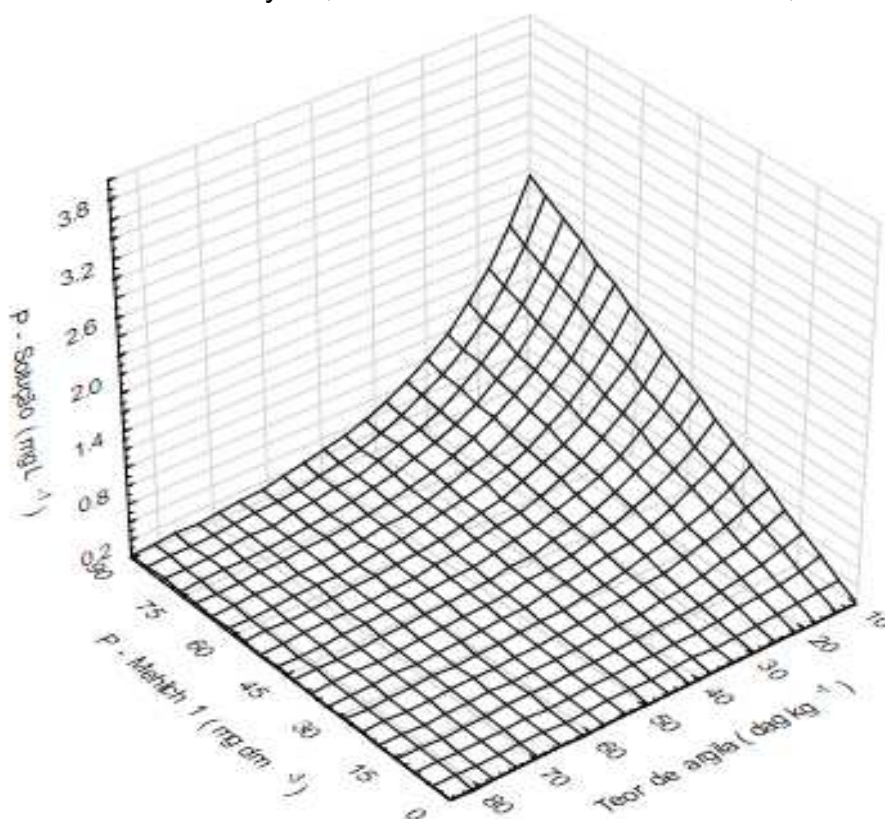


Figura 1 - Superfície de resposta para teor de P na solução do solo (mg L⁻¹) em função do P extraído em Mehlich 1 (mg dm⁻³) e do teor de argila do solo (dag kg⁻¹). PM = P extraído em Mehlich arg = teor de argila no solo. Todos os parâmetros foram significativos pelo teste "t" ($P < 0,01$).

O relacionamento obtido reflete, fundamentalmente, as interações entre os fatores quantidade e capacidade de P no solo, que controlam sua atividade em solução (fator intensidade). Com base nessa abordagem, o M-1, que é o

índice de disponibilidade de P mais adotado pelos laboratórios de rotina no Brasil, é utilizado como um indicador do P-lábil^{4,5}. O teor de argila, por sua vez, é adotado como indicador do fator capacidade de P, pela forte influência dessa fração textural nas reações de sorção desse elemento no solo, que controlam sua solubilidade. Além disso, trata-se de determinação amplamente difundida no país, sendo adotada em todos os estados na análise textural de rotina. É importante considerar também a sensibilidade do M-1 ao fator capacidade do solo, dado o efeito de desgaste desse extrator (NOVAIS & SMYTH, 1999). Assim, a inclusão do teor de argila é também importante para que o M-1 seja uma referência mais adequada do P-lábil, além de sua função como indicador do fator capacidade do solo.

A obtenção dos teores de P em solução a partir de seu valor extraído em M-1, ou por meio de outros métodos adotados em procedimentos de rotina, foi também proposta em outros trabalhos (NEVES, 2000; HUE & FOX, 2010). No entanto, alguns deles não consideram em suas equações a influência do fator capacidade (HUE & FOX, 2010) ou adotaram procedimentos mais laboriosos (NEVES, 2000). No primeiro caso, quando adotado um extrator de maior sensibilidade ao fator capacidade do solo, é aconselhável agrupar solos com características semelhantes, conforme apresentado na figura 2, elaborada com os dados desse trabalho.

⁴ O P-lábil representa o contínuo de formas de P em equilíbrio com a solução do solo - fator Quantidade.

⁵ "O fator Quantidade envolve, para fins práticos, a soma da concentração do elemento, teoricamente considerado fator quantidade (Q) mais sua concentração na solução (I). A separação das duas formas, para obtenção do valor de Q, não se justifica, uma vez que a concentração de P em solução é, de modo geral, extremamente menor que a de Q, não alterando, para o nível de precisão da determinação o valor de Q obtido." (Novais & Smith, 1999)

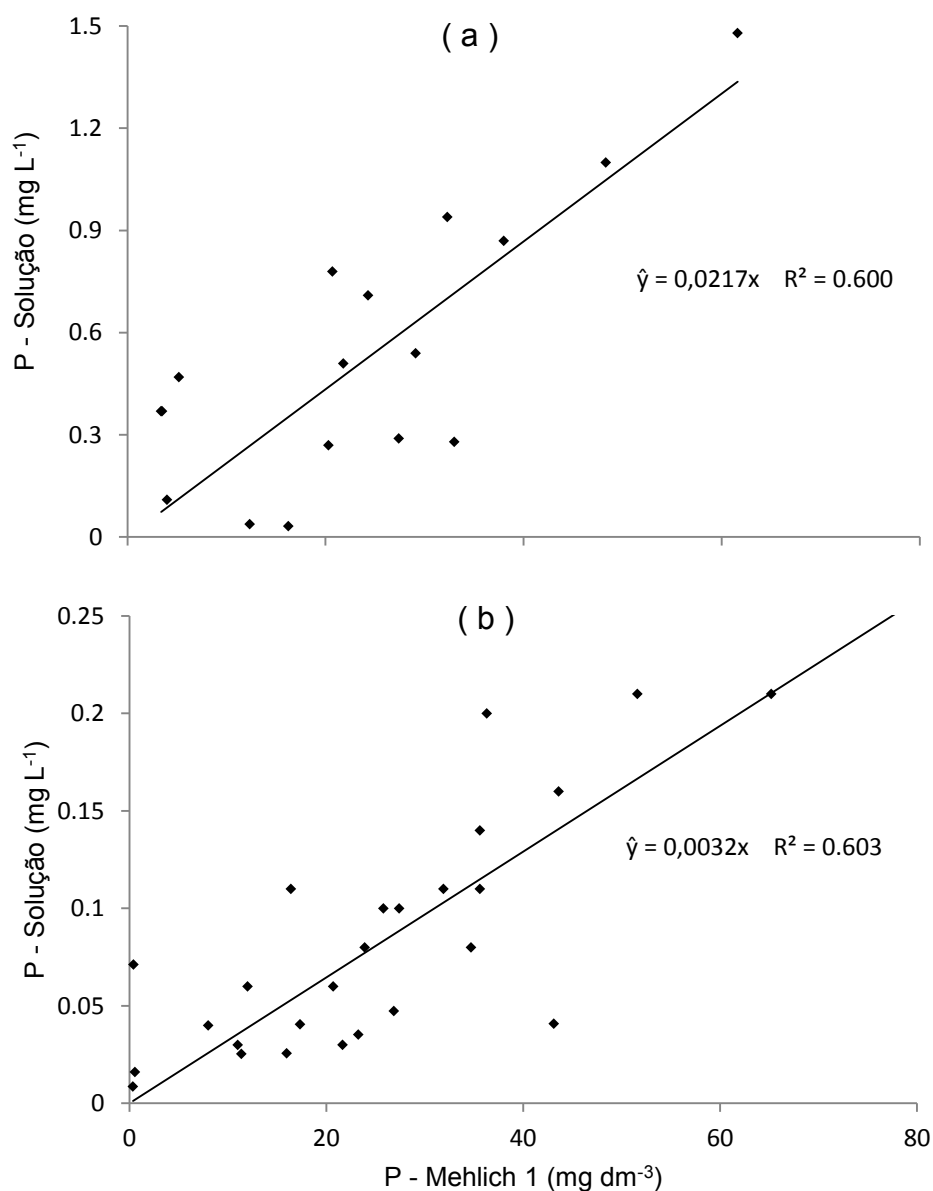


Figura 2 - Teor de P na solução do solo (mg L⁻¹) em função do P extraído em Mehlich 1 (mg dm⁻³) para solos de textura franca ou arenosa (a) e para solos de textura argilosa (b). PM = P extraído em Mehlich. Os parâmetros foram significativos pelo teste "t" ($P < 0,01$).

Predição da dessorção de P

A dessorção de P é processo chave para determinação da biodisponibilidade desse nutriente (SATO & COMEFORD, 2006). Sua cinética é descrita por meio de isotermas que relacionam a quantidade do nutriente na

fase sólida do solo com sua concentração na solução. De modo semelhante e com maior frequência, isotermas são também utilizadas para representar a sorção desse nutriente. A inclinação das isotermas de sorção e dessorção determina o coeficiente de distribuição ou de partição, k_d (SATO & COMERFORD, 2006), que é utilizado nos modelos de simulação do transporte de nutrientes no solo (VAN REES et al., 1990; BARBER, 1995; TINKER & NYE, 2000). Todavia, ao contrário das isotermas de sorção, há poucos trabalhos que tratam da cinética de dessorção de P. Além disso, os métodos para sua determinação são ainda pouco padronizados e apesar do progresso no desenvolvimento de novas técnicas (SATO & COMERFORD, 2006), muitas delas são laboriosas e requerem muito tempo para a obtenção de resultados.

Foi possível estabelecer um modelo de regressão para relacionar esses dois coeficientes (K_d de sorção e de dessorção) em solos tropicais brasileiros, do bioma Cerrado, com diferentes características físico-químicas (Figura 3). A transformação logaritímica usada decorre do relacionamento curvilíneo entre o K_d de dessorção e o de sorção, devido à histerese entre essas isotermas.

O relacionamento obtido pode ser atribuído ao fato de que as características do solo que determinam os processos de sorção de P estão também associadas à sua dessorção, vez que ambos os processos são produto do equilíbrio entre a fase sólida e a solução do solo ou, analogamente, entre os fatores quantidade e intensidade desse nutriente no sistema.

No trabalho de Barros Filho et al. (2005), os autores desenvolveram uma função de pedotransferência para predição das isotermas de sorção de P, a partir do teor de argila. A equação aqui apresentada é um importante complemento para o trabalho anterior, tendo em vista o desenvolvimento de equações simples para utilização em modelagem, entre outras aplicações.

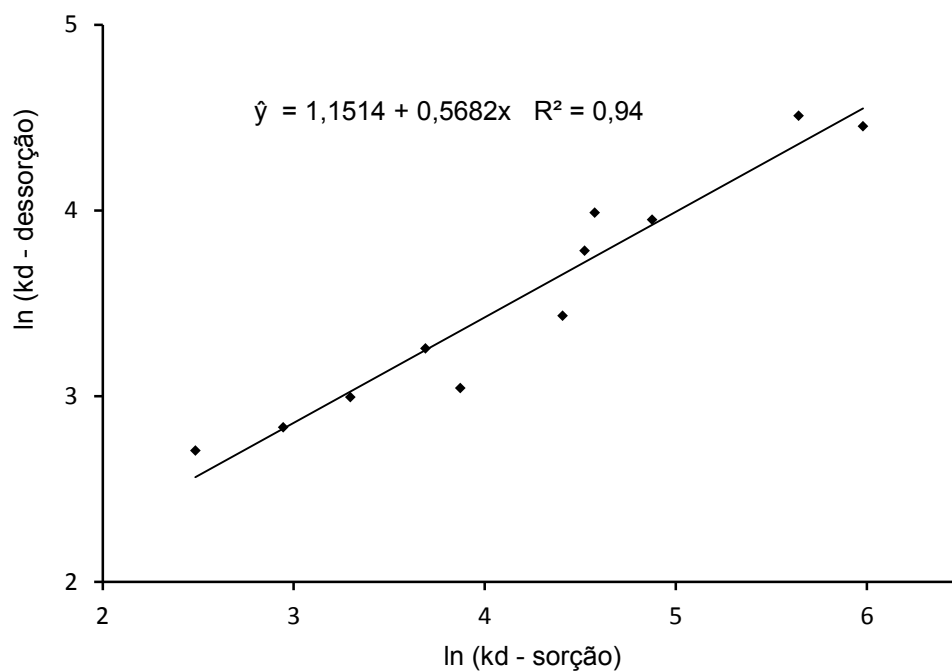


Figura 3 - Estimativa do coeficiente de distribuição (kd) de P para predição da dessorção desse nutriente a partir de isotemas de sorção obtidas em solos tropicais com diferentes características físico-químicas.

¹ Regressão obtida a partir dos dados de Barros Filho et al. (2005); Os coeficientes foram significativos pelo teste "t" ($P < 0,01$).

Modificações realizadas no modelo

Os procedimentos adotados nesse trabalho para variação dos parâmetros de solo e planta permitiram a realização de simulações dinâmicas da aquisição de P, no que se refere ao efeito de variações no crescimento radicular, da condição hídrica do solo e do influxo de água nas raízes. Nas figuras 4, 5 e 6, são ilustrados os resultados de algumas simulações da absorção de P por plantas de eucalipto cultivadas em vaso, considerando alguns cenários, com alterações nessas variáveis de entrada do modelo ao longo do tempo.

Observou-se maior efeito do crescimento radicular e da densidade do solo sobre os valores de P absorvido, o que é coerente com a dinâmica desse nutriente no sistema solo-planta e foi também constatado em análises de sensibilidade realizadas em outros trabalhos em que, no entanto, estas

variações não foram realizadas ao longo do tempo (SMETHURST & COMERFORD, 1993; COMERFORD et al., 2006).

O aumento da superfície de raízes está associado à maior absorção de todos os nutrientes pelas plantas, com importância particular para aqueles de menor mobilidade no solo, como o P. Espera-se também grande influência da disponibilidade hídrica sobre o transporte e a absorção desses solutos pelas plantas, especialmente para nutrientes cujo transporte no solo se dá predominantemente por difusão, dada a baixa atividade de suas formas disponíveis na solução do solo, como também é o caso do P.

Embora o influxo de água nas raízes esteja muitas vezes correlacionado à disponibilidade hídrica no solo, essa variável exerce menor influência direta sobre a aquisição de P e tem maior importância para nutrientes em que o fluxo de massa é o mecanismo de transporte predominante em condições normais, como o N. Assim, apesar de ser menos importante para a aquisição de P, um melhor tratamento dessa variável deverá contribuir para a modelagem da aquisição de outros nutrientes, uma vez que o SSAND é um modelo geral. De todo modo, é importante reiterar a ampliação do efeito da umidade do solo quando consideradas variações simultâneas no influxo de água nas raízes, efeito esse que pode ser importante, a depender do escopo do trabalho e do grau de aproximação desejado para as simulações.

As modificações aqui propostas facilitam a utilização do modelo SSAND em condições de campo, posto que, nessas condições, os parâmetros avaliados, de forma geral, não são controlados e muitas vezes é difícil estabelecer um padrão de crescimento radicular.

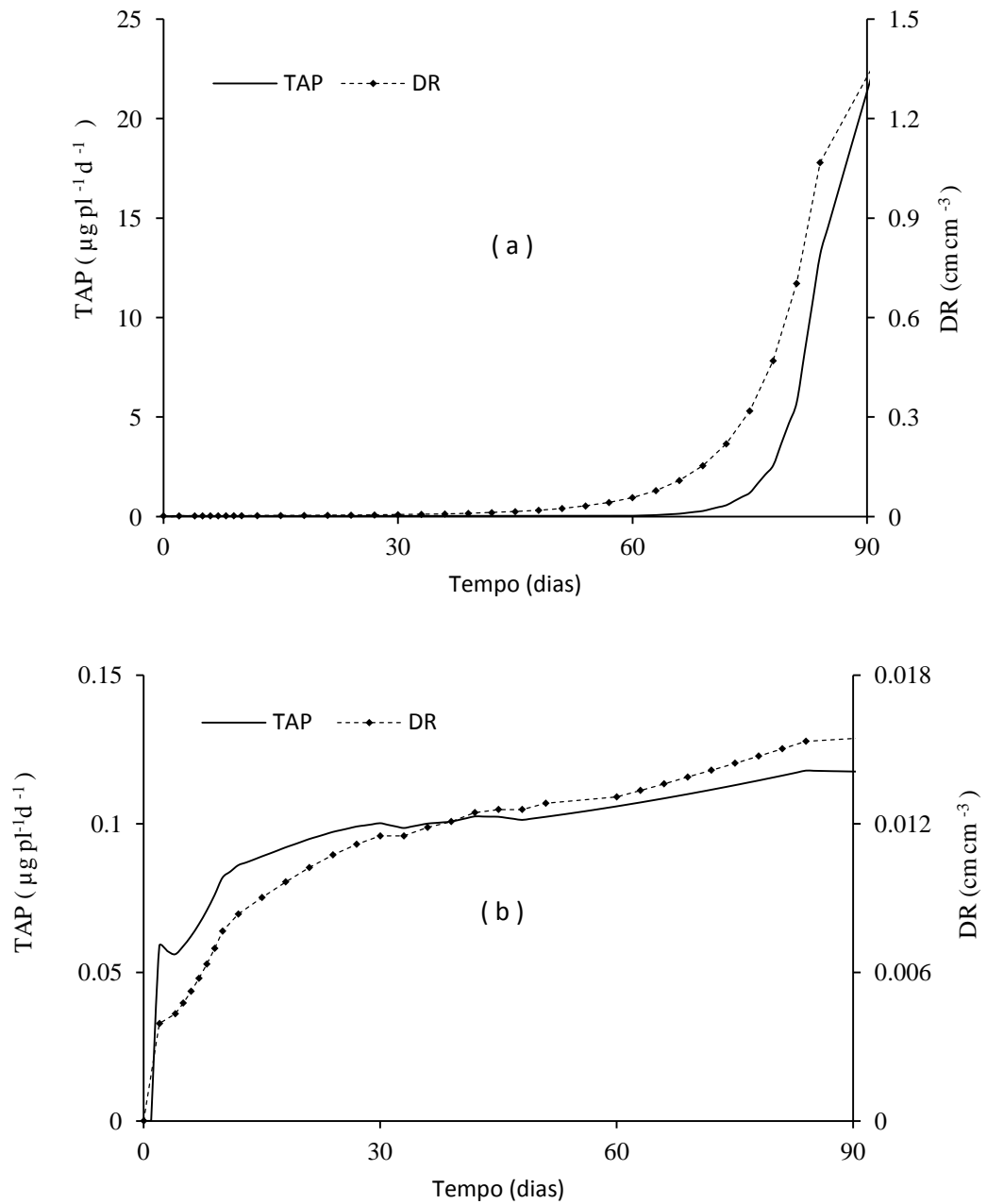


Figura 4 - Absorção de P por plantas de eucalipto com diferentes padrões de crescimento radicular (cenários a e b). TAP = taxa de absorção de fósforo; DR = Densidade Radicular

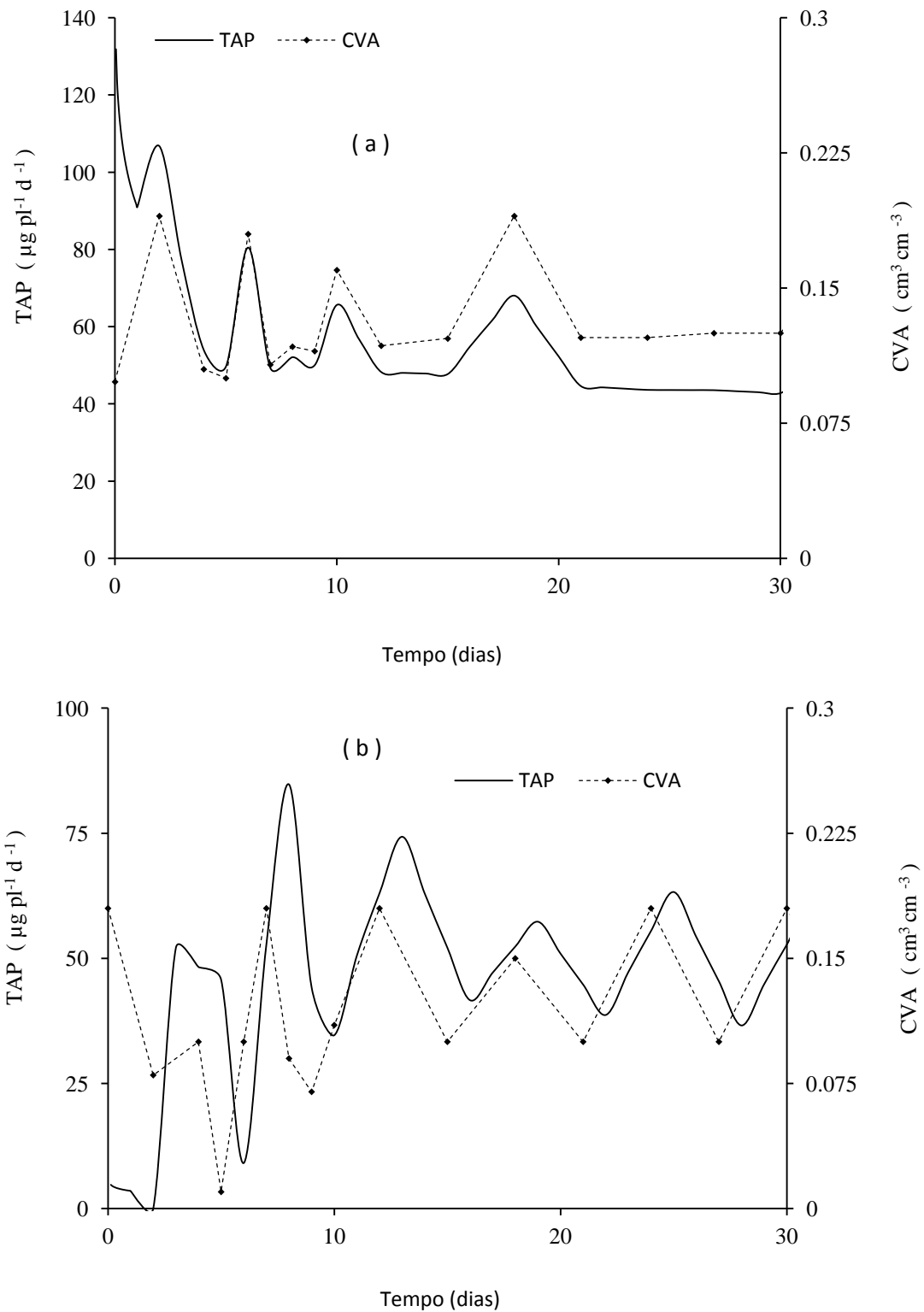


Figura 5 - Absorção de P por plantas de eucalipto em diferentes condições de umidade do solo (cenários a e b). TAP = taxa de absorção de fósforo; CVA = conteúdo volumétrico de água no solo

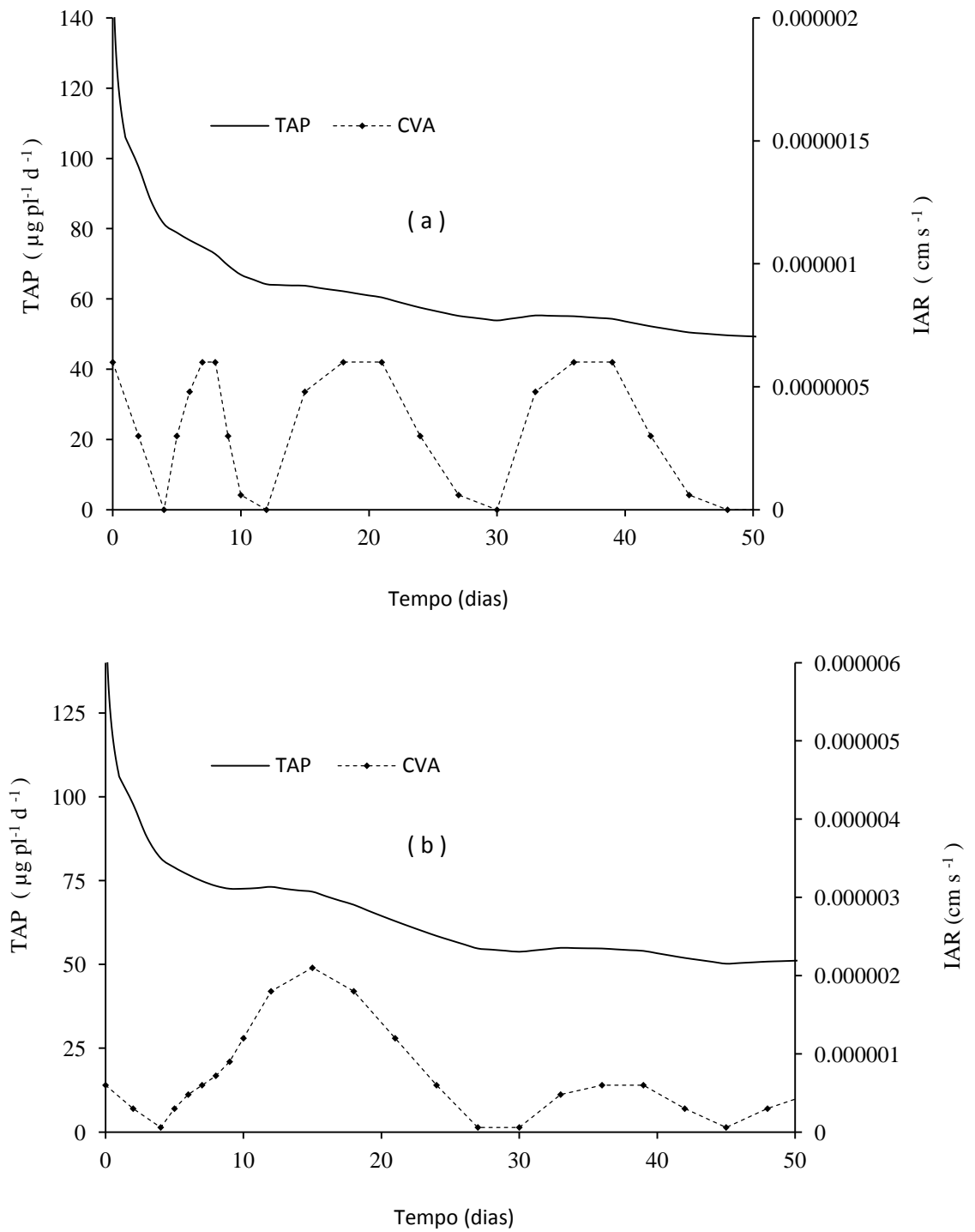


Figura 6 - Absorção de P por plantas de eucalipto em diferentes condições de influxo de água nas raízes (cenários a e b). TAP = taxa de absorção de fósforo; IAR = influxo de água na raiz.

AVALIAÇÃO DA MODELAGEM PROPOSTA

De modo geral, os modelos de aquisição de P têm subestimado a absorção desse nutriente pelas plantas, principalmente em solos pobres nesse nutriente (ERNANI et al., 1994). Isso tem sido atribuído à presença de micorrizas, à uma abordagem inadequada à morfologia das raízes, acidificação da rizosfera, dentre outros processos que podem alterar a aquisição de P pelas plantas e muitas vezes não são considerados pelos modelos (HINSINGER et al., 2011; SILBERBUSH et al., 2013).

Nesse trabalho houve concordância entre os valores estimados por meio do modelo e os efetivamente medidos (Figura 7 e Tabela 1). Assim, foi possível prever o efeito de alterações em características de solo, como sua densidade, diferenças no fator capacidade e de fertilizações com P, sobre a aquisição desse nutriente por plantas de eucalipto. Esses resultados validam as estratégias de modelagem empregadas nesse trabalho.

Simulações bem sucedidas que, no entanto, não empregaram as modificações aqui propostas, foram também obtidas com o modelo COMP8, do qual derivou o SSAND, para pinus e milho na Austrália (SMETHURST et al., 1993; MENDHAM et al., 1997). No entanto, em ensaios com eucalipto, Mendham (1998) não obteve resultados tão acurados, embora os valores preditos pelo modelo tenham se correlacionado aos observados.

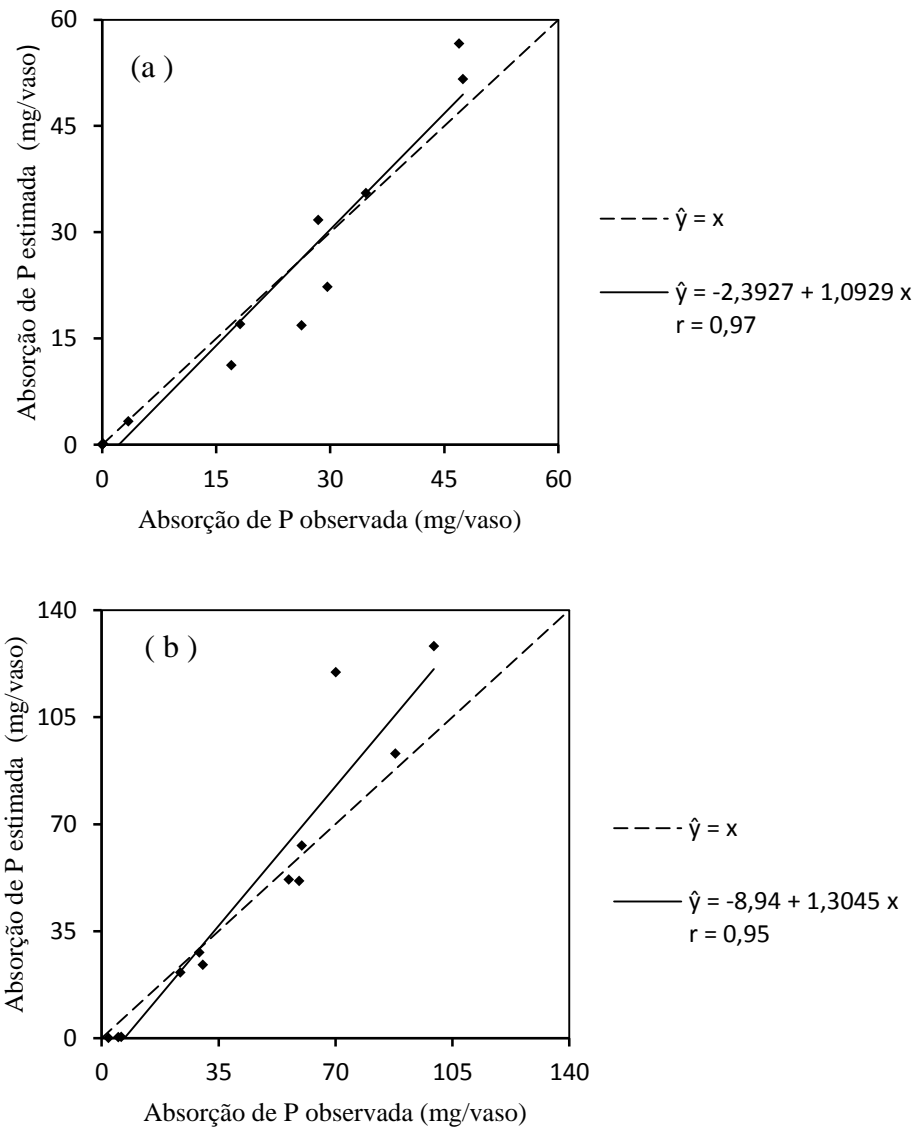


Figura 7 - Comparação dos valores estimados pelo modelo SSAND com os observados experimentalmente em Latossolo Vermelho de textura argilosa (a) e Latossolo Vermelho Amarelo de textura franco arenosa (b).

Tabela 1 - Métricas para avaliação da performance dos modelos

SOLO	RREQM (%)	EAM (%)	BIAS (%)
Latossolo Vermelho	23,74	16,59	-2,10
Latossolo Vermelho Amarelo	38,84	22,71	10,14

CONCLUSÕES

As modificações e as funções de pedotransferência desenvolvidas neste trabalho facilitam a obtenção de parâmetros do modelo SSAND e conferem um caráter mais dinâmico à modelagem da aquisição de P

O coeficiente de distribuição (k_d) das isotermas de dessorção de P pode ser predito a partir do k_d de sorção.

O teor de P na solução do solo pode ser predito a partir dos teores de argila e de P extraído em Mehlich-1, conforme a função de pedotransferência proposta nesse trabalho.

A modelagem proposta permite estimar a aquisição de P por plantas de eucalipto em solos tropicais.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, F. 1974. Soil Solution. In: CARSON, E.W., ed. **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia. Cap. 19, p.441-485.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**, 2. ed. New York: Wiley, 1995. 414p.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; TEIXEIRA, J.J.; FERNANDES FILHO, E.I. Nutricalc 2.0 - sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**,16:129-131, 1995
- BARROS FILHO, N. F. ; COMERFORD, N. B. ; BARROS, N. F.. Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of the brazilian cerrado supporting Eucalypt. **Biomass & Bioenergy**, 28: 229-236, 2005.
- BAVEYE, B. C. Looming Scarcity of Phosphate Rock and Intensification of Soil Phosphorus Research. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 39:637-642, 2015
- COMERFORD, N.B.; CROPPER, W.P.J.; HUA, L.; SMETHURST, P.J.; VAN REES, K.C.J.; JOKELA, E.J.; ADÉGBIDI, H.; BARROS, N.F. Soil supply and nutrient demand (SSAND): a general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. **Canadian Journal of Soil Science**, 86: 655–673, 2006.
- CROPPER JR., W. P., & COMERFORD, N. B. Optimizing simulated fertilizer additions using a genetic algorithm with a nutrient uptake model. **Ecological Modeling**, 185: 271–281, 2005.
- ERNANI, P.R., SANTOS, J.C.P., KAMINSKI, J., RHEINHEIMER, D.S. Prediction of phosphorus uptake by a mechanistic model in a low phosphorus highly weathered soil as affected by mycorrhizae inoculation. **Journal of Plant Nutrition**, 17:1067–1078, 1994.

FINK, J. R. **Dinâmica de minerais pedogênicos e adsorção de fósforo em solos sob distintos usos e manejos.** Porto Alegre: Centro de Ciências Rurais - UFRGS, 57 p. 2012. (dissertação de mestrado).

FRANCISCO, E. A. B. ; CUNHA, J.F.; ; PROCHNOW, L. I. ; CASARIN, V. . A Look at the Nutrient Budget for Brazilian Agriculture. **Better Crops with Plant Food**, 2: 4-6, 2015.

GILLMAN, G.P. **A centrifuge method for obtaining soil solution.** Austrália, CISRO, 1976. 6p. (Dv. Soils Rep., 16).

HINSINGER, P.; BRAUMAN, A.; DEVAU, N.; GÉRARD, F.; JOURDAN, C.; LACLAU, J.; LE CADRE, E.; JAILLARD, B.; PLASSARD, C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? **Plant and Soil**, 348:29–61, 2011

HUE, N.V. & FOX R. Predicting plant phosphorus requirements for Hawaii soils using a combination of phosphorus sorption isotherms and chemical extraction methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 41: 133-143, 2010.

JASINSKI SM. **PHOSPHATE ROCK. U.S.** Geological survey, minerals commodity summaries; 2015 [ACESSO EM AGOSTO DE 2015]. Disponível em: http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/phosphate_rock/mcs-2015-phosp.pdf

MARCOLAN, A. L. **Suprimento e absorção de fósforo em solos submetidos a diferentes sistemas de preparo.** Porto Alegre: Centro de Ciências Rurais - UFRGS, 106 p. 2006. (tese de doutorado).

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants.** 3.ed. San Diego: Academic Press, 2012. 672p.

MENDHAM, D.S.; SMETHURST, P.J.; MOODY, P.W.; AITKEN, R.L. Modelling nutrient uptake: a possible indicator of phosphorus deficiency. **Australian Journal of Soil Research**, 35, p. 313–326, 1997.

MENDHAM, D.S., **Predicting Phosphorus Limitations in Eucalyptus Plantations**. Universidade da Tasmânia, Hobart, Australia, 248 p. 1998. (tese de doutorado).

MIRANDA, J.; COSTA, L.M.; RUIZ, H.A. & MENDONÇA, E.M. Caracterização química de soluções extraídas de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob diferentes cobertura vegetais. **Revista Ceres**, 43:139-146, 1996.

NEVES, J.C.L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e hídricos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo**. Campos dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 191p. 2000. (Tese de Doutorado)

NOURA ZIADI, J. K.; WHALEN, A. J. & MESSIGA, C. M. **Assessment and modeling of soil available phosphorus in sustainable cropping systems**. In.: SPARKS, D.L.: *Advances in Agronomy*, v.122, Burlington, Academic Press, 2013, p. 85-126.

NOLLA, A. **Critérios para a calagem no sistema plantio direto**. Porto Alegre - RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, 169 p. 2003. (Tese de Doutorado).

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NYE, P.H. & TINKER, P.B. **Solute movement in the soil-root system**. Berkeley: University of California Press, 1977. 342p.

PINTO, S.I.C. **Cinética de absorção conjunta de Fósforo, Potássio, Cálcio e Magnésio e eficiência nutricional de macronutrientes de clones de**

Eucalipto. Lavras - MG, Universidade Federal de Lavras, UFLA, 102 p. 2009. (dissertação de mestrado)

SATO, S.; COMERFORD, N. B. Assessing methods for developing phosphorus desorption isotherms using anion exchange membranes. **Plant and Soil**, 279: 107-117, 2006.

SCHACHTMAN, D.P.; REID R.J.; AYLING SM. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, 116: 447–453, 1998.

SCHNUG E, LOTTERMOSER BG. Fertilizer-derived uranium and its threat to human health. **Environ Science and Technology**, 47:2433-4, 2013.

SILBERUSH, M.; ESHEL, A.; LYNCH, J.P. **Nutrient Uptake and Root System Architecture Modeling: Past and Prospects for the Future.** In.: Eshel, Amram; Beeckman, Tom, Apr 17, 2013, Plant Roots : The Hidden Half, 4. ed. p.26.1 - 26.14 .

SILVA, S.R. **Crescimento de eucalipto influenciado pela compactação de solos e doses de fósforo e de potássio.** Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 97 p. 2000. (dissertação de mestrado)

SYERS, J.K.; JOHNSTON, A.E.; CURTIN, D. **Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. Reconciling changing concepts of soil phosphorus behaviour with agronomic information.** FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin no. 18. Rome, Italy: FAO, 2008.

SMITH, F. W. The phosphate uptake mechanism. **Plant and Soil**, 245: 105–114, 2002.

SMETHURST, P. J.; COMERFORD, N. B. Simulating nutrient uptake by single or competing and contrasting root systems. **Soil Science Society of American Journal**, 57: 1361-1367, 1993.

SMETHURST, P. J.; COMERFORD, N. B. Potassium and phosphorus uptake by competing pine and grass: Observations and model verification. **Soil Science Society of American Journal**, 57: 1602-1610, 1993.

SMETHURST, P. J., COMERFORD, N. B. AND NEARY, D. G. Predicting the effects of weeds on K and P uptake by young slash pine on a Spodosol. **Forest Ecology and Management**, 60: 27–39, 1993.

TINKER, P.B. & NYE, P.H. **Solute movement in the rhizosphere**. New York: Oxford University Press, 2000. 444p.

VAN REES, K.C.J, COMERFORD, N. B.; RAO, P.S.C. Defining soil buffer power: implications for ion diffusion and nutrient uptake modeling. **Soil Science Society of American Journal**, 54: 1505-1507, 1990.

VARGAS, R. M. B. **Mecanismos de suprimento de K, Ca, Mg e P às raízes de milho em solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 93p. 1982. (tese doutorado)

VENEKLAAS EJ, LAMBERS H, BRAGG J, et al. Opportunities for improving phosphorus-use efficiency in crop plants. **New Phytologist**, 195:306-320, 2012.

YANAI, R. D. A steady-state model of nutrient uptake accounting for newly grown roots. **Soil Science Society of America Journal**, 58: 1562–1571, 1994.

CAPÍTULO 2

MODELAGEM DA EFICIÊNCIA NUTRICIONAL E ALOCAÇÃO DE NUTRIENTES EM PLANTIOS DE EUCALIPTO

Resumo: Diferentemente da maioria das culturas cultivadas, as recomendações de corretivos e fertilizantes para povoamentos comerciais de eucalipto no Brasil são realizadas com base em modelos de balanço nutricional. Para a estimativa da demanda nutricional dos cultivos, uma das informações de importância central requeridas por esses modelos é a eficiência de uso de cada nutriente. A alocação de nutrientes nas diferentes partes da planta é também uma variável muito importante e é utilizada para o cálculo da exportação e retorno de nutrientes para o solo. Esse trabalho foi realizado com o objetivo de formular e avaliar modelos para predição da eficiência de uso e alocação de N, P e K em plantios equidistantes de eucalipto no Brasil. Foram sistematizados dados de experimentos de campo e de plantios comerciais com plantas do gênero *Eucalyptus*, abrangendo as regiões sul, sudeste, centro-oeste e norte do país. O banco de dados obtido, contendo valores de biomassa e conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas, foi utilizado para calcular o coeficiente de utilização biológica (CUB) e a alocação (CA) de cada um desses três nutrientes estudados. Foram ajustados modelos sigmóides para predição dos valores de CUB e CA em função da idade, de variáveis de solo, clima e da densidade de plantio. As equações ajustadas mostraram-se adequadas para a predição do CUB e CA em povoamentos de eucalipto no Brasil.

Palavras - chave: *Eucalyptus spp.*, nitrogênio, fósforo, potássio.

Modeling nutrient use efficiency and allocation in eucalyptus plantations

Abstract: Unlike most cultivated crops, liming and fertilizer recommendations for commercial eucalyptus plantations in Brazil are based on a nutrient budget model. Nutrient use efficiency and allocation are key variables needed to estimate nutrient dynamics using this model. This work was carried out to formulate and evaluate equations to estimate N, P and K use efficiency by eucalyptus plantations in Brazil. Data from field trials and commercial plantations of eucalyptus distributed throughout the southern, southeastern, central-west and north regions of Brazil were organized. The resulting database was used to calculate nutrient use efficiency (NUE) from measurements of biomass and nitrogen, phosphorus and potassium content in shoots. Allocation of nutrients to the trunk and crown was also calculated. Sigmoidal models were adjusted for predicting NUE and nutrient allocation (NA) based on age, soil variables, climate and planting density. The adjusted equations were suitable for predicting NUE and NA in Brazilian eucalyptus plantations.

Keywords: *Eucalyptus spp.*, nitrogen, phosphorus, potassium.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios do setor de florestas plantadas no Brasil nos últimos anos tem sido manter sua competitividade no cenário internacional, em função, dentre outros fatores, do aumento progressivo dos custos de produção (ABRAF, 2013), que tem reduzido a rentabilidade dos produtos brasileiros frente a seus principais concorrentes (ABRAF, 2013; COLODETTE et al., 2014). É necessário, portanto, otimizar os processos produtivos existentes, bem como incentivar novas práticas para o aprimoramento dos atuais sistemas de produção.

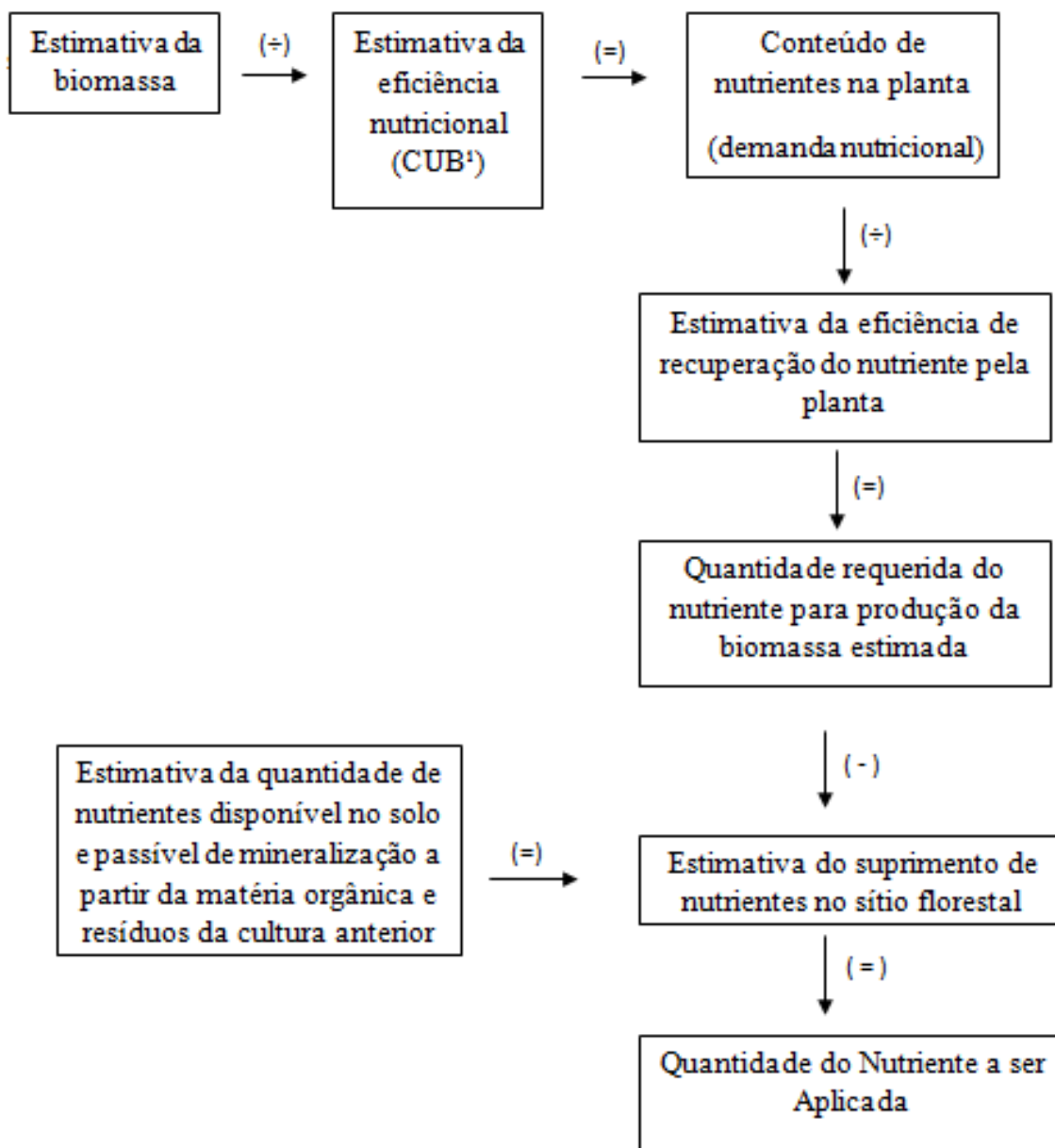
Os povoamentos de eucalipto ocupam 72 % das áreas cultivadas com espécies florestais no Brasil (IBA, 2014). A taxa de crescimento desses povoamentos é relativamente alta, em parte devido ao manejo nutricional, dada a baixa capacidade natural de suprimento de nutrientes pela maioria dos solos destinados a esses cultivos (BARROS & COMERFORD, 2002; GONÇALVES et al., 2013; CHRISTINA et al., 2015).

As fertilizações para a cultura do eucalipto no país são realizadas, de modo geral, com base em modelagem de balanço nutricional (BARROS et al., 1995) (Figura 1). O emprego desses modelos tem viabilizado o uso mais eficiente de recursos associados, direta ou indiretamente, às fertilizações dos plantios, além de motivar o desenvolvimento de ferramentas semelhantes para outras culturas (OLIVEIRA et al., 2005; SANTOS et al., 2008; SILVA et al., 2009).

Desde o desenvolvimento do primeiro sistema de balanço nutricional (BARROS et al., 1995), foram realizados diversos trabalhos com o propósito de estimar a eficiência nutricional e a alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto em diferentes condições de cultivo no Brasil. Essas variáveis são necessárias para o cálculo da demanda nutricional das plantas, da exportação e do retorno de nutrientes para o solo ao longo da rotação (GAMA-RODRIGUES et al., 2008; FARIA et al., 2008; LEITE et al., 2011).

As informações dos estudos já realizados podem hoje ser utilizadas para geração de equações para predição do comportamento nutricional dos povoamentos. Tais equações, podem ser utilizadas para aprimorar a modelagem de balanço nutricional, bem como de outros modelos de simulação que dependam dessas variáveis, o que é de grande utilidade prática. Essas

ferramentas permitem ainda melhorar o entendimento sobre a dinâmica de nutrientes em plantios de eucalipto. Por isso, esse trabalho foi realizado com o objetivo de formular e avaliar modelos para predição da eficiência de uso e alocação de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil.



¹ CUB = Coeficiente de Utilização Biológica

Figura 1 - Fluxograma simplificado de um modelo de balanço nutricional para culturas florestais (adaptado de Prezotti, 2001)

MATERIAL E MÉTODOS

Foram sistematizados dados de experimentos de campo e de plantios comerciais com plantas do gênero *Eucalyptus* em 23 municípios brasileiros, abrangendo as regiões sul, sudeste, centro-oeste e norte do país, sendo a maioria das observações na região sudeste, onde concentram-se os plantios comerciais e estudos com essa cultura. Os dados foram obtidos a partir de levantamentos na literatura, complementados com resultados de experimentos realizados pelo núcleo de estudos e projetos multidisciplinares relacionados à nutrição e solos florestais (NUTREE). As informações coletadas contemplam valores de biomassa e conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio nos componentes da parte aérea das plantas, bem como características dos povoamentos florestais (genótipo, idade do plantio, espaçamento, características de solo e clima).

A partir dos dados de biomassa e do conteúdo de nutrientes na parte aérea das plantas (CT), foi calculado o coeficiente de utilização biológica – CUB (massa de matéria seca da parte aérea / conteúdo de nutrientes na parte aérea)⁶. Esse índice tem importância central na modelagem da demanda nutricional para recomendação de corretivos e fertilizantes com base em balanço nutricional para o eucalipto (BARROS et al., 1995). Foram também calculados coeficientes de partição (CP) para cada um dos três nutrientes, dividindo-se o conteúdo do nutriente em cada componente da parte aérea pelo conteúdo total. Em seguida, o banco de dados foi aleatoriamente dividido em dois grupos. O primeiro, com 80% dos dados, foi utilizado para construção e ajuste dos modelos. O restante dos dados foi utilizado para validação dos modelos gerados.

Foram ajustados modelos de regressão não linear múltipla para predição do CUB e partição de N, P e K na parte aérea das plantas, em função de variáveis de solo (argila), clima (precipitação), planta (idade), além da área útil por planta. Foi também utilizada a massa de matéria seca da parte aérea para

⁶ Uma descrição resumida do banco de dados utilizado é apresentada na tabela 1 do apêndice desse trabalho.

as funções de partição. Os modelos foram ajustados utilizando o software Statistica 12.0 (STATSOFT INC., 2015).

Na etapa de validação da modelagem proposta, foram obtidas estimativas do CUB, CP e CT dos nutrientes estudados para o conjunto de validação. Os valores de CT foram calculados pela divisão da biomassa da parte aérea das plantas pelo CUB de cada nutriente nesse componente das plantas. Os valores estimados foram comparados com os observados por meio do erro absoluto médio (EAM), da raiz quadrada do erro quadrático médio (RQME) e do coeficiente de correlação (r) (Eq. 1 a 4), bem como pela análise gráfica dos valores observados e estimados.

$$EAM = \frac{\sum_i^N |Pi - Oi|}{n} \quad (Eq. 1)$$

$$BIAS = \frac{\sum_i^N (Pi - Oi)}{n} \quad (Eq. 2)$$

$$RQEQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N (Pi - Oi)^2}{n}} \quad (Eq. 3)$$

$$r = \frac{cov(Oi, Pi)}{\sqrt{s^2(Oi)s^2(Pi)}} \quad (Eq. 4)$$

sendo :

Pi - Valor estimado pelo modelo

Oi - Valor observado

n - Número de observações

cov. - covariância

s² - Variância

RESULTADOS

Ajuste dos modelos

Os modelos ajustados para estimar a eficiência nutricional e alocação de N, P e K foram do tipo logístico (Eq.5). Essas funções descrevem as alterações dos valores de CUB e da alocação de nutrientes com a idade da floresta. Uma vez que esse relacionamento pode ser alterado pelas características de cada sítio florestal, foram utilizadas variáveis adicionais para predição dos parâmetros do modelo. Assim, na estimativa do CUB, o parâmetro β_0 (Eq. 5), que para essa variável indica a eficiência nutricional máxima da cultura, foi maior nos locais com solos mais argilosos e com menor precipitação pluvial média (PPM), para N e P (Tabela 1). Para K, esse mesmo parâmetro foi menor à medida que aumentou a PPM. O fator de forma da função logística (β_2) foi função da área disponível por planta (espaçamento), tendo havido aumento mais acentuado da eficiência nutricional de N, P e K em povoamentos mais adensados.

$$CUB\ i\ ou\ CA\ i = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{\beta_2 t}} + \varepsilon \quad (Eq. 5)$$

$CUB\ i$: Coeficiente de Utilização Biológica do Nutriente i ,

$CA\ i$: Coeficiente de Alocação do Nutriente i ,

t = Idade do povoamento em meses,

β_0 , β_1 e β_2 : parâmetros,

ε = erro aleatório.

Tabela 1 - Equações para o coeficiente de utilização biológica na parte aérea de povoamentos de eucalipto no Brasil.

Nutriente	Equação	r	n
N	$\hat{y} = \frac{409,088 e^{(-\frac{28,276}{arg} + \frac{443,592}{ppm})}}{1 + 7,919 e^{[-0,086 + 0,00265 area] t}}$	0,818	191
P	$\hat{y} = \frac{3349,805 e^{(-\frac{35,101}{arg} + \frac{933,014}{ppm})}}{1 + 5,362 e^{[-0,069 + 0,0015 area] t}}$	0,880	205
K	$\hat{y} = \frac{1950 e^{(-\frac{914,291}{ppm})}}{1 + 9,246 e^{[-0,0802 + 0,00268 area] t}}$	0,825	168

arg - teor de argila na camada de 0 - 40 cm ($g\ kg^{-1}$); ppm - precipitação pluvial média anual da região (mm); area - área disponível por planta no povoamento (m^2); t - idade do povoamento (meses); todos os parâmetros foram significativos a 5% pelo teste "t", com exceção do coeficiente 0,0015, da equação de P, que foi significativo a 7 %.

Funções semelhantes foram ajustadas para predição da alocação de nutrientes nos componentes da parte aérea das plantas, adicionando-se a variável biomassa da parte aérea (BPA) para a estimativa do parâmetro β_1 (Tabelas 2 e 3). Essa variável não foi utilizada para estimativa do CUB por ser componente desse índice.

A alocação de nutrientes para o tronco, em detrimento aos demais componentes da parte aérea, foi maior em sítios mais produtivos, com maior PPM para N e P e maiores teores de argila para K.

Como exemplo e para melhor visualização das funções, a eficiência nutricional e partição de N, P e K foram estimadas para alguns cenários. No cálculo da partição, os coeficientes de partição foram multiplicados por 100, para transformação das proporções em valores decimais para valores percentuais. Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 2 a 7.

Tabela 2 – Equações para a alocação de nutrientes para o tronco de plantios de eucalipto no Brasil.

Nutriente	Equação	r	n
N	$\hat{y}_1 = \frac{0,1924 + 0,00198 \text{ mspa} + 0,000135 \text{ ppm}}{1 + 6,6714 e^{(-0,09638t)}}$	0,92	145
	$\hat{y}_2 = \frac{0,3874 + 0,00023 \text{ ppm}}{1 + 11,2123 e^{(-0,075t)}}$	0,87	145
P	$\hat{y}_1 = \frac{0,005744 + 0,001557 \text{ mspa} + 0,000297 \text{ ppm}}{1 + 3,3653 e^{[-15,8248 + 0,00584 \text{ area}] t}}$	0,89	145
	$\hat{y}_2 = \frac{0,112173 + 0,00042 \text{ ppm}}{1 + 3,884 e^{(-0,0575 t)}}$	0,85	145
K	$\hat{y}_1 = \frac{0,3251 + 0,001883 \text{ mspa} + 0,000182 \text{ arg}}{1 + 2,7842 e^{[-0,2452 + 0,01250 \text{ area}] t}}$	0,87	145
	$\hat{y}_2 = \frac{0,65158 + 0,000173 \text{ arg}}{1 + 2,2896 e^{[-0,0702 + 0,02847 \text{ area}] t}}$	0,79	145

arg - teor de argila na camada de 0 - 40 cm (g kg^{-1}); pre - precipitação pluviométrica média anual da região (mm) area - área disponível para cada planta do povoamento (m^2); t - idade do povoamento (meses); \hat{y}_1 = equação contendo todos os coeficientes significativos; \hat{y}_2 = equação alternativa, sem matéria seca da parte aérea; todos os parâmetros foram significativos a 5 % pelo teste "t", com exceção do coeficiente 0,00584, da primeira equação para fósforo, que foi significativo a 8 %.

Tabela 3 – Equações para a alocação de nutrientes para a copa (galhos+folhas) de plantios de eucalipto no Brasil.

Nutriente	Equação	r	n
N	$\hat{y}_1 = \frac{2,1687 - 0,000248pre - 0,005439mspa}{1 + e^{(0,010577 t)}}$	0,92	145
	$\hat{y}_2 = \frac{2,5196 - 0,000453pre}{1 + e^{(0,020633t)}}$	0,85	145
P	$\hat{y}_1 = \frac{2,5271 - 0,003663mspa - 0,000717pre}{1 + e^{(0,009329 t)}}$	0,88	145
	$\hat{y}_2 = \frac{2,8829 - 0,000964pre}{1 + e^{(0,016649t)}}$	0,84	145
K	$\hat{y}_1 = \frac{1,6322 - 0,000415mspa - 0,000502arg}{1 + e^{[(0,01451 - 0,00113 \text{ area}) t]}}$	0,87	145
	$\hat{y}_2 = \frac{1,7038 - 0,000604arg}{1 + e^{[(0,02712 - 0,001558 \text{ area}) t]}}$	0,80	145

arg - teor de argila na camada de 0 - 40 cm (g kg^{-1}); ppm - precipitação pluvial média anual da região (mm); area - área disponível para cada planta do povoamento (m^2); t - idade do povoamento (meses); todos os parâmetros foram significativos a 5 % pelo teste "t"; \hat{y}_1 = equação contendo todos os coeficientes significativos; \hat{y}_2 = equação alternativa, sem matéria seca da parte aérea.

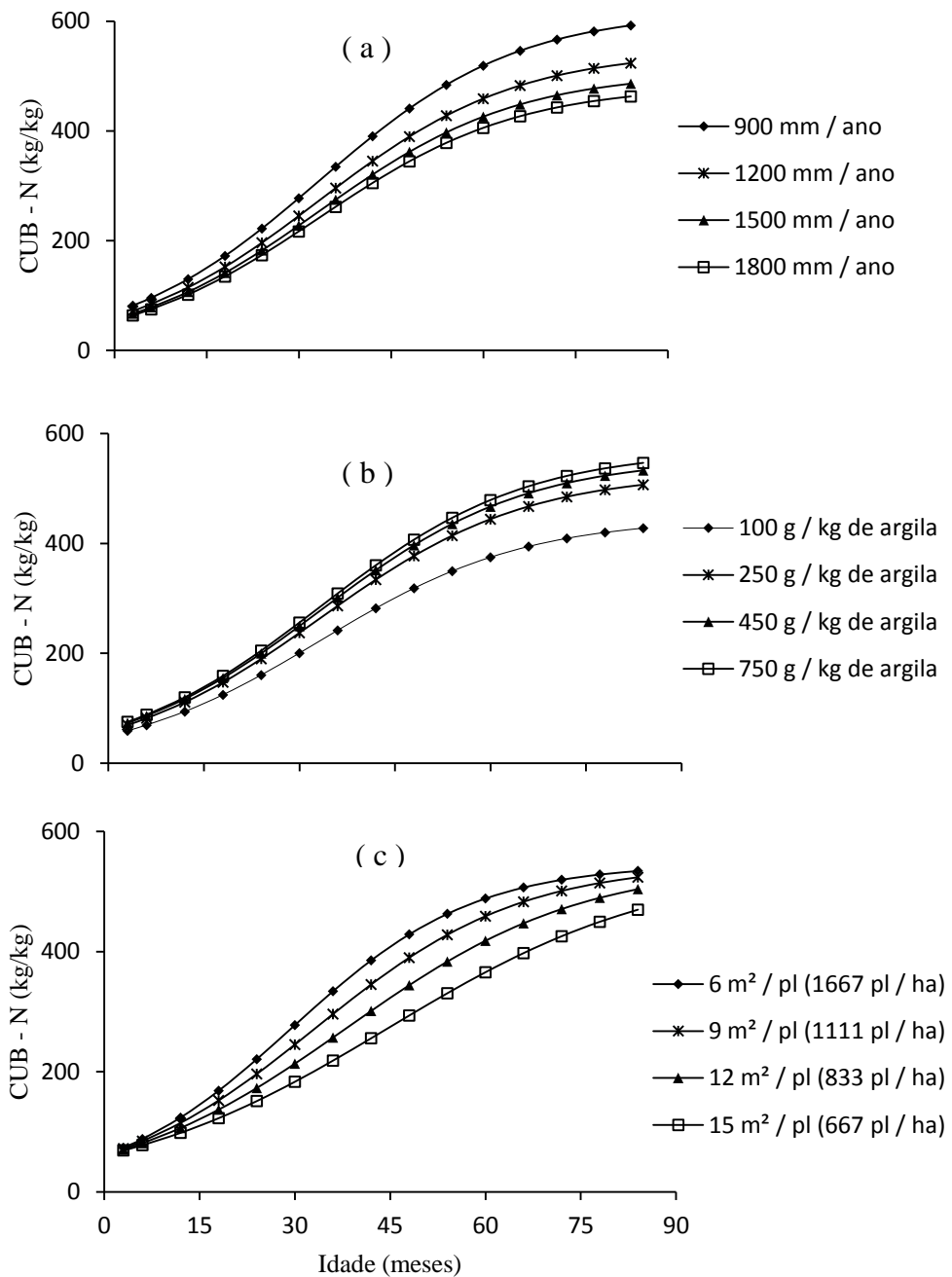


Figura 2 - Coeficiente de utilização biológica (CUB) de N estimado para a parte aérea das plantas em função da idade, de variações na precipitação (a), no teor de argila do solo (b) e na densidade de plantio (c). A precipitação, o teor de argila e a área útil por planta foram mantidas em 1200 mm, 450 g kg⁻¹ e 9 m² por planta, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

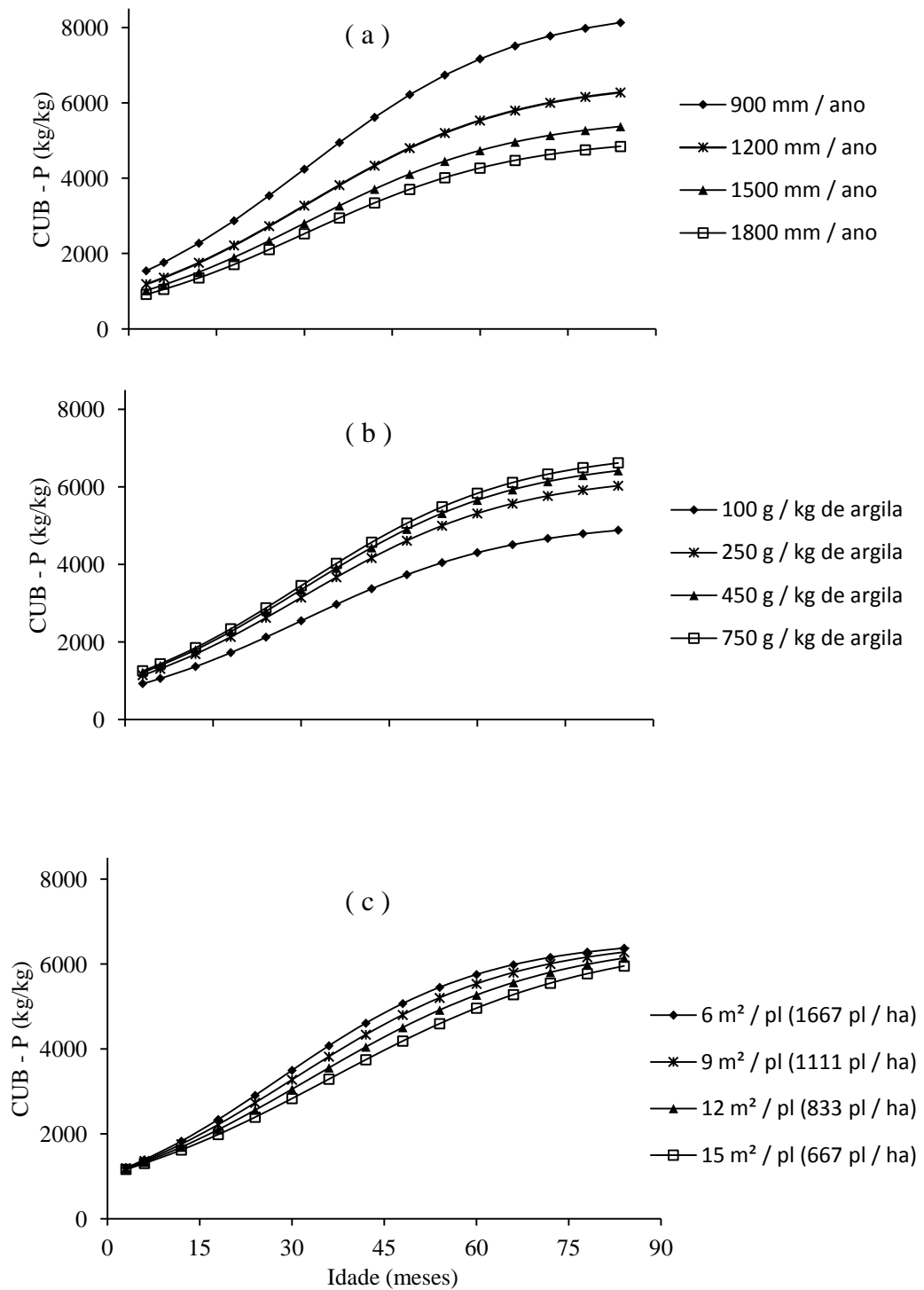


Figura 3 - Coeficiente de utilização biológica (CUB) de P estimado para a parte aérea das plantas em função da idade, de variações na precipitação (a), no teor de argila do solo (b) e na densidade de plantio (c). A precipitação, o teor de argila e a área útil por planta foram mantidas em 1200 mm, 450 g kg⁻¹ e 9 m² por planta, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

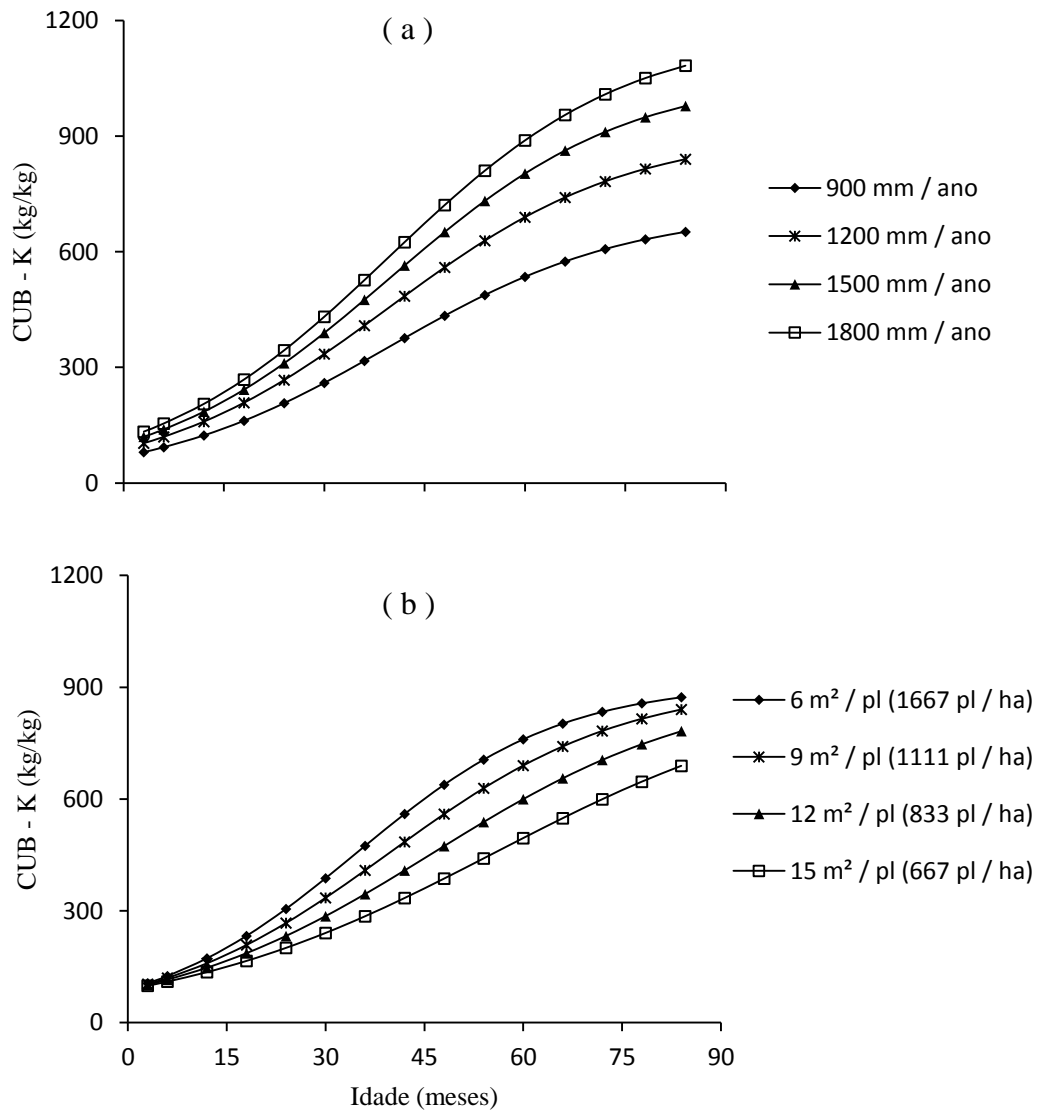


Figura 4 - Coeficiente de utilização biológica (CUB) de K estimado para a parte aérea das plantas em função da idade, de variações na precipitação (a) e na densidade de plantio (b). A precipitação e a área útil por planta foram mantidas em 1200 mm e 9 m² por planta, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

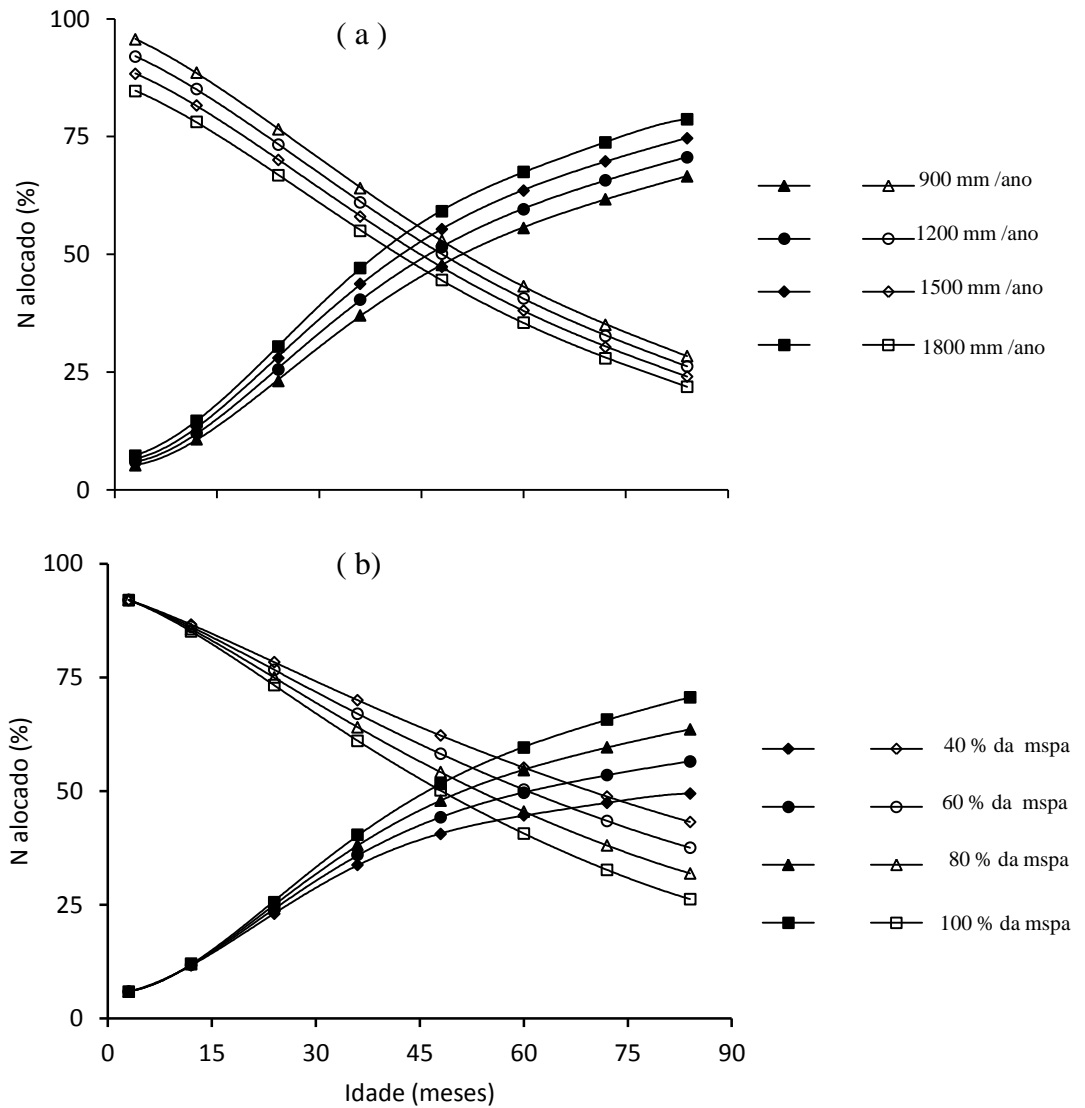


Figura 5 - Simulações da alocação de N para o tronco (símbolos escuros) e copa (símbolos claros) de plantas de eucalipto em função da idade, da precipitação média anual (a) e da produção de biomassa da parte aérea (b). A precipitação e a biomassa da parte aérea foram mantidas em 1200 mm e 100%, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

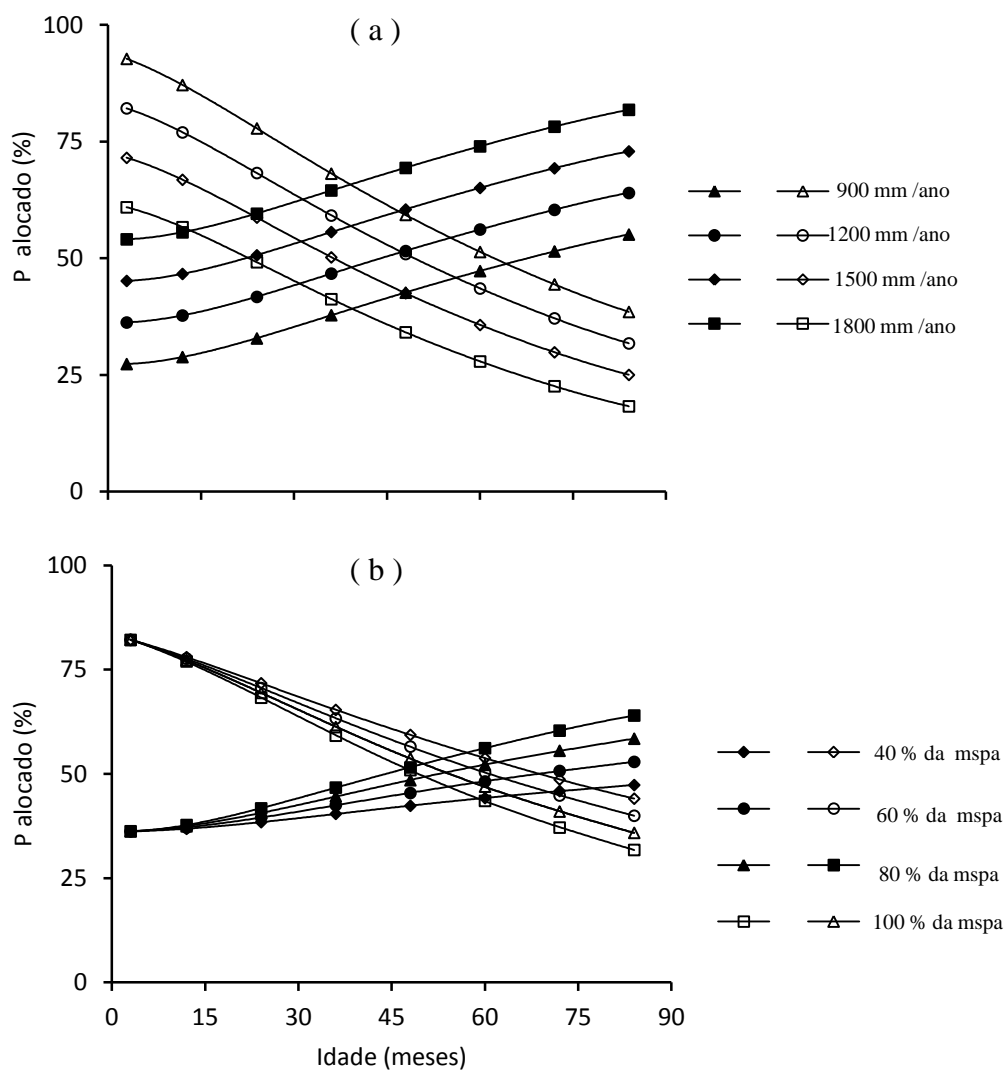


Figura 6 - Simulações da alocação de P para o tronco (símbolos escuros) e copa (símbolos claros) de plantas de eucalipto em função da idade, precipitação média anual (a) e da produção de biomassa da parte aérea (b). A precipitação e a biomassa da parte aérea foram mantidas em 1200 mm e 100%, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

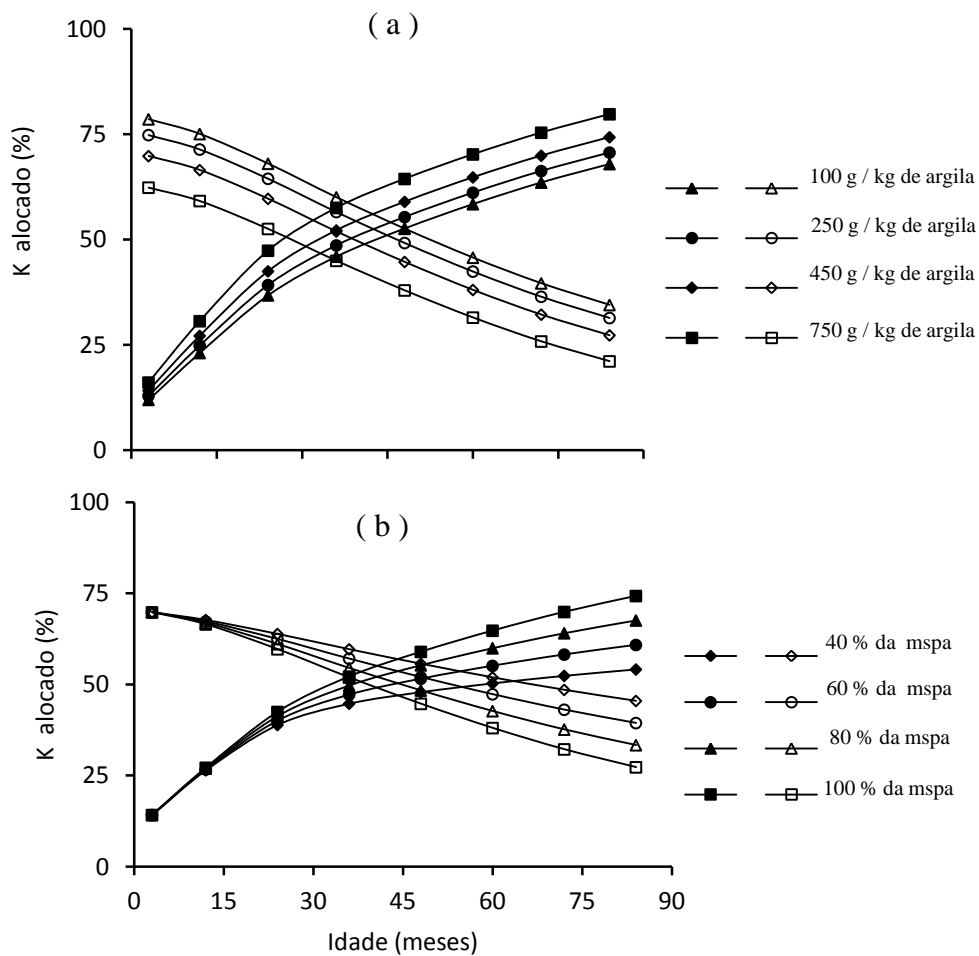


Figura 7 - Simulações da alocação de K para o tronco (símbolos escuros) e copa (símbolos claros) de plantas de eucalipto em função da idade, teor de argila na camada de 0 - 40 cm (a) e da produção de biomassa da parte aérea (b). O teor de argila e a biomassa da parte aérea foram mantidos em 450 g kg^{-1} e 100%, respectivamente, nos cenários em que essas variáveis não sofreram modificações.

Avaliação da modelagem proposta

Houve concordância entre as estimativas geradas pelas equações e os valores observados, na fase de avaliação (Figuras 3, 4 e Tabela 4). Maior

dispersão dos pontos, com maiores valores de erros foi observada para os modelos de K.

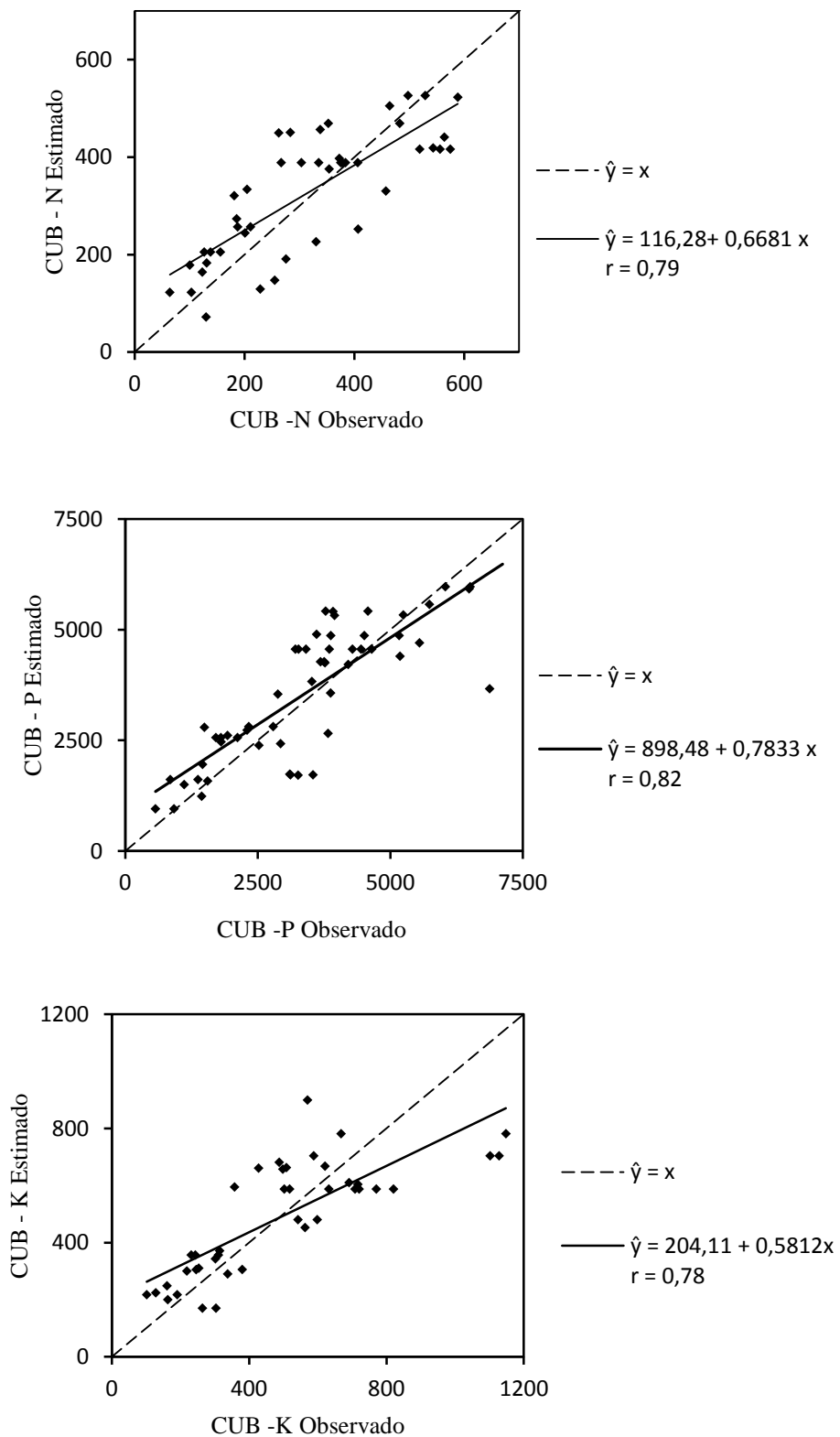


Figura 8 - Valores de CUB de N, P e K observados e estimados na parte aérea de povoamentos equiâneos de eucalipto.

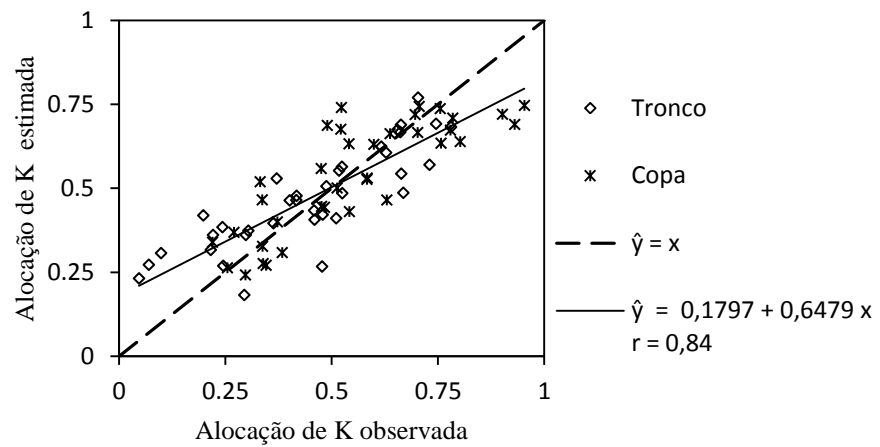
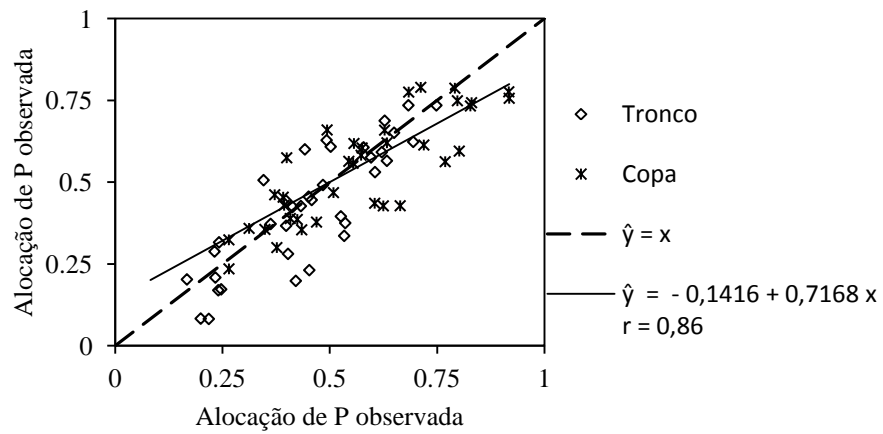
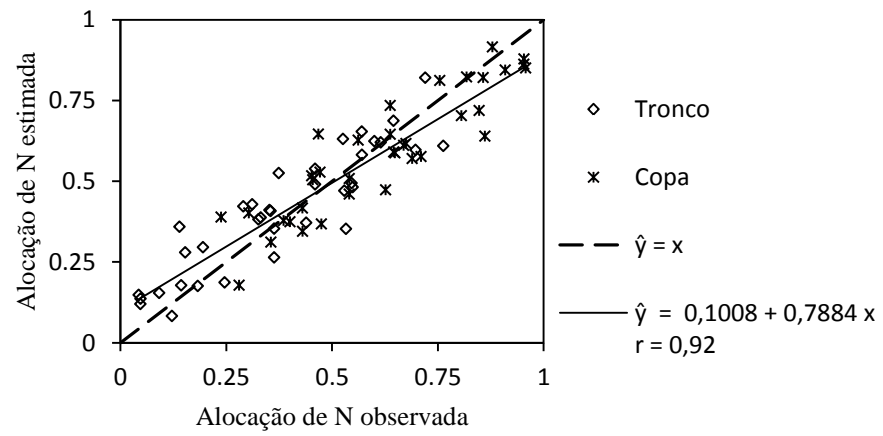


Figura 9 - Valores estimados e observados para a proporção de N, P e K alocados para os componentes da parte aérea de plantios de eucalipto no Brasil.

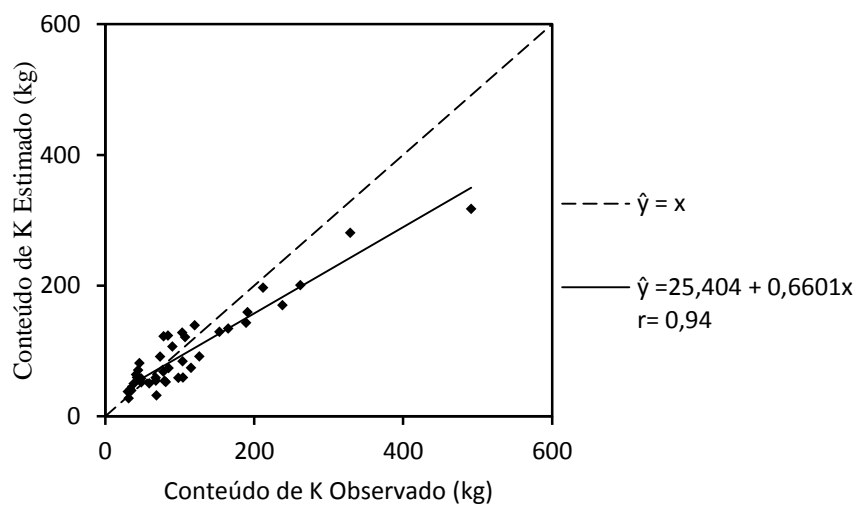
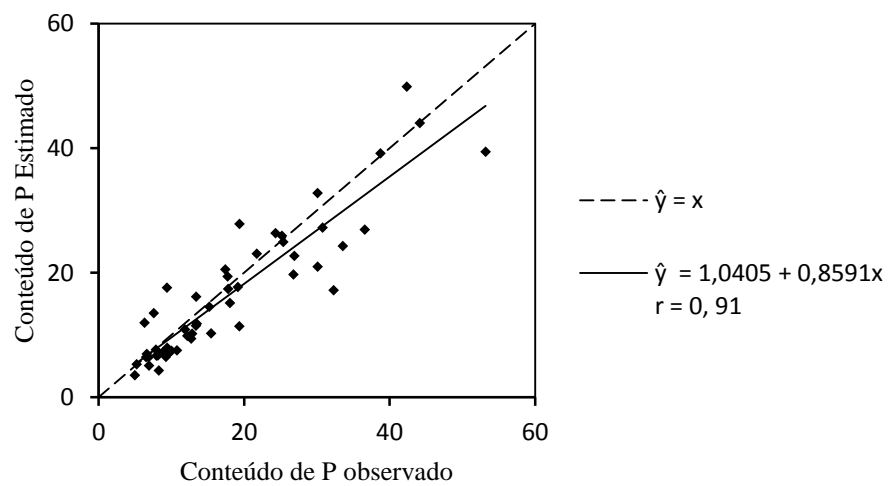
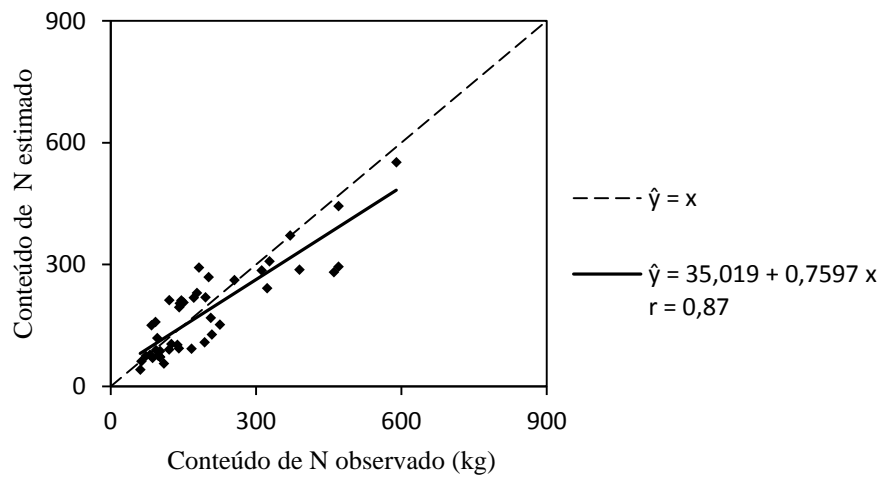


Figura 10 - Valores estimados e observados do conteúdo de N, P e K na parte aérea de plantios equiâneos de eucalipto.

Tabela 4 - Estatísticas das estimativas de eficiência nutricional e alocação de N, P e K em plantas de eucalipto no Brasil.

Variável	n	BIAS (%)	RREQM (%)	EAM (%)	r
CUB - N	44	3,54	29,12	24,73	0,79
CUB - P	54	4,76	27,32	21,05	0,82
CUB - K	41	-0,10	33,61	27,07	0,78
CONT. - N	44	-6,02	38,64	17,57	0,87
CONT. - P	54	-8,33	27,35	19,41	0,91
CONT. - K	41	-11,23	35,94	26,67	0,94
Aloc. N	72*	-3,96	18,77	15,64	0,92
Aloc. P	72*	-1,34	20,48	15,96	0,85
Aloc. K	72*	0,74	22,34	18,05	0,84

* alocação para tronco (n = 36) e copa (n = 36)

DISCUSSÃO

Modelos de regressão não linear múltipla foram ajustados para estimativa da eficiência de uso e alocação de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil (Tabelas 1, 2 e 3). Essas equações permitiram estabelecer relacionamentos funcionais entre as variáveis em estudo, com utilidade, fundamentalmente, para estimar o balanço entre a fixação de carbono (crescimento) e a aquisição/alocação de nutrientes em povoamentos de eucalipto.

A relação sigmoideal entre CUB e a CA com a idade do povoamento sintetiza as mudanças no padrão de alocação de biomassa e nutrientes à medida que as plantas crescem e se desenvolvem. Assim, as curvas de resposta obtidas refletem o aumento da proporção de tronco (componente com menores teores de nutrientes), em detrimento de galhos e folhas (figura 11), concomitantemente à maior ciclagem interna dos nutrientes ao longo da rotação (SAUR et al., 2000; LACLAU et al., 2001; SETTE JR. et al., 2013; TURNER & LAMBERT., 2015). Contudo, as relações C/N, C/P e C/K, representadas pelo CUB, atingem um valor máximo, tal qual a curva de crescimento. Pode-se, portanto, propor um valor de eficiência nutricional máxima ou limite, passível de ser atingido em cada local ao longo da rotação em suas condições específicas de ambiente. Uma aproximação desse valor é dada pelo parâmetro β_0 do modelo logístico aqui proposto. Raciocínio similar pode ser adotado para a proporção de nutrientes alocados para o tronco das plantas, em detrimento aos demais componentes da parte aérea. É importante ressaltar, no entanto, que a partir de idades mais avançadas, não contempladas nesse estudo, esses valores podem sofrer alguma redução pela ocorrência de desbastes ou pela mortalidade natural.

Apesar da forte influência da idade na eficiência de uso e alocação de nutrientes reportada neste e também em outros estudos com eucalipto, outros fatores não podem ser negligenciados (TURNER & LAMBERT., 2015). Muitas vezes, fatores genéticos e ambientais fazem com que plantios mais jovens apresentem características de povoamentos mais velhos e vice-versa. Exemplo disso, são as alterações nos padrões de alocação dos nutrientes avaliados nesse estudo com o aumento da PPM, da produtividade, da densidade de

plântio e do teor de argila (Tabelas 2 e 3). Assim, povoamentos mais jovens conduzidos em menores espaçamentos e em condições de maior PPM podem ter alocação de N e P semelhante à de plântios mais velhos, plantados em espaçamentos mais largos e, ou, em regiões com menor disponibilidade hídrica. Raciocínio similar pode ser adotado para K, com relação ao teor de argila no solo.

Tais relações podem ser atribuídas a efeitos diretos e indiretos. O teor de argila dos solos, por exemplo, relaciona-se positivamente e diretamente com sua capacidade de retenção de nutrientes, sejam eles cátions ou ânions. Há também efeitos indiretos no que se refere a essa característica, como sua relação positiva com o teor de matéria orgânica, efeito esse que frequentemente é mais importante que o primeiro em solos tropicais, pela baixa CTC de sua fração mineral.

Solos mais argilosos possuem ainda maior capacidade de retenção e armazenamento de água, o que altera, juntamente com a precipitação pluvial, a disponibilidade desse recurso de crescimento, estando esses dois fatores frequentemente associados à maiores produtividades do eucalipto no Brasil (STAPE et al., 2004; GONÇALVES et al., 2012). Essas, entre várias outras características e interações, influenciam também a disponibilidade de todos os nutrientes, mesmo aqueles que apresentam uma menor interação com essa fração do solo, como o N.

Entre as muitas relações e interações possíveis, para explicar o aumento do CUB de N com o incremento do teor de argila no solo e com a redução da PPM, é de se destacar o efeito desses dois fatores na disponibilidade desse nutriente, uma vez que ambos influenciam a mineralização de compostos orgânicos.

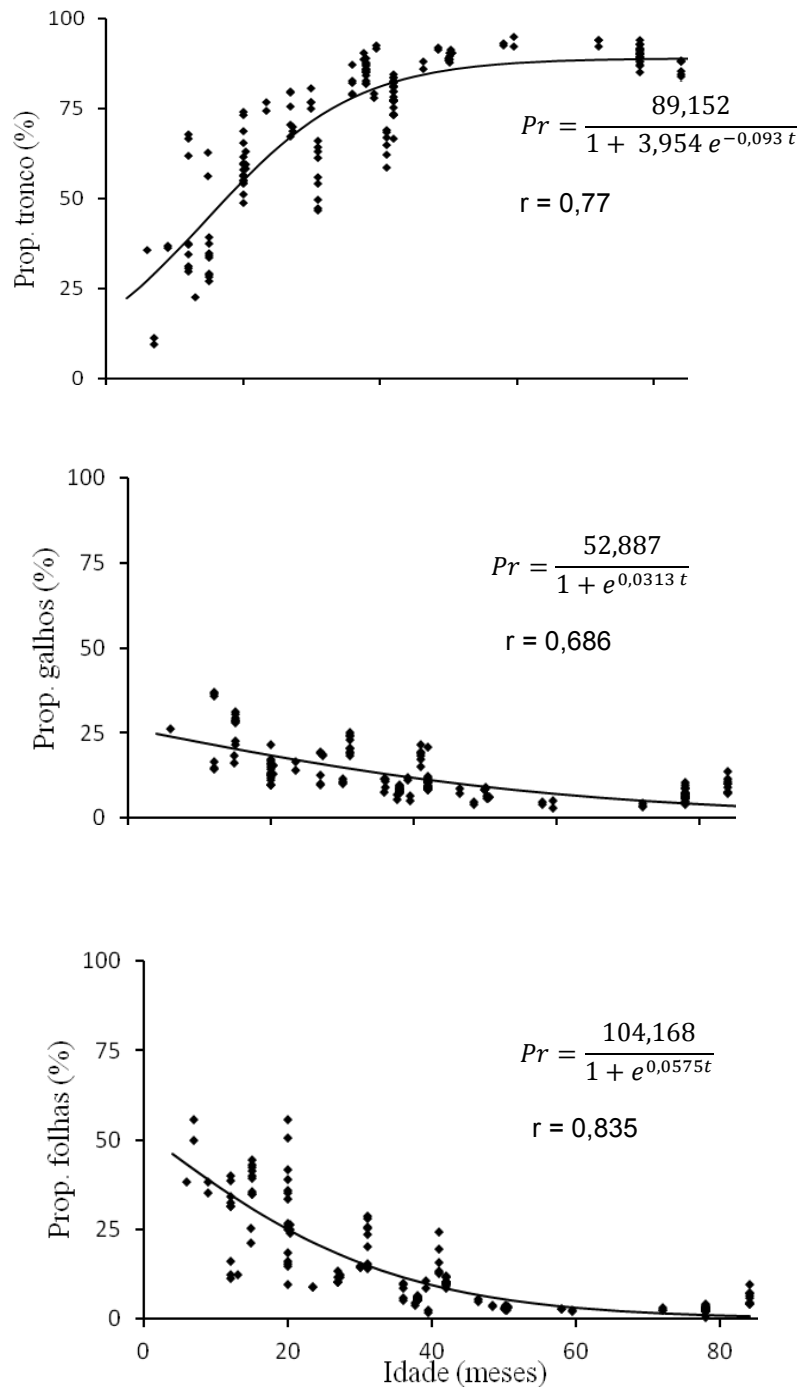


Figura 11 - Variações nas proporções (prop.) de tronco, galhos e folhas em plantas de eucalipto de diferentes idades (t). os parâmetros das funções foram significativos pelo teste t a 5 %.

Relacionamentos entre CUB e a textura do solo são mais evidentes para nutrientes cuja dinâmica é fortemente dependente da fração coloidal, como o P.

Para esse nutriente, é também muito importante o efeito da disponibilidade hídrica em sua dinâmica, dada sua baixa mobilidade no solo.

As equações propostas indicaram aumento dos valores de CUB de P na parte aérea das plantas com o incremento dos teores de argila e menores valores em condições de maior precipitação. Esses resultados estão de acordo com estudos anteriores, que relacionaram o fator capacidade do solo para esse nutriente e a disponibilidade hídrica com sua aquisição e eficiência de uso pelas plantas (MUNIZ et al., 1985; FABRES et al., 1987; NOVAIS et al., 1993)..

De modo geral, solos tropicais mais argilosos, normalmente oxídicos, com alto fator capacidade de fósforo, apresentam também menor nível crítico desse nutriente na planta, quando comparados com solos arenosos (NOVAIS & SMYTH, 1999). Assim, mesmo em condições de disponibilidade similar para esse nutriente, a relação biomassa produzida / P acumulado pode ser maior em solos argilosos comparativamente a solos arenosos (MUNIZ et al., 1985; FABRES et al., 1987; NOVAIS et al., 1993). Logo, à medida que aumenta o teor de argila, a eficiência nutricional de P, de modo geral, passa a ser maior, o que compensa, pelo menos em parte, as limitações no suprimento do nutriente nessas condições. Por outro lado, a maior disponibilidade hídrica favorece o transporte de nutrientes até as raízes (BARBER, 1995; TINKER & NYE, 2000), o que pode fazer com que um solo argiloso e oxídico tenha o efeito de seu alto fator capacidade parcialmente contrabalanceado (NOVAIS & SMYTH, 1999, VALADARES et al., 2014), vez que o suprimento do nutriente é também fator determinante da eficiência nutricional (TURNER & LAMBERT, 2015).

O contraste quanto ao efeito da PPM sobre o CUB de K, em relação aos demais nutrientes, é esperado pela forte relação da disponibilidade desse nutriente com a produtividade vegetal em condições de baixa disponibilidade hídrica, dada sua importância para o controle osmótico e regulação estomática das plantas, entre outros mecanismos de tolerância à seca (MARSCHNER, 2012).

O aumento dos valores de CUB dos três nutrientes com a redução da área útil por planta também está de acordo com estudos anteriores, em que foram observadas reduções na concentração de macronutrientes nos componentes da parte aérea do eucalipto com a diminuição do espaçamento (POGIANI et al., 1984; HARRISSON et al., 2000). Essa redução pode ser

atribuída à maior competição entre plantas por nutrientes, com efeito mais pronunciado para nutrientes mais móveis, como o N (NOVAIS & MELLO, 2007), associada ao crescimento mais intenso do povoamento (BERNARDO et al., 1998), dentre outras alterações morfofisiológicas ocorridas nas plantas em condição de maior competição por recursos de crescimento.

As equações propostas representam processos importantes associados à dinâmica dos nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil com valores estimados coerentes aos observados em condições de campo (Figuras 8, 9 e 10). Seu desempenho foi satisfatório, haja vista a grande variedade de ambientes e genótipos utilizados em seu ajuste.

Essas funções possuem aplicações diversas, entre as quais a estimativa da demanda nutricional dos povoamentos para recomendação de fertilização. Nas figuras 12, 13 e 14 são apresentadas estimativas do CUB de N, P e K na parte aérea de plantios de eucalipto no Brasil utilizando os modelos propostos. Essas estimativas, conjuntamente com a produção de biomassa esperada, podem ser utilizadas para calcular o requerimento nutricional de plantios de eucalipto aos 6 anos de idade em diferentes regiões do país⁷.

Apesar de ser possível utilizar também outras variáveis para melhorar a predição da dinâmica de nutrientes em povoamentos de eucalipto, tais como matéria orgânica, CTC, teores dos nutrientes no solo e doses aplicadas de cada nutriente, os trabalhos em que são apresentados valores de biomassa e conteúdo de nutrientes nem sempre apresentam essas informações, tornando as bases de dados limitadas para a concepção de modelos explicativos e preditivos. Ademais, nem sempre é possível quantificar os efeitos isolados de determinados fatores, obtidos, via de regra, em condições controladas, dada a interação entre esses e os demais fatores que regulam o crescimento e aquisição de nutrientes pelas plantas. Para contemplar interações de difícil quantificação podem também ser utilizadas outras ferramentas de análise, conforme será apresentado no próximo capítulo. A disponibilidade de nutrientes

⁷ Para geração das estimativas foi utilizado o levantamento de solos brasileiros, de onde foram extraídos os teores de argila - Projeto RADAMBRASIL. Os dados de precipitação foram obtidos a partir do banco de dados Climáticos da Organização Meteorológica Mundial para a América do Sul.

no solo é um componente importante a ser integrado a essa abordagem em trabalhos subsequentes.

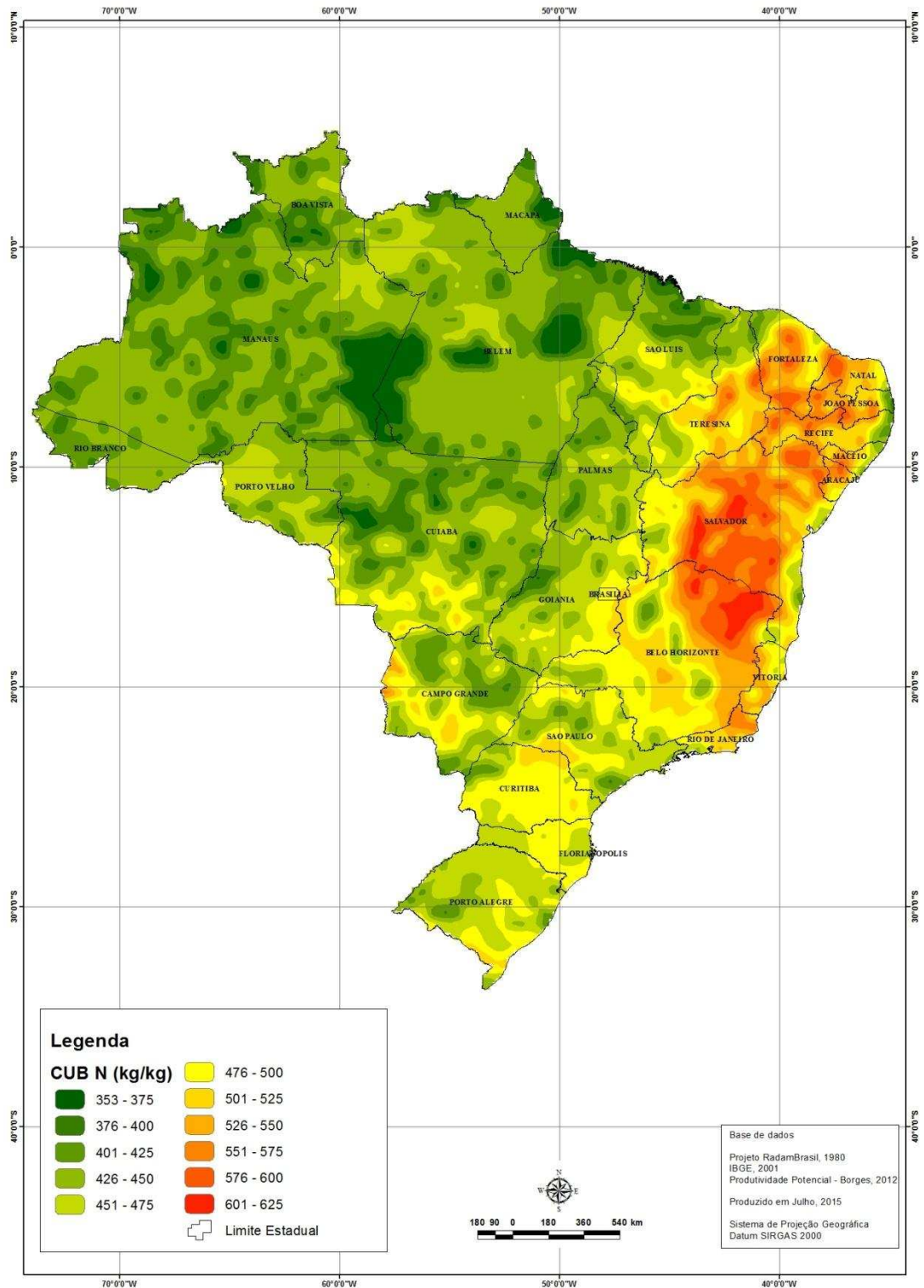


Figura 12 - Estimativa coeficiente de utilização biológica (CUB) de N na parte aérea de plantas de eucalipto no Brasil.

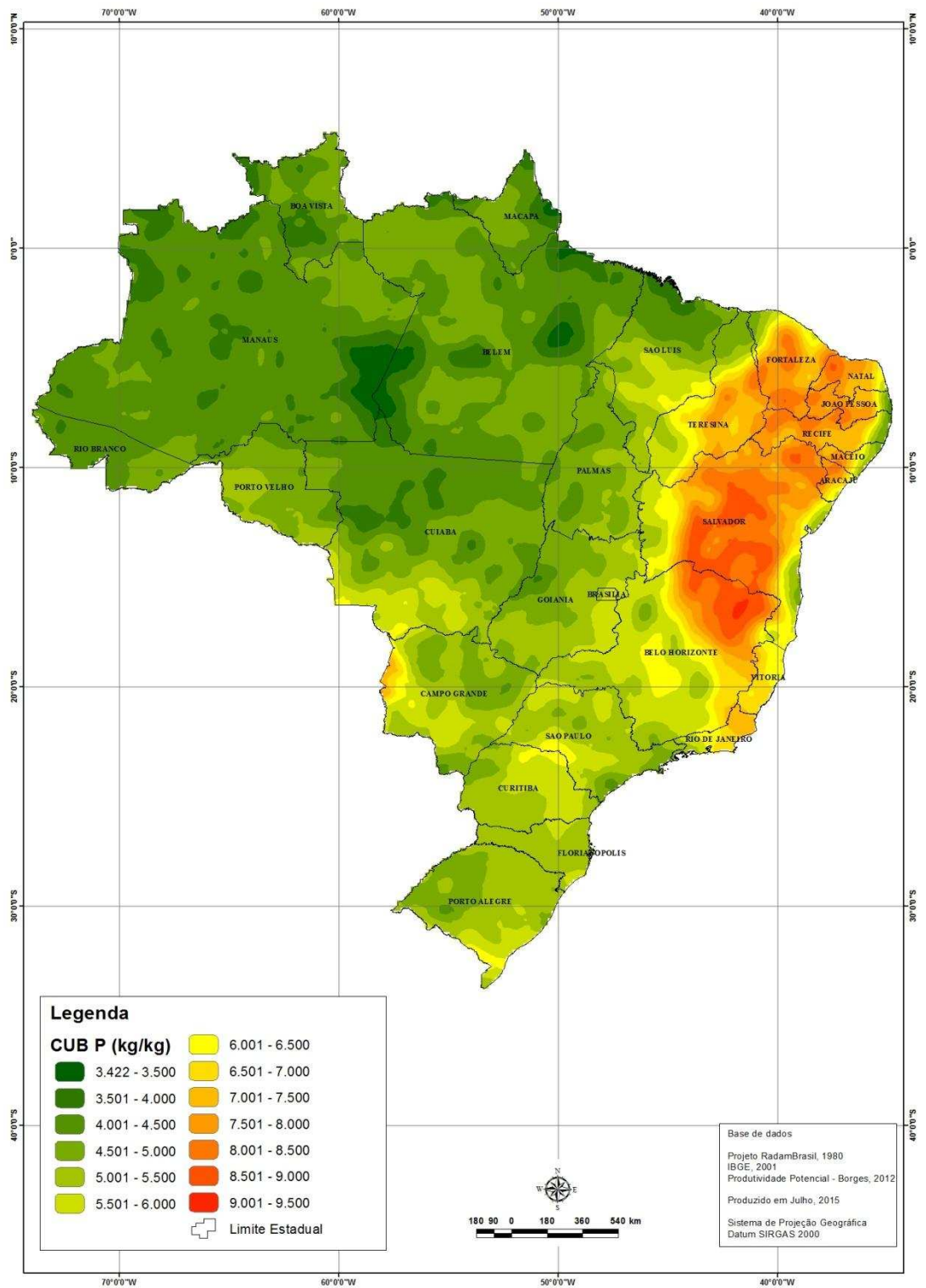


Figura 13 - Estimativa coeficiente de utilização biológica (CUB) de P na parte aérea de plantas de eucalipto no Brasil.

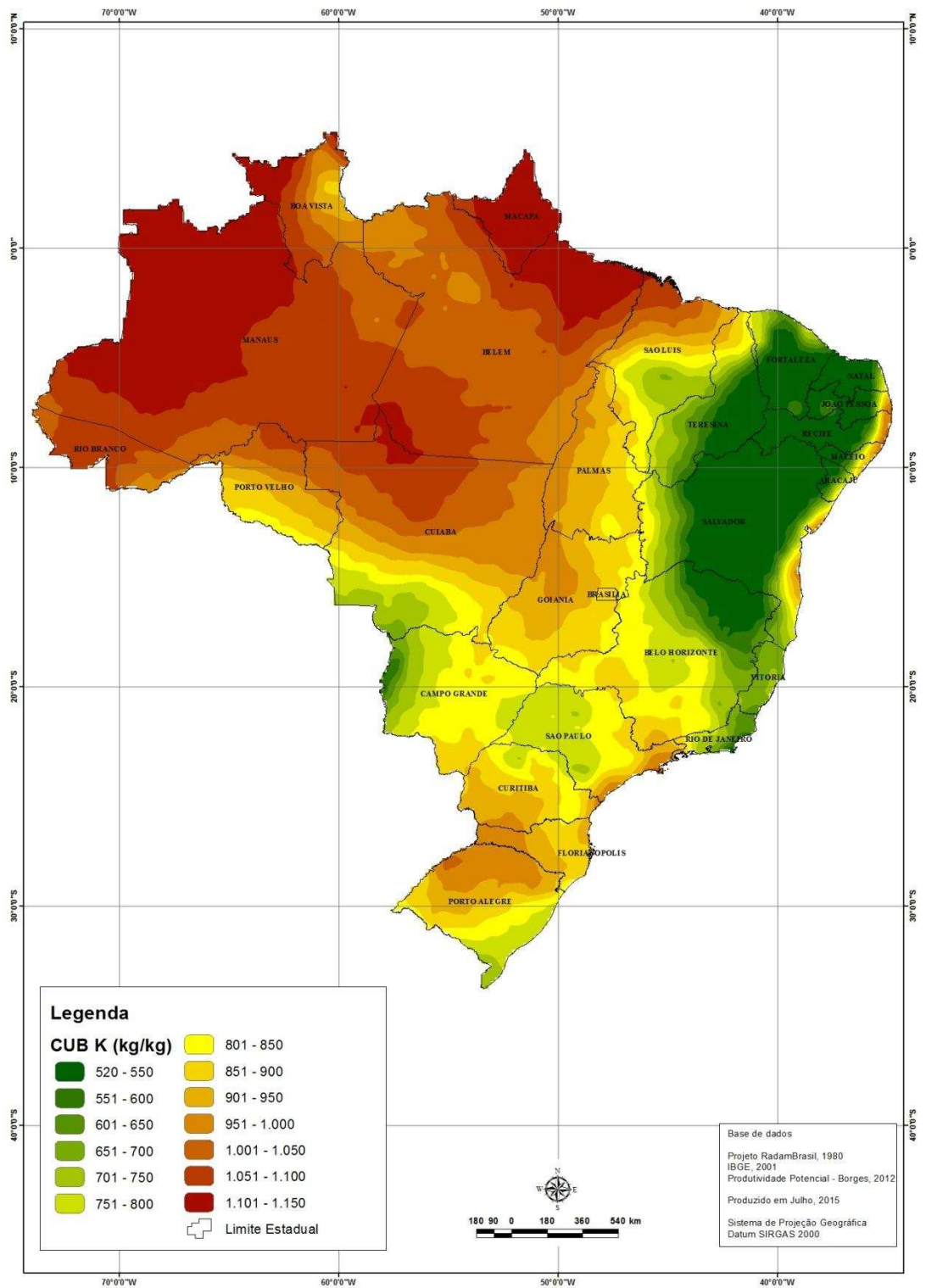


Figura 14 - Estimativa coeficiente de utilização biológica (CUB) de K na parte aérea de plantas de eucalipto no Brasil.

CONCLUSÕES

- Alocação e a eficiência de uso N, P e K em povoamentos de eucalipto podem ser estimadas por meio das equações sigmoidais desenvolvidas neste trabalho, baseadas em variáveis de solo, do clima e associadas ao povoamento.
- As equações propostas são adequadas para estimativa da alocação e da eficiência de uso de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS (ABRAF). **Anuário estatístico da ABRAF 2013: ano base 2012**. Brasília, DF: 2013. 148p.

BARBER, S.A. **Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach**, 2nd edn. New York: Wiley, 1995, 414p.

BARROS, N.F. de; NOVAIS, R.F. de; TEIXEIRA, J.J.; FERNANDES FILHO, E.I. Nutricalc 2.0 - sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**, 16: 129-131, 1995.

BARROS, N.F. & COMERFORD, N.B. Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.487-592.

BERNARDO, A.L; REIS, M.G.F REIS, G.G; HARRISON, R.B; FIRME, D.J. Effect of spacing on growth and biomass distribution in *Eucalyptus camaldulensis*. **Forest Ecology and Management**, 104: 1–13, 1998.

BORGES, J.S. **Modulador edáfico para uso em modelo ecofisiológico e produtividade potência de povoamentos de eucalipto**. Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 70 p. (Tese de Doutorado)

CHRISTINA, M.; LE MAIRE, G.; BATTIE-LACLAU, P.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J.-P.; JOURDAN, C.; DE MORAES GONÇALVES, J.; LACLAU, J.-P. Measured and modeled interactive effects of potassium deficiency and water deficit on gross primary productivity and light-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Global Change Biology**, 21: p. n/a - n/a, 2015.

COLODETTE, J. L.; GOMES, C. M.; GOMES, F. J., & CABRAL, C. P. The Brazilian wood biomass supply and utilization focusing on eucalypt. **Chemical and Biological Technologies in Agriculture**, 1: 1-8, 2014.

FARIA, G.E.; BARROS, N. F. ; CUNHA, W. P. ; MARTINS, I.S. ; MARTINS, R.C.C. Avaliação da produtividade, conteúdo e eficiência de utilização de nutrientes em genótipos de *Eucalyptus* spp. no Vale do Jequitinhonha, MG. **Ciência Florestal**, 18: 369-379, 2008.

FABRES, A.S.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; CORDEIRO, A.T. Níveis críticos de diferentes frações de P em plantas de alface cultivadas em diferentes solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 11: 51-57, 1987.

GAMA-RODRIGUES, A. C. ; GAMA-RODRIGUES, E. F. ; BARROS, N. F. . Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no sudeste da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32: 1165-1179, 2008.

GONÇALVES JLM, ALVARES CA, GONÇALVES TD, MOREIRA RM, MENDES JCT, GAVA JL. Mapeamento de solos e da produtividade de plantações de *Eucalyptus grandis* com uso de sistema de informação geográfica. **Scientia Forestalis**, 40:187-201, 2012.

GONÇALVES, J. L. M. ; ALVARES, C. A. ; HIGA, A. R. ; SILVA, L. D. ; ALFENAS, A.C. ; STAHL, J. ; FERRAZ, S. F. B. ; LIMA, W.P. ; BRANCALION, P. H.S. ; HUBNER, A. ; BOUILLET, J.P. D. ; Laclau, J.P.; Nouvellon, Y. ; EPRON, D. . Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, 301: 6-27, 2013.

HARRISON, R.B. REIS, G.G. REIS, M.D.G.F. . BERNARDO, A.L FIRME, D.J. Effect of spacing and age on nitrogen and phosphorus distribution in biomass of *Eucalyptus camaldulensis*, *Eucalyptus pellita* and *Eucalyptus urophylla*

plantations in southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, 133 : 167–177, 2000.

IBA - **Indústria Brasileira de Árvores 2014**. Disponível em: <http://www.bracelpa.org.br/pt/>. Acesso em abril de 2015.

LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER J.; JOFFRE R.; GOUMA, R.; SAYA, A. Dynamics of nutrient translocation in stem wood across an age series of a Eucalyptus. **Annals of Botany**, 88:1079–1092, 2001.

LEITE, F. P. ; SILVA, I. R. ; NOVAIS, R. F. ; BARROS, N. F. ; NEVES, J. C. L. ; VILLANI, E. M. A. . Nutrient relations during an eucalyptus cycle at different population densities. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 35: 949-959, 2011.

MARSCHNER, P. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. Academic Press, San Diego, 2012. 672p.

MUNIZ, A.S.; NOVAIS, R.F.; BARROS, N.F. & NEVES, J.C.L. Nível crítico de fósforo na parte aérea da soja como variável do fator capacidade de fósforo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 9:237-243, 1985.

NOVAIS, R.F. & MELLO, J.W.V. **Relação solo-planta**. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L. Fertilidade do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.276-374.

NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L.; BARROS, N.F.; CASALI, V.W.D. & FABRES, A.S. **The influence of the soil phosphate capacity factor on soil and plant phosphorus critical levels of different vegetables**. In: FRAGOSO, M.A.C. & BEUSICHEM, M.L.V., eds. Optimization of plant nutrition. Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1993. p.73-76

NOVAIS, R.F. & SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

BRAZIL, PROJETO RADAMBRASIL 1973-1983. **Levantamento de Recursos Naturais**. Ministério das Minas e Energia, Departamento Nacional de Produção Mineral, Rio de Janeiro, Brasil.

OLIVEIRA, F.H.T.; NOVAIS, R.F., ALVAREZ V., V.H. & CANTARUTTI, R.B. Desenvolvimento de um sistema para recomendação de adubação para a cultura da bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:131-143, 2005

PREZOTTI, L.C. Sistema para recomendação de corretivos e de fertilizantes para a cultura do café arábica. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 2001. 93p. (Tese de Doutorado).

SANTOS, F.C.; NEVES, J.C.L.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SEDIYAMA, C.S. Modelagem da recomendação de corretivos e fertilizantes para a cultura da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32 : 1661-1674, 2008.

SAUR E., NAMBIAR E.K.S. AND FIFE D.N. Foliar nutrient retranslocation in *Eucalyptus globulus*. **Tree Physiology**. 20: 1105–1112, 2000.

SETTE JR, C. R., LACLAU, J. P., TOMAZELLO FILHO, M., MOREIRA, R. M., BOUILLET, J. P., RANGER, J., & ALMEIDA, J. C. R. Source-driven remobilizations of nutrients within stem wood in *Eucalyptus grandis* plantations. **Trees**, 27:827–839, 2013.

SILVA, A.P.; ALVAREZ V.; V.H., SOUZA, A.P.; NEVES J.C.L.; NOVAIS, R.F. & DANTAS, J.P. Sistema de recomendação de fertilizantes e corretivos para a cultura do abacaxi - Fertcalc-Abacaxi. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 33:1269-1280, 2009.

STAPE, J.L., BINKLEY, D. RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. **Forest Ecology and Management**, 193: 17–31, 2004.

STATSOFT INC. **Statistica data analysis system version 12.0**. Tulsa: Statsoft Inc., 2015.

TINKER, P.B. & NYE, P.H. **Solute movement in the rhizosphere**. New York, Oxford University Press, 2000. 444p.

TURNER, J., & LAMBERT, M. J. Analysis of nutrient use efficiency (NUE) in *Eucalyptus pilularis* forests. **Australian Journal of Botany**, 62: 558-569, 2015.

VALADARES, S.V. ; NEVES, J. C. L. ; NOVAIS, R. F. ; ROSA, G. N. G. P. ; MARTINEZ, H. E. P. ; ALVAREZ, V. H. A.. Yield gains of coffee plants from phosphorus fertilization may not be generalized for high density planting. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38: 905-911, 2014.

CAPÍTULO 3

Redes neurais artificiais para estimativa da eficiência nutricional e partição de nutrientes em povoamentos de eucalipto

Resumo: Esse estudo foi realizado com o objetivo de treinar e avaliar modelos de redes neurais artificiais (RNA) para predição da eficiência de uso e partição de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil. Foram utilizados dados de experimentos de campo realizados com plantas do gênero *Eucalyptus* em 23 municípios brasileiros, abrangendo as regiões sul, sudeste, centro-oeste e norte. O banco de dados, contendo valores de biomassa e conteúdo de N, P e K na parte aérea das plantas e seus componentes, foi utilizado para calcular o coeficiente de utilização biológica (CUB) de cada nutriente, que é utilizado na modelagem de balanço nutricional como índice de eficiência nutricional. Foi também calculado o coeficiente de partição de cada nutriente (CP), dividindo-se seu conteúdo no tronco e na copa pelo total da parte aérea das plantas. As redes foram treinadas com o algoritmo "Resilient Propagation" (RPROP+). A função de ativação utilizada na camada escondida (oculta) e na camada de saída foi a logística. A topologia foi definida por meio de testes preliminares, em que foram alteradas as variáveis e números de neurônios na camada de entrada e oculta, respectivamente. As redes foram avaliadas com dados independentes. As configurações das RNA mais adequadas para predição do CUB e CP foram diferentes para cada nutriente em estudo. Os valores estimados pelas redes neurais selecionadas apresentaram alta concordância com os valores observados no procedimento de validação. As redes e a metodologia de treinamento proposta nesse trabalho são adequadas para predição da eficiência de uso e partição de N, P e K em plantas de eucalipto.

Palavras-chave: alocação de nutrientes, eficiência de uso de nutrientes, modelagem.

Artificial neural networks to estimate nutrient use efficiency and allocation in eucalyptus plantations

Abstract: This research was carried out in order to train and evaluate artificial neural networks (ANN) to predict N, P and K use efficiency and allocation in eucalyptus plantations in Brazil. Data from field trials and commercial eucalyptus plantations distributed throughout the southern, southeastern, central-west and north regions of Brazil were organized. The resulting database was used to calculate nutrient use efficiency (NUE) from measurements of biomass and composition of nitrogen, phosphorus and potassium in shoots. Allocation of nutrients (AN) to the trunk and crown of the plants was also calculated. The data were used to train ANN to predict NUE and AN as a function of variables related to climate (mean annual precipitation), soil (clay) and plantation characteristics (age, planting density and genotype). The resilient propagation algorithm (Rprop +) was used for training the neural networks. The ANN topology was defined after preliminary tests and the logistic activation function was adopted in the hidden and output layers. Independent data were used to evaluate the trained ANN. The values of NUE and AN estimated by the selected neural networks showed a high correlation with the measured values in the validation procedure. The networks and training methodology proposed in this work were suitable to estimate N, P and K use efficiency and allocation in eucalyptus plantations in Brazil.

Keywords: nutritional efficiency, nutrient partitioning, modeling.

INTRODUÇÃO

As recomendações de fertilizantes para culturas anuais e perenes são, de modo geral, baseadas nos teores dos nutrientes extraídos do solo, tendo como referência um valor ou "nível crítico" para cada elemento acima do qual há baixa probabilidade de resposta à fertilização pela cultura (ALVAREZ V., 1996). Essa abordagem é funcional, mas desconsidera, pelo menos em parte, os processos associados à absorção e utilização dos nutrientes pelas plantas, o que limita sua capacidade preditiva (SMETHURST, 2000). Apesar dos avanços no entendimento do sistema solo-planta, notadamente nas últimas décadas, o estabelecimento de um método que contemple, direta ou indiretamente, esses processos é ainda um grande desafio (SMETHURST, 2000; HINSINGER et al., 2011),.

Modelos de simulação têm sido propostos e aprimorados para complementar e melhorar a capacidade preditiva dos atuais métodos de avaliação da fertilidade do solo (ITOH e BARBER, 1983; CHEN e BARBER, 1990; BARROS et al., 1995; COMERFORD et al., 2006). Em sua maioria, esses modelos são fundamentados na teoria de transporte de solutos e, ou, no balanço de nutrientes no solo. Há modelos que contemplam também a eficiência de utilização dos nutrientes pela planta, como é o caso do SSAND (COMERFORD et al., 2006), baseado no transporte de solutos e do NUTRICALC (BARROS et al., 1995), que simula o balanço dos nutrientes no solo e na cultura. Estes têm como vantagem a previsão da demanda nutricional da cultura, que não necessita ser definida pelo usuário, além de fornecer estimativas da exportação e do retorno de nutrientes após a rotação, quando considerada a partição para os diferentes órgãos da planta.

Embora seja possível estabelecer relações funcionais para previsão da dinâmica dos nutrientes em plantas (capítulo 2), algumas relações mais complexas e interações são ainda pouco compreendidas e de difícil predição. Entre as estratégias potencialmente úteis para solução desse problema está a utilização de Redes Neurais Artificiais (RNA).

As RNA são inspiradas em funções do cérebro humano e baseadas em algoritmos com capacidade de "aprendizado" (HAYKYN, 2001). Sua utilização permite o estabelecimento de relações úteis entre as variáveis de interesse

sem que, necessariamente, haja conhecimento prévio das relações funcionais possivelmente existentes. As redes neurais têm sido utilizadas com sucesso na ciência do solo e na área florestal (AITKENHEAD et al., 2013; ÖZÇELİK et al., 2013; BINOTI et al., 2014; DIAMANTOPOULOU, et al., 2015; GUO et al., 2015), inclusive para avaliação da eficiência nutricional do eucalipto (LAFETÁ et al., 2014), embora ainda em escala reduzida, na avaliação de um ensaio de campo.

Para um entendimento detalhado dos conceitos e aplicações de RNA, podem ser consultados os trabalhos de Haykyn (2001), Krogh (2008) e Binotti (2012).

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de formular e avaliar modelos de redes neurais artificiais para predição da eficiência de uso e partição de N, P e K em povoamentos de eucalipto.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram sistematizados dados de experimentos de campo realizados com plantas do gênero *Eucalyptus* em 23 municípios brasileiros, localizados nas regiões sul, sudeste, centro-oeste e norte do país, sendo a maioria das observações na região sudeste, onde concentram-se os plantios comerciais e estudos com essa cultura. O banco de dados, obtido a partir de levantamentos na literatura, complementados com dados fornecidos pelo núcleo de estudos e projetos multidisciplinares relacionados à nutrição e solos florestais (NUTREE), contém valores de biomassa e conteúdo de nitrogênio, fósforo e potássio na parte aérea das plantas, bem como informações sobre o povoamento florestal (genótipo, idade, espaçamento, características de solo e clima). Um resumo do banco de dados é apresentado na Tabela 1 do apêndice.

A partir dos dados de biomassa e do conteúdo de nutrientes nas plantas (CT), foi calculado o coeficiente de utilização biológica– CUB (massa seca / conteúdo de nutrientes). Esse índice, associado à eficiência nutricional interna da planta, tem importância central na modelagem de balanço nutricional para recomendação de corretivos e fertilizantes para o eucalipto (BARROS et al., 1995). Foram também calculados coeficientes de partição para cada um dos três nutrientes, dividindo-se o conteúdo do nutriente nos componentes da parte aérea (copa e tronco) pelo conteúdo total.

Redes neurais artificiais foram então treinadas e avaliadas para predição dos valores de CUB e CP, para cada um dos nutrientes em estudo. Para tanto, inicialmente, o conjunto de dados foi dividido aleatoriamente em dois grupos, um conjunto de treinamento (80 % dos dados) e outro para avaliação das redes (20 % dos dados). Para customização das redes neurais foi utilizado o software Neuroforest 3.3 (<http://neuroforest.ucoz.com/>). As variáveis de entrada foram escolhidas com base em sua relação, direta ou indireta, com a ciclagem interna de nutrientes nas plantas, sendo: idade, teor de argila na camada de 0-40 cm, precipitação média anual e a área útil por planta no povoamento. Foi também utilizada uma variável categórica, o genótipo (espécie ou híbrido interespecífico).

As redes treinadas foram do tipo *Perceptrons* de múltiplas camadas, contendo uma camada oculta de neurônios, utilizando o algoritmo "Resilient

Propagation" (RPROP +). Esse algoritmo é um dos mais utilizados para treinamento supervisionado de RNA e tem como vantagem, em relação a outros algoritmos baseados na retropropagação do erro, o autoajuste das taxas de aprendizado durante a fase de treinamento, conforme o comportamento da função de erro (RIEDMILLER & BRAUN, 1993).

Foram avaliadas diferentes combinações entre as diferentes variáveis de entrada e o número de neurônios na camada oculta (2 a 16). O critério de parada foi o número de ciclos de treinamento (3000) ou o erro médio (0,0001), tendo sido aplicado aquele que fosse atingido primeiro. A função de ativação utilizada foi a logística, tanto na camada oculta quanto na camada de saída.

A seleção das melhores configurações para as RNA foi realizada por meio de análises gráficas dos erros, da média das diferenças absolutas (MDA), do bias, da raiz quadrada do erro quadrático médio e do coeficiente de correlação linear, conforme as seguintes equações:

$$MDA = \frac{\sum_i^N |P_i - O_i|}{n}$$

$$BIAS = \frac{\sum_i^N (P_i - O_i)}{n}$$

$$RQEQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N (P_i - O_i)^2}{n}}$$

$$r = \frac{cov(O_i, P_i)}{\sqrt{s^2(O_i)s^2(P_i)}}$$

sendo :

P_i - Valor estimado pelo modelo

O_i - Valor observado

n - Número de observações

cov. - covariância

s² - Variância

As melhores redes foram utilizadas para estimar a eficiência nutricional e partição de N, P e K para o conjunto de avaliação, sendo esses valores comparados aos valores observados. Com essa finalidade, foram aplicadas as mesmas métricas anteriormente descritas para seleção dos modelos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As configurações e estatísticas das redes neuronais selecionadas para predição da eficiência de uso e partição de N, P e K são apresentadas nas Tabelas 1 e 2.

De modo geral, as redes que apresentaram o melhor desempenho tiveram as mesmas variáveis de entrada utilizadas nas regressões não lineares do capítulo anterior (idade, teor de argila, precipitação média anual, densidade de plantio e a matéria seca da parte aérea, para as relações de partição) com a inclusão de uma variável categórica, o genótipo (23 materiais) para predição da eficiência de uso de todos os nutrientes e da partição de N e K. A inclusão dessa variável por meio das ferramentas tradicionais de análise numérica é dificultada pelas fortes interações genótipo x ambiente.

Como exemplo, no trabalho de Molica (1992), houve diferença na eficiência nutricional de genótipos de eucalipto cultivados em duas regiões, com respostas antagônicas nos dois ambientes. Um dos materiais, *E. urophylla* x *E. grandis*, apresentou elevado CUB de N em um dos locais, mas valores muito mais baixos para esse nutriente na outra região, comparativamente aos demais genótipos testados. Outro exemplo foi o *E. tereticornis* x *E. camaldulensis*, que apresentou o maior CUB de P em um dos ambientes e um dos menores no segundo. Esses resultados evidenciam a forte plasticidade fenotípica do eucalipto com relação ao balanço C/nutrientes, que define a eficiência nutricional, bem como as diferenças adaptativas de diferentes materiais genéticos no que se refere à utilização de nutrientes frente às limitações do meio físico. Nessa mesma linha, Zaia e Gama Rodrigues (2004) observaram grandes variações entre espécies no que se refere à ciclagem de nutrientes. Tais interações são de difícil modelagem, pela dificuldade de estabelecer um padrão de resposta. Todavia, podem ser consideradas com o uso de RNA, que não apresentam uma estrutura definida (CASTRO et al., 2013) e podem estabelecer relacionamentos lineares e não lineares integrando ou não variáveis contínuas e categóricas (HAYKYN, 2001).

A utilização do genótipo, conjuntamente às demais variáveis, cujo relacionamento biológico com a dinâmica dos nutrientes em estudo é discutido

no capítulo anterior, permitiu estabelecer RNA com alta capacidade preditiva (Tabelas 1,2, 3 e 4).

Tabela 1 - Configurações e desempenho na fase de treinamento das redes neuronais artificiais selecionadas para predição da eficiência de uso de N, P e K por plantas de eucalipto

Variável Estimada	Arquitetura	Var. de entrada contínuas	Var. de entrada categóricas	r	BIAS (%)	RQEQM (%)	MDA (%)
N	30 - 15 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,97	-0,04	11,61	7,17
P	30 - 10 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,98	0,07	10,45	7,09
K	30 - 15 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,96	0,11	15,12	9,18

t = idade (meses); arg. = teor de argila na camada de 0-40 cm (g kg^{-1}); p = precipitação pluviual anual média (mm); are. = área útil por planta (m^2); gen = genótipo

Tabela 2 - Configurações e desempenho na fase de treinamento das redes neuronais artificiais selecionadas para predição da partição de N, P e K em povoamentos de eucalipto no Brasil

Variável Estimada	Arquitetura	Var. de entrada contínuas	Var. de entrada categóricas	r	BIAS (%)	RQEQM (%)	MDA (%)
N	28 - 12 - 2	t, arg., p, are.	gen	0,99	0,00044	7,968	5,567
P	4 - 6 - 2	t, arg., p, are.	-	0,93	-0,00119	15,149	11,789
K	29 - 12 - 2	t, arg., p, are. m	gen	0,98	-0,0035	8,619	5,623

t = idade (meses); arg. = teor de argila na camada de 0-40 cm (g kg^{-1}); p = precipitação anual média (mm); are. = área útil por planta (m^2); gen = genótipo; m = massa de matéria seca da parte aérea

Tabela 3 - Avaliação das redes neuronais artificiais selecionadas para estimativa da eficiência de uso de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil.

Variável Estimada	Arquitetura	Var. de entrada contínuas	Var. de entrada categóricas	r	BIAS (%)	RQEQM (%)	MDA (%)
N	30 - 15 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,96	-1,54	16,43	12,89
P	30 - 10 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,97	4,62	14,39	11,11
K	30 - 15 - 1	t, arg., p, are.	gen	0,92	-2,47	21,92	16,28

t = idade (meses); arg. = teor de argila na camada de 0-40 cm (g kg^{-1}); p = precipitação anual média (mm); are. = área útil por planta (m^2); gen = genótipo

Tabela 4 - Avaliação das redes neuronais artificiais selecionadas para estimativa da partição de nutrientes em povoamentos de eucalipto no Brasil.

Variável Estimada	Arquitetura	Var. de entrada contínuas	Var. de entrada categóricas	r	BIAS (%)	RQEQM (%)	MDA (%)
N	28 - 12 - 2	t, arg., p, are.	gen	0,97	0,023	11,613	9,765
P	4 - 6 - 2	t, arg., p, are.	-	0,94	-0,0036	14,561	12,105
K	29 - 12 - 2	t, arg., p, are., m	gen	0,99	0,0361	11,096	8,709

t = idade (meses); arg. = teor de argila na camada de 0-40 cm (g kg^{-1}); p = precipitação anual média (mm); are. = área útil por planta (m^2); gen = genótipo; m = massa de matéria seca da parte aérea

A proximidade dos valores estimados e observados na fase de avaliação (Figuras 1, 2, 3 e 4) é também um forte indicativo de que as variáveis e o método de treinamento escolhidos foram adequados. Essa avaliação, com

dados não utilizados no treinamento das redes, é necessária para certificar de que os modelos gerados têm capacidade de generalização (BINOTTI et al., 2015). Ou seja, que podem ser aplicados em condições distintas às aquelas com as quais foram treinadas.

Muitas vezes, pode haver o excessivo ajuste das redes por razões diversas e, assim, mesmo aquelas redes com alto desempenho na fase de treino podem apresentar baixa capacidade de extrapolação. Binotti et al. (2015) fazem a analogia desse tipo de erro com a "memorização" do banco de dados de treinamento. Entre outras causas, essas falhas são comuns quando há o superdimensionamento do número de neurônios na camada oculta e, ou, o excesso de ciclos de treinamento. Por outro lado, pode haver também baixo desempenho quando há o inverso, pelo baixo ajuste das funções geradas aos dados utilizados no treinamento ou aprendizado, o que é conhecido como erro de subajuste ou *underfitting* (HAYKYN, 2001; BRAGA et al., 2007).

A exatidão das estimativas obtidas com as redes selecionadas foi superior à das equações não lineares ajustadas no capítulo 2. Resultados semelhantes têm sido observados em outros trabalhos em que são comparadas diferentes categorias de modelos e atribuídos à maior flexibilidade das RNA bem como à possibilidade de incluir variáveis de entrada de diferentes categorias.

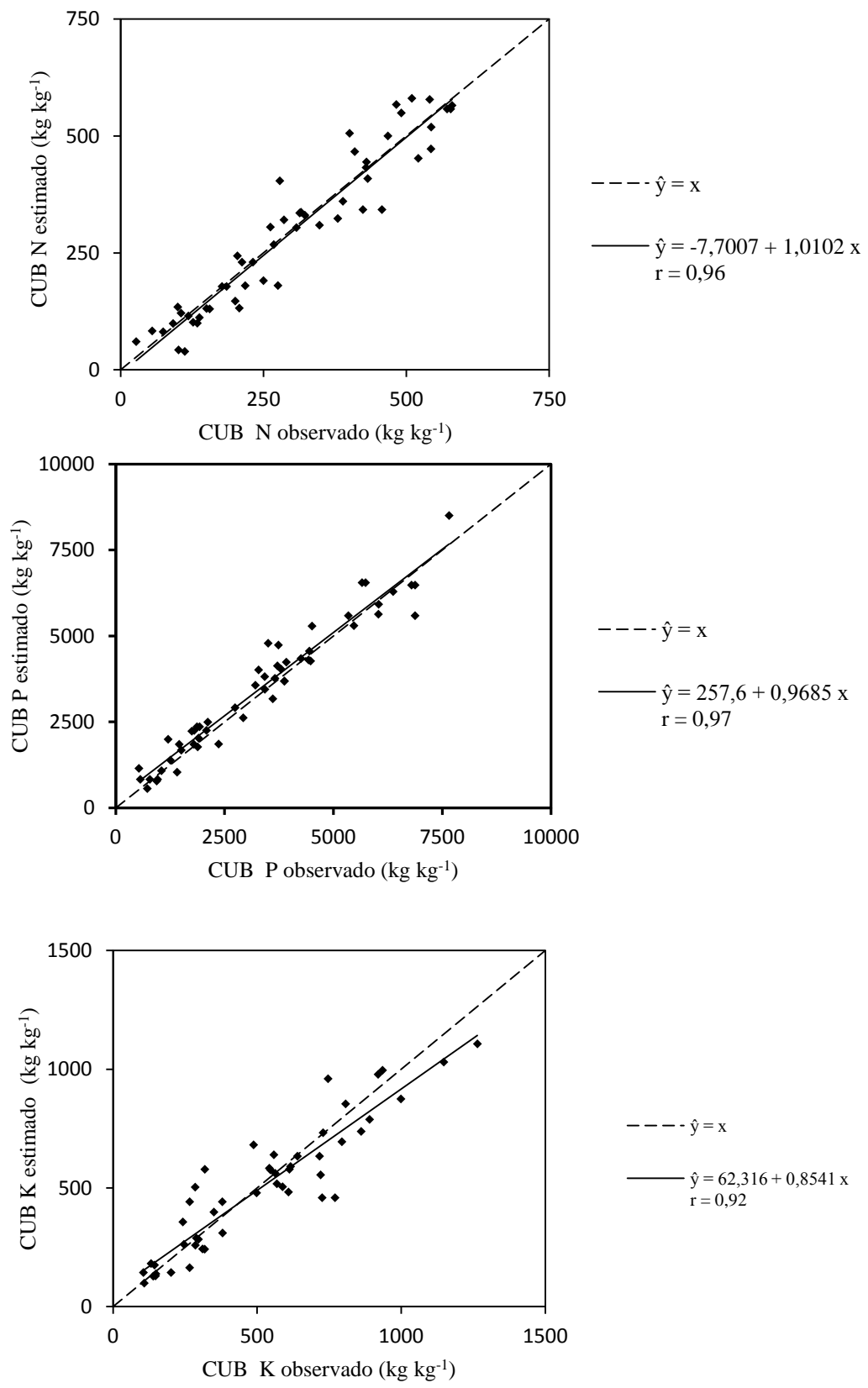


Figura 1 - Comparação dos valores de CUB de N, P e K estimados pelos modelos de redes neuronais e observados no procedimento de avaliação dos modelos com dados independentes.

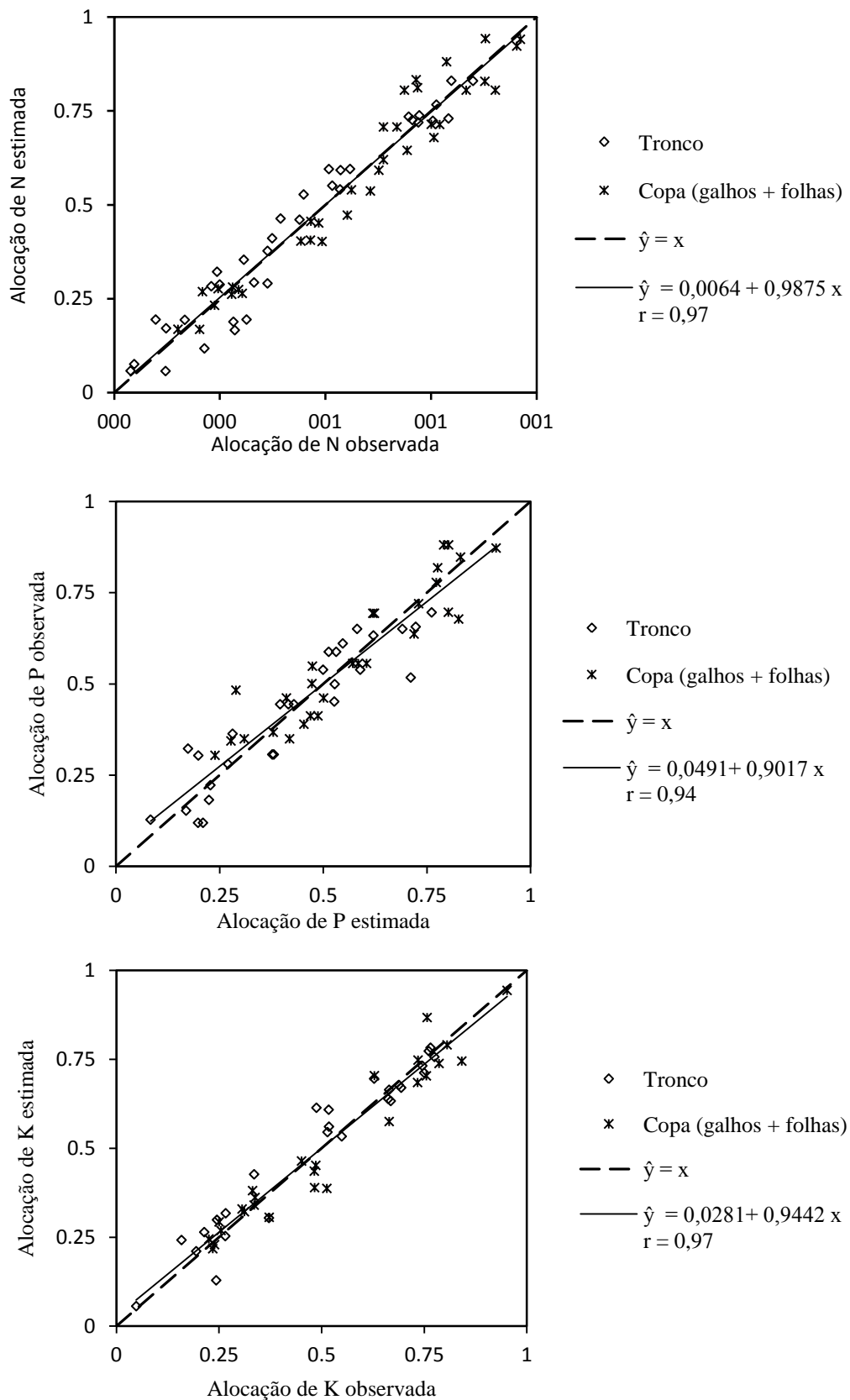


Figura 3 - Comparação da alocação de N, P e K estimada e observada para o tronco e para os componentes da copa de plantios de eucalipto no Brasil.

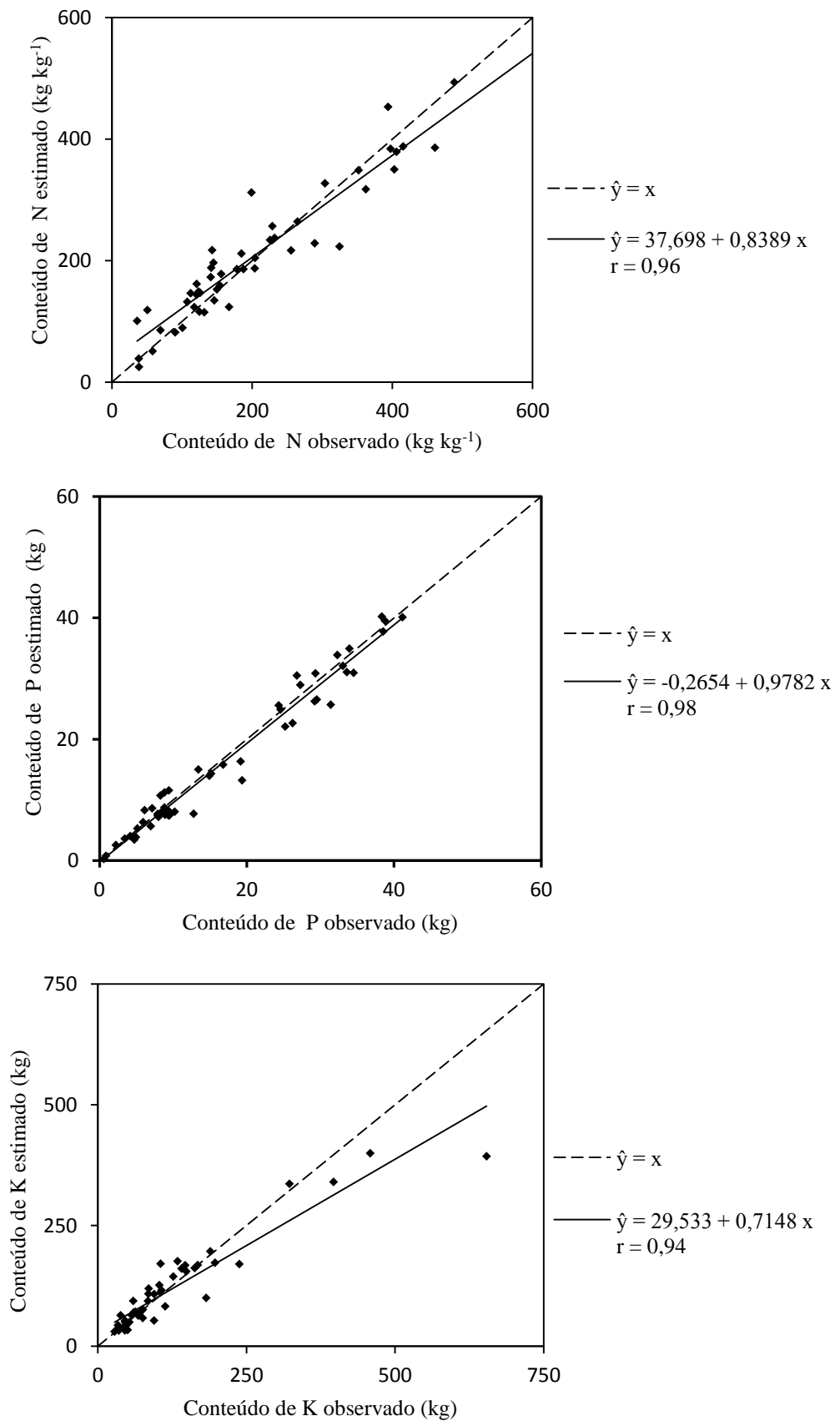


Figura 2 - Comparação do conteúdo de N, P e K estimado e observado na parte aérea de plantios de eucalipto no Brasil, na fase de avaliação dos modelos.

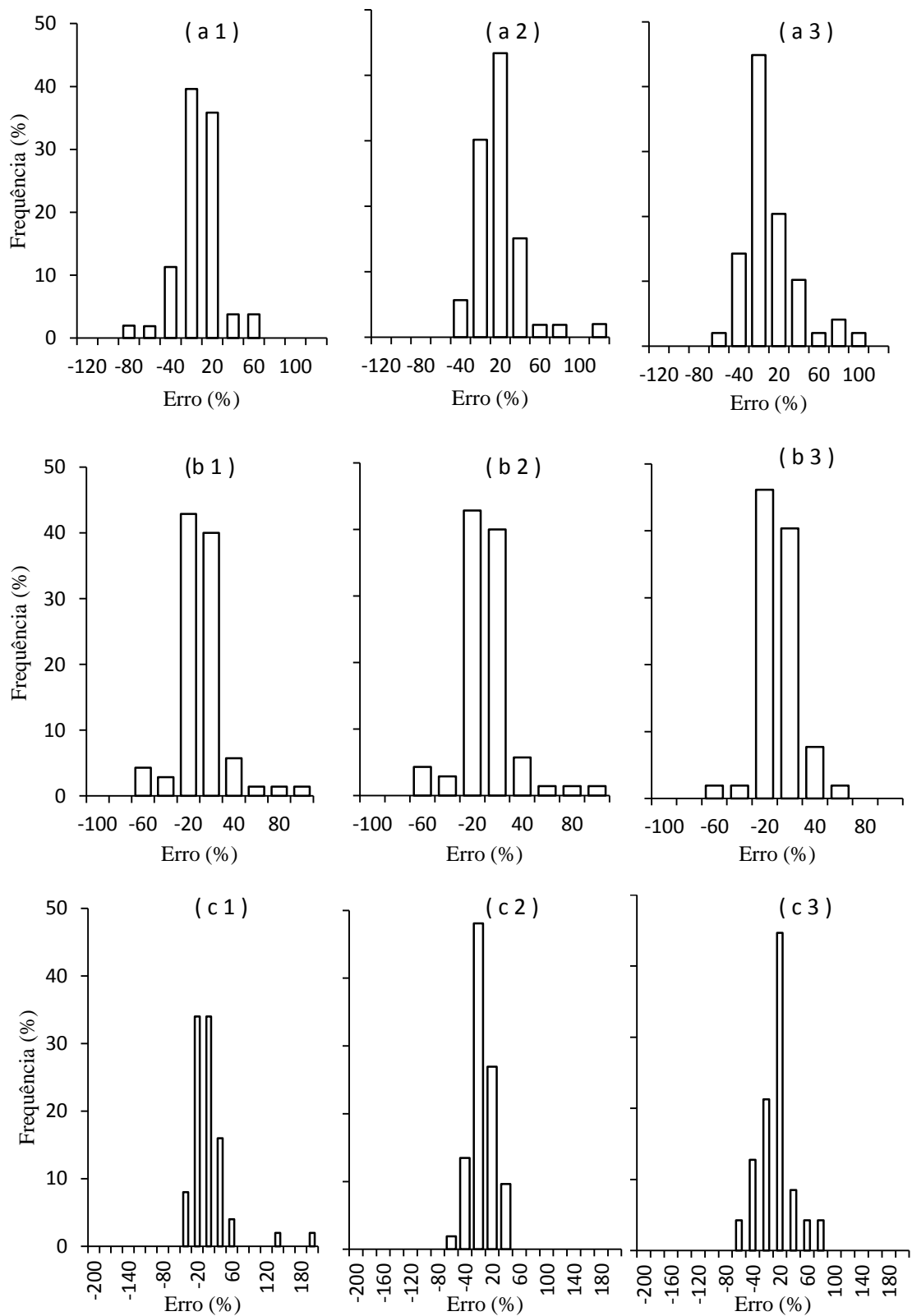


Figura 4 - Frequências dos erros percentuais das estimativas do coeficiente de utilização biológica (a), da alocação (b) e do conteúdo (c) de N (1), P (2) e K (3), na parte aérea de povoamentos de eucalipto utilizados para avaliação dos modelos.

CONCLUSÃO

Redes Neurais Artificiais do tipo Perceptron Multicamadas, treinadas com o algoritmo "Resilient Propagation", são adequadas para predição da eficiência nutricional e partição de nutrientes em povoamentos de eucalipto.

REFERÊNCIAS

AITKENHEAD, M.J.; COULL, M.; TOWERS, W. HUDSON, G.; BLACK, H.I.J.. Prediction of soil characteristics and colour using data from the National Soils Inventory of Scotland. **Geoderma**, 200: 99–107, 2013.

ALVAREZ V., V.H. **Correlação e calibração de métodos de análise de solo**. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F. O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado. Viçosa, MG, SBCS/UFV/DPS, 1996. p.615-646.

BARROS, N.F. de; NOVAIS, R.F. de; TEIXEIRA, J.J.; FERNANDES FILHO, E.I. Nutricalc 2.0 - sistema para cálculo del balance nutricional y recomendación de fertilizantes para el cultivo de eucalipto. **Bosque**, 16: 129-131, 1995.

BINOTI, M. L. M. S.. **Emprego de redes neurais artificiais em mensuração e manejo florestal**. Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 130 p. 2012. (tese de doutorado)

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; SILVA, A.A. L.; PONTES, C. Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. **Revista Árvore**, 38: 747-754, 2014.

BRAGA, A. P.; CARVALHO, A. P. L. F.; LUDEMIR, T. B. **Redes neurais artificiais: teoria e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 226 p.

CASTRO, R. V. O. ; SOARES, C. P. B. ; MARTINS, F. B.; LEITE, H.G. . Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 48: 287-295, 2013.

CHEN, J.H. & BARBER, S.A. Soil pH and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with an uptake model. **Soil Science Society of America Journal**, 54: 1032 - 1036, 1990

COMERFORD, N.B.; CROPPER, W.P.J.; HUA, L.; SMETHURST, P.J.; VAN REES, K.C.J.; JOKELA, E.J.; ADÉGBIDI, H.; BARROS, N.F. Soil supply and nutrient demand (SSAND): a general nutrient uptake model and an example of its application to forest management. **Canadian Journal of Soil Science**, 86, pp. 655–673, 2006.

DIAMANTOPOULOU, M. J.; ÖZÇELİK, R.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, Ü. Estimation of Weibull function parameters for modelling tree diameter distribution using least squares and artificial neural networks methods. **Biosystems Engineering**, 133: 33-45, 2015.

GUO, P. T.; LI, M. F.; LUO, W.; TANG, Q. F.; LIU, Z. W., & LIN, Z. M. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: An application of random forest plus residuals kriging approach. **Geoderma**, 237: 49-59, 2015.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

HINSINGER P., BRAUMAN A., DEVAU N., GÉRARD F., JOURDAN C., LACLAU J., LE CADRE E., JAILLARD B., PLASSARD C. Acquisition of phosphorus and other poorly mobile nutrients by roots. Where do plant nutrition models fail? **Plant and Soil**, 348:29–61, 2011.

ITOH, S. & BARBER. A numerical solution of whole plant nutrient uptake for soil-root systems with root hairs. **Plant and Soil**, 70: 403-413, 1983

KROGH, A. What are artificial neural networks? **Nature Biotechnology**, 26: 195–197, 2008.

LAFETÁ, B.O.; SANTANA, R.C.; NOGUEIRA, G. S.; PENIDO, T.M.A., CHAVES, C.M.M.B.; MUCIDA, D. P. Artificial Neural Networks to Estimate Nutrient Use Efficiency in Eucalypt. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, 8: 259-264, 2014

MOLICA, S.G. **Producao de biomassa e eficiencia nutricional de hibridos interespecificos de eucalipto, em duas regioes bioclimaticas de Minas Gerais**. Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 84 p. 1992. (tese de doutorado)

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. **Forest Ecology and Management**, 306 : 52–60, 2013.

HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.

RIEDMILLER, M. & BRAUN, H. **A direct adaptive method for faster backpropagation learning: The Rprop algorithm**. Proc. IJCNN, IEEE Press 1993, pp. 586–591

SMETHURST P J. Soil solution and other soil analyses as indicators of nutrient supply: a review. **Forest Ecology and Management.**, 138: 397–411, 2000.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Nutrient cycling and balance in eucalypt plantation systems in north of Rio de Janeiro State, Brazil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, 28: 843-85, 2004.

CONCLUSÕES GERAIS

As modificações e as funções de pedotransferência desenvolvidas no primeiro capítulo deste trabalho são úteis para a obtenção de parâmetros de modelos mecanísticos para aquisição de P, além de conferir um caráter mais dinâmico à modelagem adotada.

O modelo SSAND estimou adequadamente a absorção de P por plantas de eucalipto em dois solos tropicais, bem como o efeito da fertilização com esse nutriente.

Alocação e a eficiência de uso N, P e K em povoamentos de eucalipto podem ser estimadas por meio de equações não lineares sigmoidais desenvolvidas neste trabalho, baseadas em variáveis de solo, do clima e associadas ao povoamento.

Redes Neurais Artificiais do tipo Perceptron Multicamadas, treinadas com o algoritmo "Resilient Propagation", são adequadas para predição da eficiência nutricional e partição de nutrientes em povoamentos de eucalipto.

Apêndice

Tabela 1 - Dados utilizados para avaliação do modelo SSAND, no capítulo 1

solo	Θ	K	CMAP	Vmax	Km	DS	DP	DR	RMR
	$\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$	$\text{dm}^3 \text{mg}^{-1} \text{de P}$	$\text{mg kg}^{-1} \text{de}$	$\mu\text{mol g}^{-1} \text{h}^{-1}$	$\mu\text{mol L}^{-1}$	kg dm^{-3}	mg kg^{-1}	cm cm^{-3}	mm
LV	0,18	2,1	1050	0,23	13,3	0,9	0	1,8	0,100
						0,9	150	13,0	0,100
						0,9	300	15,3	0,105
						0,9	600	12,6	0,090
						1,1	0	0,6	0,122
						1,1	150	7,9	0,130
						1,1	300	13,8	0,121
						1,1	600	11,6	0,156
						1,3	0	0,6	0,120
						1,3	150	2,5	0,140
						1,3	300	6,5	0,154
LVA	0,38	0,73	300	0,23	13,3	1,3	600	4,8	0,137
						1,35	0	6,5	0,140
						1,35	100	11,4	0,093
						1,35	200	13,4	0,110
						1,35	400	19,7	0,111
						1,55	0	6,2	0,121
						1,55	100	8,2	0,119
						1,55	200	11,2	0,126
						1,55	400	16,8	0,126
						1,75	0	1,4	0,188
						1,75	100	8,2	0,202
1,75	200	10,9	0,157						
1,75	400	11,4	0,140						

Θ = conteúdo volumétrico de água no solo; K e CMAP = constantes da isoterma de Langmuir; Vmax e Km = constantes do modelo de Michaelis-Menten; DS = Densidade do solo; DP = Dose de fósforo; DR = Densidade de Raízes; RMR = Raio médio das raízes

Tabela 2 - Resumo dos dados utilizados para ajuste e validação de modelos nos capítulos 2 e 3¹

ESTADO	IDADE	²ARGILA	³ÁREA	⁴PRECIPITAÇÃO	⁵CUB N	⁵CUB P	⁵CUB K
	-- meses --	- g kg ⁻¹ -	-- m ² --	-- mm --		----- kg kg ⁻¹ -----	
Minas Gerais	12 - 84	105 - 840	4,5 - 15,0	800 - 1575	85 - 697	1204 - 6448	102 - 1049
São Paulo	3 - 84	50 - 820	4,5 - 7,5	1200 - 1550	91 - 646	533 - 6876	241 - 1195
Espírito Santo	7 - 13	147 - 295	9,0	1200	27 - 64	425 - 941	70 - 144
Rio Grande do Sul	6; 18	200; 207	6,0; 6,8	1364	51; 121	961; 1455	132; 161
Rio de Janeiro	18 - 96	240 - 343	3,0 - 6,3	900 - 1003	250 - 907	5471 - 9410	265 - 1226
Pará	18-36	355-630	9	1800-2115	213;296	1736 - 3361	244 - 256
Amapá	20 - 72	280-305	7,9	2100	255 - 523	3015 - 4559	332 - 1362
Mato Grosso do Sul	30	96	3 - 4,5	1268	183 - 224	1876 - 2486	524 - 648
Geral	12 - 96	50 - 840	3 - 15	800 - 2115	27- 907 (235)	425 - 9410 (259)	70 - 1362 (209)

¹ Os valores entre parêntesis indicam o número de observações coletadas para cada nutriente; ² teor de argila na camada de 0 - 40 cm; ³Área útil da planta (área do talhão ou parcela / número de plantas); ⁴ precipitação média anual; ⁵ coeficiente de utilização biológica (massa seca da parte aérea / massa do nutriente)

Tabela 3 – Modelos para estimativa da alocação de nutrientes para as folhas de plantios de eucalipto no Brasil.

Nutriente	Equação	r	n
N	$afol = \frac{1,908 - 0,005458 mspa - 0,000194pre}{1 + e^{(0,014373 t)}}$	0,91	145
	$afol = \frac{2,2524 - 0,000392pre}{1 + e^{(0,02529t)}}$	0,86	145
P	$afol = \frac{1,9705 - 0,00418 mspa - 0,000411pre}{1 + e^{(0,0162 t)}}$	0,90	145
	$afol = \frac{2,31669 - 0,000687pre}{1 + e^{(0,0257t)}}$	0,86	145
K	$afol = \frac{1,22766 - 0,004245 mspa - 0,000308arg}{1 + e^{[(0,019078 - 0,001083 area) t]}}$	0,86	145
	$afol = \frac{1,2948 - 0,000383arg}{1 + e^{[(0,03617 - 0,00175 area) t]}}$	0,79	145

arg - teor de argila na camada de 0 - 40 cm ($g\ kg^{-1}$); pre - precipitação média anual da região (mm)

area - área disponível para cada planta do povoamento (m^2); t - idade do povoamento (meses); todos os parâmetros foram significativos pelo teste "t" ($P = 0,05$)

LISTA DE REFERÊNCIAS DAS QUAIS FORAM EXTRAÍDOS OS DADOS UTILIZADOS NOS CAPÍTULOS 2 E 3:

ANDRADE, G.C.; BOGNOLA, I.A.; BELLOTE, A. F. J. ; FRANCISCON, L.; WATERLOO, M. J. ; BRUIJNZEEL, L.. Site evaluation and productivity of a 3-year old stand of *Eucalyptus urograndis* in São Paulo, Brazil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, p. 331-346, 2011

BAZANI, J.H. (2014) **Eficiência de fertilizantes fosfatados solúveis, com ou sem complexação com substâncias húmicas, em plantações de eucalipto**. Piracicaba - SP, 129 p. (Dissertação de Mestrado)

BERNARDO, A.L. (1995) **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de três espécies de *Eucalyptus* spp sob diferentes densidades populacionais na região de cerrado de Minas Gerais**. Viçosa –MG: Universidade Federal de Viçosa - UFV, 88p. (Dissertação de Mestrado)

CUNHA, G. M. ; GAMA-RODRIGUES, A.C.; COSTA, G.S . **Ciclagem de nutrientes em *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden no Norte Fluminense**. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 29, p. 353-363, 2005.

GATO, A. **Manejo do solo em áreas de reforma de floresta de eucalipto e seus reflexos na produtividade**. Universidade Federal de Viçosa, UFV, 62p. (Dissertação de Mestrado)

GRESPLAN, S.L (1997). **Produção e eficiência nutricional de clones de eucalipto no norte do Espírito Santo e suas relações com características do solo**. Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 81p. (Dissertação de Mestrado)

JESUS, G.L. (2008). **Nutrição e produção de eucalipto e frações da matéria orgânica do solo influenciadas por fonte e doses de nitrogênio**. Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 63 p. (Dissertação de Mestrado)

LADEIRA, B.C. (1999) **Crescimento, produção de biomassa e eficiência nutricional de Eucalyptus spp, sob três espaçamentos, em uma seqüência de idades.** Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 148 p. (Dissertação de Mestrado)

MARTINS, L. G.C. (2004). **Método de recomendação de adubação para eucalipto com base no monitoramento nutricional.** Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 72 p. (Tese de Doutorado)

MOLICA, S.G. (1992) **Producao de biomassa e eficiencia nutricional de hibridos interespecificos de eucalipto, em duas regioes bioclimaticas de Minas Gerais.** Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 84 p. (Tese de Doutorado)

MAQUÈRE, V., 2008. **Dynamics of mineral elements under a fast-growing Eucalyptus plantation in Brazil. Implication for soil sustainability.** Ph.D. Thesis, Agroparitech, Paris, 369 pp.

NEVES, J.C.L. **Produção e partição de biomassa, aspectos nutricionais e híbridos em plantios clonais de eucalipto na região litorânea do Espírito Santo.** Campo dos Goytacazes, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2000. 191p. (Tese de Doutorado)

OLIVEIRA NETO, S.N (1996). **Biomassa, Nutrientes e Relações Hídricas em Eucaliptus camaldulensis Dehn. em resposta à adubação e ao espaçamento.** Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 131 p. (Dissertação de Mestrado)

PAGANO, M. C., BELLOTE, A. F., & SCOTTI, M. R. Aboveground nutrient components of Eucalyptus camaldulensis and E. grandis in semiarid Brazil under the nature and the mycorrhizal inoculation conditions. **Journal of Forestry Research**, 20, 15-22, 2009.

POGGIANI, F.; ZEN,, S.; MENDES, F.S.; SPINA-FRANÇA F. **Ciclagem e exportação de nutrientes em florestas para fins energéticos**. IPEF, Piracicaba, 27 (1984), pp. 17–30

ROSIM, C.C. (2013). **Eficiência de utilização de nutrientes em híbridos interespecíficos de eucalipto**. Jaboticabal - SP, Universidade Estadual Paulista, Unesp, 40 p. (Dissertação de Mestrado)

SANTANA, R. C.; BARROS, Nairam Félix de ; NEVES, J. C. L. Eficiência de utilização de nutrientes e sustentabilidade da produção em procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em sítios florestais do estado de São Paulo. **Revista Árvore**, Viçosa MG, v. 26, p. 447-457, 2002.

SILVA, G.G.C. **Nutrição Crescimento e sua modelagem em povoamento de eucalipto em resposta à disponibilidade de água e nutrientes**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 102 p. (Tese de Doutorado)

SILVA, H.D. (1996). **Modelos matemáticos para a estimativa da biomassa e do conteúdo de nutrientes em plantações de *Eucalyptus grandis* Hill (ex-Maiden) em diferentes idades**. Curitiba - PR, Universidade Federal do Paraná, UFPR, 101p. (Tese de Doutorado)

SILVA, J. V. ; NOGUEIRA, G. S. ; SANTANA, R. C. ; LEITE, H. G. ; OLIVEIRA, M. L. R. ; ALMADO, R. P. . Produção e acúmulo de nutrientes em povoamento de eucalipto em consequência da intensidade do desbaste e da fertilização. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 47, p. 1555-1562, 2012.

SILVA, N.F. **Produtividade, demanda e eficiência nutricional de eucalipto em regime de talhadia, na região de três marias, minas gerais-cerrado**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, UFV, 102 p. (Dissertação de Mestrado)

SILVA, P. H. M. (2011) **Impactos das doses e do parcelamento da fertilização na produtividade, lixiviação e ciclagem de nutrientes em**

plantações de eucalipto. Piracicaba - SP. Universidade de São Paulo (Tese de Doutorado).

VIERA, MÁRCIO ; BONACINA, D. M. ; SCHUMACHER, M. V. ; CALIL, F. N. ; Caldeira, M.V.W. ; WATZLAWICK, L. F. . BIOMASSA E NUTRIENTES EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus urograndis* NA SERRA DO SUDESTE-RS. **Semina. Ciências Agrárias**, v. 33, p. 2481-2490, 2012.

VIERA, M.; SCHUMACHER, M. V. ; TRUBY, P. ; ARAUJO, E. F. . Biomassa e nutrientes em um povoamento de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus globulus*, em Eldorado do Sul-RS. **Ecologia e Nutrição Florestal**, v. 1, p. 1-13, 2013.

VIERA, M. ; SCHUMACHER, M. V. ; Caldeira, M.V.W. ; WATZLAWICK, L. F. TEORES DE NUTRIENTES EM POVOAMENTOS MONOESPECÍFICOS E MISTOS DE *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em SISTEMA AGROSSILVICULTURAL. **Ciência Florestal**, v. 23, p. 67-76, 2013.

ZAIA, F. C.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Nutrient cycling and balance in eucalypt plantation systems in north of Rio de Janeiro State, Brazil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 28, p. 843-85, 2004.