

**FRAÇÕES DE P NO SOLO EM SÍTIOS DE EUCALIPTO NO
ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL**

MARLON GOMES DA COSTA

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE
DARCY RIBEIRO**

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2015**

**FRAÇÕES DE P NO SOLO EM SÍTIOS DE EUCALIPTO NO
ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL**

MARLON GOMES DA COSTA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutorado em Produção Vegetal.

Orientador: Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues.

**CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ
MARÇO – 2015**

I. FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do **CCTA / UENF** 023/2015

Costa, Marlon Gomes da

Frações de P no solo em sítios de eucalipto no Estado de São Paulo, Brasil / Marlon Gomes da Costa. – 2015.

75 f. : il.

Orientador: Antônio Carlos da Gama-Rodrigues
Tese (Doutorado - Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Campos dos Goytacazes, RJ, 2015.

Inclui bibliografia

1. Fracionamento de fósforo de Hedley 2. Método de extração de Bowman 3. Sistemas florestais 4. Relação fonte-dreno 5. Propriedades físico-químicas do solo I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. II. Título.

Cutter
– C837f

FRAÇÕES DE P NO SOLO EM SÍTIOS DE EUCALIPTO NO
ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

MARLON GOMES DA COSTA

Tese apresentada ao Centro de Ciências e
Tecnologias Agropecuárias da Universidade
Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro,
como parte das exigências para obtenção do
título de Doutorado em Produção Vegetal.

Aprovada em 31 de março de 2015

Comissão Examinadora

Prof^a. Emanuela Forestieri da Gama-Rodrigues (Ph.D., Ciência do Solo) – UENF
(Coorientadora)

Prof. Glaucio de Mello Cunha (D.Sc., Produção Vegetal) – UFES

Prof. Luciano Colpo Gatiboni (D.Sc., Agronomia – Ciência do Solo) – UDESC

Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues (D.Sc., Ciência do Solo) – UENF
(Orientador)

A Deus;

Aos meus pais Elvira e Marcelino, pelo amor e apoio em todos os momentos de minha vida;

Ao meu irmão Marcio, que sempre me deu apoio;

À minha namorada Michele, pelo amor e apoio nos melhores e piores momentos da minha vida, sempre ao meu lado;

Aos meus amigos de longa data, Adriano, Gerbeli e Paulo, que estiveram comigo ao longo desta empreitada, desde os primórdios da graduação.

Dedico

AGRADECIMENTOS

A Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e ao Laboratório de Solos, pela oportunidade de realização deste curso;

À minha namorada Michele, pelo estímulo, pela força e pelo amor;

Aos meus pais, ao meu irmão e aos familiares que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, com apoio, estímulo e amor;

A meu orientador Antônio Carlos da Gama-Rodrigues, pela orientação e pelo apoio ao longo deste curso;

Ao professor José Leonardo de Moraes Gonçalves do departamento de Ciências Florestais da ESALQ, por disponibilizar as amostras de solos dos sítios florestais de eucalipto usadas para o desenvolvimento da tese.

Às técnicas do laboratório de solos, Kátia e Vanilda, que sempre me deram suporte e condições para executar minhas atividades laboratoriais;

À professora Emanuela Foriestieri da Gama-Rodrigues, pelos ensinamentos, pelas colaborações e pelos incentivos prestados;

Ao Dr. Francisco Costa Zaia, pela sua colaboração nas análises laboratoriais e por ter compartilhado seu conhecimento laboratorial comigo, essencial para execução deste trabalho;

Aos meus amigos de longa data, Adriano, Gerbeli e Paulo, por terem dado apoio sempre que precisei e por ter contribuído direta ou indiretamente para a realização deste trabalho;

Aos meus parceiros de trabalho Seldon e Marcus, que estiveram ao longo deste curso colaborando para a realização deste trabalho, pelo apoio e por compartilharem de seus conhecimentos;

Aos meus novos amigos adquiridos ao longo desta empreitada, pelos momentos juntos, pelo apoio e pela amizade;

Aos meus amigos que estiveram distantes, mas torceram pelo meu sucesso;

A todas as pessoas que não foram mencionadas e que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus agradecimentos.

SUMÁRIO

RESUMO	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 O fósforo no solo e sua demanda pelo eucalipto	5
2.2 Frações e dinâmica do fósforo no solo	7
2.3 Fósforo orgânico	11
2.4 Biodisponibilidade do fósforo orgânico	13
2.5 Efeito da vegetação e dos resíduos orgânicos na disponibilidade de fósforo	15
3. TRABALHOS	18
3.1 FRAÇÕES LÁBEIS E NÃO LÁBEIS DE P NO SOLO EM SÍTIOS DE EUCALIPTO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL.....	18
RESUMO	18
ABSTRACT	19
INTRODUÇÃO	20
MATERIAL E MÉTODOS	23
Sítios de estudo	23
Caracterização físico-química do solo	23
Fracionamento de P do solo	25
Análise estatística	26

RESULTADOS	27
Distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P	27
Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos	30
Regressão múltipla e análise de trilha	31
DISCUSSÃO	33
Distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P	33
Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos	35
Regressão múltipla e análise de trilha	36
CONCLUSÕES	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
3.2 FÓSFORO ORGÂNICO EM SOLOS DE SÍTIOS DE EUCALIPTO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL	43
RESUMO	43
ABSTRACT	44
INTRODUÇÃO	45
MATERIAL E MÉTODOS	48
Sítios de estudo	48
Caracterização físico-química do solo	48
Determinação do P orgânico	49
Análise estatística	49
RESULTADOS	52
Distribuição das frações de P nos solos	52
Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos	54
DISCUSSÃO	57
Distribuição das frações de P nos solos	57
Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos	58
CONCLUSÕES	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
4. RESUMO E CONCLUSÕES.....	66
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68

RESUMO

COSTA, Marlon Gomes da, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Março de 2015. Frações de P no solo em sítios de eucalipto no estado de São Paulo, Brasil. Orientador: Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues.

Os plantios de eucalipto estão entre os maiores plantios de espécies florestais no mundo e nas regiões tropicais e constituem os maiores no Brasil. Porém, a manutenção da produtividade dos plantios nas regiões tropicais pode ser limitada pela baixa disponibilidade natural de fósforo (P), devido à alta capacidade de adsorção de P nesses solos. Para a realização desse estudo foram coletadas amostras de solos na camada 0-20 cm, nas entre linhas de plantios do eucalipto, em 11 sítios com diferentes características edafoclimáticas e de manejo, localizados no estado de São Paulo, Brasil. O estudo foi dividido em dois artigos, o primeiro com objetivo de avaliar a distribuição das frações lábeis e não lábeis de P em plantios de eucalipto, suas relações com as propriedades do solo e o potencial das frações lábeis sustentarem os plantios. As frações de P foram extraídas através do método de fracionamento sequencial de P de Hedley. Os resultados para o fracionamento apontaram para a ocorrência de alta dissimilaridade entre os sítios, com variações significativas dos teores de P para todas as frações. As proporções dos teores totais de P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po) em relação ao P total extraído foram similares, em torno de 30% para cada (sem somar o P residual ao Pi total). O teor médio de P lábil (Pi-resina + Pi-NaHCO₃ + Po-NaHCO₃) foi 43,4 mg kg⁻¹ (~9% do P total), onde a fração

orgânica (Po-NaHCO₃) predominou sobre as inorgânicas (Pi-resina + Pi-NaHCO₃), correspondendo ~58% do P lábil total. As frações Pi e Po em NaHCO₃ atuaram como fonte e as frações Pi e Po em NaOH como dreno de P à fração de Pi-resina. Já o segundo artigo, teve como objetivo avaliar os estoques de P, especialmente as frações orgânicas e o potencial do P lábil sustentar a produção de eucalipto. As frações de P foram extraídas através do método de Bowman. Os resultados da extração de Bowman, também identificaram alta dissimilaridade entre os sítios com eucalipto. Os maiores teores de P foram extraídos em meio ácido, ~80%. O teor médio da fração Pi total foi 169,9 mg kg⁻¹ e do Po total foi 41,6 mg kg⁻¹. O teor médio da fração Pi lábil foi 6,4 mg kg⁻¹ e da fração Po lábil foi 4,6 mg kg⁻¹. Houve altas correlações das frações Pi lábil com Pi Mehlich-1, e das frações Pi e Po totais com os teores de argila e C do solo. Entretanto, foi a capacidade troca de cátions (T), a propriedade do solo que exerceu efeito significativo direto sobre Po total ($R^2 = 0,77$; $p < 0,05$), caracterizando a matéria orgânica do solo (MOS) como principal fonte de T nos solos tropicais, dada a forte associação do Po com a MOS. O fracionamento de P possibilitou avaliar as frações de diferentes disponibilidades de P às plantas, o que não pode ser observado em uma análise de rotina de fertilidade, além de evidenciar o potencial do P lábil, como fonte de P às plantas. Já o P lábil estimado por Bowman foi insuficiente para sustentar os plantios de eucalipto em fase de manutenção.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo de Hedley, Método de extração de Bowman, sistemas florestais, relação fonte-dreno, propriedades físico- químicas do solo.

ABSTRACT

COSTA, Marlon Gomes da, D.Sc., Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. March, 2015. Fractions of soil P in sites of eucalypt in the São Paulo state, Brazil. Advisor: Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues.

The eucalypt plantations are among the largest plantations of forest species in the world and in the tropics, and are the biggest in Brazil. However, maintaining the productivity of plantations in the tropics, can be limited by low natural phosphorus (P) availability due to high P adsorption capacity of these soils. To conduct this study soil samples were collected at 0-20 cm layer, between the lines of eucalypt planting in 11 sites with different soil, climate and management features, located in São Paulo, Brazil. The study was divided into two articles, the first aiming at to evaluate the distribution of labile and non-labile P fractions in eucalypt plantations, their relationships with soil properties and the potential of labile fractions sustain the plantations. The P fractions were extracted by the Hedley sequential fractionation. The results for the fractionation pointed out to the occurrence of high dissimilarity between the sites with significant changes in levels of P for all fractions. The proportions of the total content of inorganic P (Pi) and organic P (Po) in relation to the total P extracted were similar, around 30%. The average content of labile P (resin-Pi + NaHCO₃-Pi + NaHCO₃-Po) was 43.4 mg kg⁻¹ (~ 9% of total P), on which the organic fraction (NaHCO₃-Po) predominated over inorganic (resin-Pi + NaHCO₃-Pi) corresponding ~ 58% of total labile P. The NaHCO₃ Pi and Po fractions acted as source, and Pi and Po fractions in NaOH as

sink of P to resin-Pi fraction. The second article aimed to evaluate the P stocks, especially the organic fractions and the potential of labile P sustain production of eucalypt. The P fractions were extracted by the Bowman' method. The results of the Bowman' extraction also identified high dissimilarity between sites with *Eucalyptus* spp. The greatest levels of P were extracted in acid medium, ~ 80%. The average content of Pi fraction was 169.9 mg kg⁻¹ and of the total Po was 41.6 mg kg⁻¹. The average content of the labile Pi was 6.4 mg kg⁻¹ and the labile Po fraction was 4.6 mg kg⁻¹. There were strong correlations of labile Pi with Mehlich-1 Pi, and of the Pi and Po total fractions with clay and C of soil. However, it was the cation exchange capacity (CEC), the soil property that had a significant direct effect on the total Po ($R^2 = 0.77$, $p < 0.05$), characterizing the soil organic matter (SOM) as the main source of CEC in tropical soils, given the strong association of Po with MOS. With the fractionation of P was possible to evaluate the fractions of different availabilities of P to plants, which cannot be observed in a routine analysis fertility, besides evidencing the potential of labile P, as P source to plants. The labile P estimated by Bowman was insufficient to sustain the eucalypt plantations in the phase of maintenance.

Keywords: Hedley phosphorus fractionation, Bowman's extraction method, forestry systems, source-sink relationship, physical-chemical soil properties.

1. INTRODUÇÃO

Com plantios que totalizam mais de 20 milhões de hectares em todo o mundo (Booth, 2013) e um terço nos trópicos (Laclau et al., 2013), os plantios florestais de eucalipto são importantes mundialmente em função da crescente demanda de produtos madeireiros e principalmente por representarem a principal matéria-prima para produtos à base de celulose. No Brasil, as áreas de plantios de eucalipto são em torno de 5,47 milhões de hectares, o que representa aproximadamente 72% das florestas plantadas aqui e um quarto no mundo (Abraf, 2013; Bazani et al., 2014), constituindo 17% da madeira colhida mundialmente (Bazani et al., 2014). Composto por mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália (FAO, 1981), a ampla distribuição e grande expressividade mundial do gênero *Eucalyptus* se deve à grande plasticidade ecológica das espécies, capazes de se adaptarem às mais variadas condições edafoclimáticas (Macedo et al., 2014), com características favoráveis a seu estabelecimento, principalmente nas condições tropicais, como tolerância à acidez, toxicidade por Al e deficiência de cátions de reação básica no solo.

O fósforo (P) é um elemento essencial importante para as plantas, sendo componente de biomoléculas como ácidos nucleicos DNA e RNA (responsáveis pela herança genética e síntese de proteínas, respectivamente) e ATP (responsável pelo armazenamento de energia nas células) (Schachtman et al., 1998; Moreira e Siqueira, 2006; Brady e Weil, 2013). O P é o segundo macronutriente mais limitante para o crescimento das plantas, depois do

nitrogênio (Schachtman et al., 1998). Porém, apesar de requerido em menor quantidade, é o nutriente que limita a produtividade das florestas tropicais (Turner e Engelbrecht, 2011) e o mesmo ocorre para os plantios de eucalipto no Brasil, principalmente nos estágios iniciais de estabelecimento (até 2 anos), quando os requerimentos são maiores (Gonçalves et al., 2013; Barros et al., 2014).

O fósforo encontra-se nos solos sob duas formas, inorgânica (Pi) e orgânica (Po), que de acordo com seu grau de estabilidade ou solubilidade, apresentam diferentes disponibilidades para absorção pelas plantas. O Pi pode ser encontrado em solução (P-solução), precipitado com Al, Fe e Ca ou adsorvido aos óxidos de Fe e Al da fração argila, ambos em equilíbrio com a solução (Souza et al., 2007). Já o Po é formado pelos íons fosfatos, ligados aos compostos orgânicos e sua labilidade está diretamente relacionada à suscetibilidade de decomposição do radical orgânico a que o fosfato está ligado (Gatiboni et al., 2008).

De forma geral, o P orgânico pode representar até 80% do P total do solo (Rheinheimer et al, 2008a; Brady e Weil, 2013). Mas, nas regiões tropicais o P orgânico representa, em média, de 26% (Araújo et al., 2004; Cunha et al., 2007; Dieter et al., 2010; Turner e Engelbrecht, 2011; Xavier et al., 2011) a 31% (Frizano et al., 2003; Rheinheimer e Anghinoni, 2003; Turner, 2006; Zaia et al., 2008) do P total do solo. A ciclagem do Po pode suprir uma considerável fração do fósforo retomado pela vegetação natural (Turner, 2008), razão pela qual sua manutenção é de grande importância para o crescimento das plantas, devido à capacidade de suprir P por mineralização (Cunha et al., 2007; Janegitz et al., 2013).

Os solos tropicais muito intemperizados possuem baixa disponibilidade de P para as plantas e alta capacidade de adsorção de Pi e a manutenção de fontes orgânicas é de grande importância para o crescimento das plantas nestas condições devido à capacidade de suprir P após sua mineralização (Cunha et al., 2007). As frações Po lábil e P microbiano constituem importante reservatório de P ao diminuir a adsorção da fase mineral do solo, com potencial aumento da disponibilidade de P às plantas (Zaia et al., 2008). Desta forma, em condições tropicais, o Po lábil assume um papel importante na conservação do P disponível às plantas por reduzir os efeitos do processo de adsorção de P pela fase mineral do solo (Cunha et al., 2007).

Em função das condições edafoclimáticas e de manejo, o solo pode exercer papel de fonte de P, quando apresenta boa capacidade de suprimento, ou dreno, quando apresenta forte competição com as plantas pelo nutriente, fixando grande parte do P adicionado (Novais e Smyth, 1999). O aumento do intemperismo torna os solos mais eletropositivos e aumenta sua capacidade de adsorver ânions, como os fosfatos, o que muda sua característica de fonte para dreno (Farias et al., 2009). É isto que ocorre com os solos tropicais altamente intemperizados (principalmente Latossolos e Argissolos), que são caracterizados por baixos conteúdos de P total e disponível, e alta capacidade de retenção de P (Friesen et al., 1997).

Em busca de um melhor entendimento das transformações de P que ocorrem nos solos tropicais, são necessários estudos mais aprofundados das relações entre suas frações de menor e maior disponibilidade. O método de fracionamento de P desenvolvido por Hedley et al. (1982), extrai as frações inorgânicas e orgânicas de P do solo, baseado na sua solubilidade química. Este método permite estimar as frações lábeis e não-lábeis, além de identificar as frações estáveis e as frações orgânicas, em ordem decrescente de disponibilidade à planta.

Com o fracionamento de Hedley se pode estudar a dinâmica do P, em função do intemperismo, do manejo da fertilização, da cultura utilizada ou até mesmo pelo uso de resíduos orgânicos, dentre outras linhas de pesquisas de menor expressão (Gatiboni et al., 2013). Apesar de a literatura evidenciar o potencial do método de fracionamento de Hedley em estudos que envolvam a dinâmica de P no solo (Tiessen et al., 1984; Guo e Yost, 1998; Cardoso et al., 2003; Frizano et al., 2003; Gatiboni et al., 2007; Souza et al., 2007; Negassa e Leinweber, 2009; Gatiboni et al., 2013; Gama-Rodrigues et al., 2014), há uma escassez de estudos em solos com eucalipto nas diferentes condições de clima e solo que foram objeto deste estudo. Da mesma forma, há uma carência muito grande de estudos sobre o P orgânico e sua dinâmica em solos sob cultivos de *Eucalyptus* spp., especialmente para os solos tropicais e, também sobre a contribuição do Po para a nutrição destas plantas.

O estudo das frações de P do solo é importante para melhorar o entendimento das transformações que ocorrerem entre as frações de diferentes disponibilidades. A distribuição das frações orgânicas permitirá avaliar seu

potencial para a nutrição e manutenção dos plantios de eucalipto, em curto e longo prazo. Em função da capacidade de geração de resíduos, os sistemas com eucalipto apresentam potencial para suprir parte considerável da necessidade de P pela planta através da ciclagem das formas orgânicas de P. Assim, este estudo irá melhorar o entendimento das frações de diferentes disponibilidades de P para as plantas nesses sistemas e contribuir para o aperfeiçoamento das recomendações e o manejo de fertilizantes fosfatados.

Desta forma, os objetivos deste estudo foram avaliar a distribuição das frações de P em plantios de eucalipto, suas relações com as propriedades físico-químicas do solo e o potencial das frações lábeis sustentarem os plantios.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O fósforo no solo e sua demanda pelo eucalipto

O gênero *Eucalyptus* é composto por mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália (FAO, 1981). Com ampla distribuição mundial, alcançou expressão, ocupando diferentes espaços geográficos no mundo em função de sua capacidade de adaptação às mais variadas condições edafoclimáticas (Macedo et al., 2014). Tem características favoráveis a seu estabelecimento, especialmente para as condições tropicais, como tolerância à acidez, toxicidade por Al e deficiência de bases no solo, além do rápido estabelecimento inicial e expansão do sistema radicular.

Com radiação solar e temperatura abundantes nas condições tropicais, os nutrientes minerais e a água são os principais fatores limitantes da produção vegetal (Barros et al., 2014), e dentre os macronutrientes, o P é o que mais limita a produtividade dos plantios de eucalipto no Brasil, principalmente nos estágios iniciais de estabelecimento, quando os requerimentos são maiores (Gonçalves et al., 2013; Barros et al., 2014).

Apesar do P ser o nutriente mais limitante para o eucalipto nestas condições, necessitando entre 60 e 80 mg kg⁻¹ de P para seu estabelecimento, os níveis críticos para as plantas foram caracterizados por Novais et al. (1986) em 4,5 e 6,5 mg kg⁻¹ de P para fase de manutenção em solos argilosos e arenosos, respectivamente, com uma produtividade de 50 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ e, por Laclau et al.

(2010) em 5 mg kg^{-1} de P em sítios de estudos no Brasil no primeiro ano pós-plantio. Porém, de acordo com Bazani et al. (2014), o acúmulo de P na parte aérea (folhas, galhos, casca e lenho) de *E. grandis* ao longo de sete anos é de 60 kg ha^{-1} , dos quais 54 kg ha^{-1} são exportados pela colheita da madeira ao final do ciclo.

Em plantações comerciais de eucalipto a aplicação de fertilizantes fosfatados é generalizada (Barros et al., 2000) e devido à grande sorção, principalmente nos solos oxídicos, as doses de fertilizantes fosfatados aplicados nos solos brasileiros, são bem superiores à necessidade para o crescimento e a manutenção das plantas (Barros et al., 2014). Isso gera uma grande demanda de fertilizantes para eucalipto no mundo, com mais de 20 milhões de hectares plantados (Booth, 2013) e no Brasil com aproximadamente 5,47 milhões de hectares (Bazani et al., 2014). Este problema tem se agravado no Brasil, pelo crescente uso de solos de cerrado, de baixa fertilidade natural, o que exige grandes doses de fertilizantes fosfatados.

Naturalmente o P é derivado do intemperismo sofrido por minerais primários no solo, como apatita, e como estratégia para proteção deste nutriente, a natureza mantém o teor de P baixo na solução do solo por meio da adsorção e da imobilização microbiana em compostos orgânicos (Rocha et al., 2014). Assim, sua concentração na solução do solo, comparada a outros macronutrientes, é muito baixa, variando de $0,001 \text{ mg L}^{-1}$ para solos de baixa fertilidade a 1 mg L^{-1} para solos férteis, que é absorvido pelas plantas preferencialmente na forma de íons ortofosfatos (HPO_4^{2-} em solos alcalinos e H_2PO_4^- em solos ácidos) e também na forma de alguns compostos de P orgânico solúvel (Brady e Weil, 2013).

Assim, o problema do P para a fertilidade nos solos tropicais, que afeta a nutrição não só do eucalipto, mas das plantas em geral, pode ser resumido a três fatores: (i) conteúdo de P total relativamente baixo; (ii) a maioria dos compostos de P presentes nos solos são indisponíveis às plantas, em formas insolúveis; e (iii) as fontes solúveis aplicadas nas formas mineral ou orgânica, podem ser fixadas, o que as torna insolúveis e não disponíveis (Brady e Weil, 2013).

Estas condições têm gerado necessidade de uso de grandes quantidades de fertilizantes aplicadas em sistemas com eucalipto em décadas recentes, e a limitação de suas aplicações está se tornando necessária por fatores econômicos e ambientais (Laclau et al., 2010). Considerado um recurso finito e oneroso, o P

tem impacto significativo nos custos de formação dos plantios e o esgotamento de suas fontes no mundo está entre os principais fatores que afetam a sustentabilidade das plantações de eucalipto (Laclau et al., 2013).

Caso a fertilidade natural fosse capaz de suprir a demanda das plantas até o final do ciclo de rotação nos plantios de eucalipto, não seria necessário fazer adubação fosfatada adicional, porém na maioria dos casos há necessidade de adubação de manutenção de crescimento, que deve ser feita com adubos de liberação lenta para evitar perdas por fixação de P pelo solo (Novais et al., 2014).

Em sistemas naturais ou em solos com baixa ou nenhuma adição de fósforo, a disponibilidade do elemento está diretamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas (Cunha et al., 2007; Turner, 2008; Zaia et al., 2008; Vincent et al., 2010), que podem suprir a maior parte do P necessário à nutrição das plantas (Turner et al., 2014). Isso porque nos solos tropicais, em função do intemperismo acentuado, ocorre adsorção da maior parte das formas inorgânicas de P. Assim, o Po representa, nestas condições, importante reservatório de P às plantas, e através de sua fração orgânica lábil (Po lábil), diminui a adsorção de P pela fase mineral do solo, aumentando sua disponibilidade (Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008b). Como o Po está diretamente associado à matéria orgânica (MO) acumulada no solo (Bowman e Moir, 1993; Gatiboni et al., 2008), constituindo de 1 a 3% da MO (Moreira e Siqueira, 2006), a mineralização da MO disponibiliza P às plantas (Novais e Smyth, 1999; Rheinheimer et al., 2008a).

Desta forma, a grande capacidade de geração de resíduos pelos plantios com eucalipto, através da manutenção da casca e resíduos da copa sobre o solo após a colheita tem grande potencial para diminuição da dependência dos fertilizantes fosfatados, em função da quantidade de P que pode ser adicionado pela ciclagem das formas orgânicas contidas nestes resíduos vegetais.

2.2 Frações e dinâmica do fósforo no solo

As formas de fósforo dos solos podem ser divididas em duas categorias, lábil e não-lábil, de difícil caracterização e separação, porém interpretadas de acordo com a energia com que são adsorvidos aos minerais do solo, ou estabilidade dos fosfatos formados; a forma lábil constitui a fração disponível à

biomassa e a não-lábil a indisponível (Rheinheimer et al, 2008a). Já do ponto de vista da fertilidade do solo, independente da natureza química, o fósforo é dividido de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo, separado em formas lábeis, moderadamente lábeis e pouco lábeis (Rheinheimer et al., 2008b).

Um dos primeiros estudos das transformações de P através de fracionamento mostrou que a dinâmica de P no solo é influenciada pela natureza do material de origem ao longo dos estágios de desenvolvimento e formação do solo, de acordo com o grau de intemperismo (Walker e Syers, 1976) e que este elemento pode comportar-se como fonte de P às plantas ou dreno do P adicionado ao solo (Novais e Smyth, 1999).

Hedley et al. (1982) desenvolveram um método de fracionamento sequencial de fósforo do solo capaz de extrair as frações inorgânicas e orgânicas de P do solo, baseado na solubilidade química. Este método permite distinguir as frações lábeis das não-lábeis, além de identificar as frações estáveis e as frações orgânicas, em ordem decrescente de disponibilidade à planta. Em uma revisão sobre o uso do fracionamento de Hedley, contrastando agroecossistemas de climas tropicais e temperados, com diferentes usos e manejos de solo, Negassa e Leinweber (2009) observaram que as frações inorgânicas e orgânicas de P podem atuar como fonte ou dreno do P disponível às plantas, em função do manejo do solo e da fertilização.

A relação fonte-dreno, bem conhecida em fisiologia vegetal, pode ser aplicada também em fertilidade do solo, com estabelecimento da relação fonte-dreno entre os compartimentos solo e planta. Desta forma, o solo poderá ser fonte de P naturalmente, quando fértil, com reservas favoráveis de P às plantas ou tornar-se fonte pela adição de fertilizantes; porém quando o solo passa a competir com a planta pelo P adicionado por fertilizantes, em função dos processos de adsorção de P do solo, ele torna-se dreno de P, e na maioria dos casos, o dreno-solo é superior ao dreno-planta na competição por fertilizante aplicado (Novais et al., 2007). Isso é o que comumente ocorre em solos tropicais, especialmente os altamente intemperizados e argilosos, com alta capacidade de fixação de P, a qual reduz a disponibilidade de P às plantas, o que torna estes solos dreno de P por competir com as plantas pelo P adicionado em função de sua forte capacidade tampão (Gama-Rodrigues et al., 2014).

A técnica de fracionamento tem sido considerada uma importante ferramenta para auxiliar no entendimento da dinâmica de P no solo, pois consegue extrair frações que vão além do P extraído por análises de rotina, capaz de elucidar o papel das frações de menor disponibilidade como fonte ou dreno do P da solução do solo e o impacto dos sistemas de manejo e adubação do solo sobre esse nutriente (Gatiboni et al., 2013).

O P lábil, composto pelas frações extraídas em resina e bicarbonato, é responsável pela reposição imediata do P disponível às plantas através do tamponamento do P da solução do solo, e pode representar valores bem significativos, como observado por diversos autores em diversas classes de solos e sistemas de uso da terra, como Cross e Schlesinger (1995), que encontraram ~14% de P lábil, Dieter et al. (2010) entre 4,7 e 11,4%, Waldrip et al. (2011) encontraram ~11% e Schmitt et al. (2013) que observaram 16,4%.

O P extraído em resina, considerado o P disponível do solo, é muito usado nas análises de rotina, por apresentar boa correlação com a produtividade das plantas, representando assim o P que é absorvido pelas plantas. Na maioria dos solos tropicais, os teores nesta fração geralmente são inferiores a 10 mg kg^{-1} (Friesen et al., 1997; Cardoso et al., 2003; Araújo et al., 2004; Gatiboni et al., 2007; Gama-Rodrigues et al., 2014), em função da baixa fertilidade natural e do forte intemperismo, recorrente na maioria destes solos. Todavia, de acordo com Gatiboni et al. (2007), podem ocorrer teores superiores em função da adição de fertilizantes. A adição de fertilizantes provoca acúmulo de P_i no solo, que tornam-se fontes em condições de menor disponibilidade (Rheinheimer et al., 2008b); por outro lado, a adubação pode também acumular fósforo nas frações orgânicas, como observado por outros autores (Carneiro et al., 2010; Schmitt et al., 2013).

De acordo com Rheinheimer et al. (2008a), o P_o extraído por bicarbonato, é facilmente mineralizável e disponível às plantas e aos microrganismos (constitui a fração lábil), enquanto o P_o extraído pelo hidróxido é considerado moderadamente lábil e junto ao P_o resultante da aplicação do ultrassom, estão física e quimicamente protegidos e acumulam-se no solo. De acordo com Guerra et al. (1996), a fração orgânica lábil encontra-se fracamente ligada à fase sólida do solo, mais acessível à mineralização, e sua relação íntima com P disponível sugere que este reservatório lábil tenha um papel importante na fertilidade do solo, principalmente em solos de baixa fertilidade natural.

De disponibilidade restrita à absorção vegetal, as frações de P_i e P_o em NaOH exercem um importante papel na nutrição das plantas pela sua representatividade nos solos, por serem responsáveis pela reposição do P disponível em médio prazo, através do tamponamento do P da solução do solo. Souza et al. (2007) observaram que estas frações pouco lábeis (P_o ligado a compostos húmicos e P_i ligado ao Fe e Al), foram as formas que mais contribuíram para o P disponível às plantas em quatro solos, sendo três Latossolos e um Neossolo. Guo e Yost (1998) consideram que a labilidade de P ocorre em escala temporal para todas as frações, de forma que em longo prazo todo o P do solo pode tornar-se lábil. Assim, as frações pouco lábeis de P, por apresentarem uma liberação lenta de P às plantas, também são importantes para manutenção dos sistemas florestais.

O P extraído em HCl, em função do forte intemperismo nas regiões tropicais, geralmente apresenta valores muito baixos nestes solos, como observado por Cross e Schlesinger (1995), que encontraram valores inferiores a 1%. Esta fração de P representa o P de minerais primários, ligado à apatita, que é predominante nos primeiros estágios de desenvolvimento do solo. Com o avanço da pedogênese, colonização do solo por plantas e microrganismos, este P é gradualmente liberado dos minerais primários para constituir outras frações de P no solo como o P disponível às plantas, fosfatos de Fe e Al, o P adsorvido à superfície dos sesquióxidos, imobilizado por microrganismos e incorporado pela matéria orgânica e, incorporado a compostos inorgânicos recalcitrantes (Izquierdo et al., 2013). Esta fração não é relevante nestas condições, pois representa pouco P e de difícil disponibilidade para sistemas com eucalipto, sendo apenas um indicativo do grau de intemperismo destes solos.

O P residual é considerado o P recalcitrante ou ocluso que é fixado pelos minerais hematita, goethita e gibbsita do solo, dentre outros minerais e isso explica sua superioridade de concentração em solos mais intemperizados e com elevados teores de óxidos de Fe e Al (Souza et al., 2007), além das formas orgânicas insolúveis presentes nesta fração. Esta fração representa o P que não é acessado facilmente pelas raízes das plantas e que pode contribuir para a sua nutrição apenas em situações de extrema escassez de P no solo (Guardini et al., 2012), o que ocorre em muitos solos tropicais. Desta forma, é considerada uma fração bem representativa quantitativamente nestes solos, como confirmado em

trabalhos com diferentes classes de solos e sistemas, que observaram valores relativos ao P total da ordem de 40% (Cross e Schlesinger, 1995), 40 a 80% (Araújo et al., 2004), 21 a 39% (Schmitt et al., 2013). Esta fração, composta de formas orgânicas e inorgânica de P de alta recalcitrância e estabilidade no solo, representa um P que pode ser utilizado só em longo prazo pelo *Eucalyptus* e como observado por Gatiboni et al. (2007) e Pavinato et al. (2009), não é afetado por sistemas de manejo e aplicação de fertilizantes.

O estudo das frações de P é importante, e todas devem ser consideradas relevantes à nutrição das plantas de médio em longo prazo, pois estudos da dinâmica do P nos solos têm mostrado que o P sofre alterações e mudanças nas relações fonte-dreno, para o P disponível do solo em função do clima (Negassa e Leinweber, 2009), do tipo de solo (Tiessen et al., 1984; Gou e Yost, 1998; Araújo et al., 2004; Dieter et al., 2010), do manejo da fertilização (Back e Sanchez, 1994; Gou e Yost, 1998; Gatiboni et al., 2007), do manejo de sistemas agroflorestais (Cardoso et al., 2003), dos tipos de usos da terra (Friesen et al., 1997; Frizano et al., 2003; Aguiar et al., 2013), do manejo de resíduos vegetais no solo (Ofori-Frimpong e Rowell, 1999; Nwoke et al., 2004;), dentre outros fatores que podem afetar a dinâmica do P no solo.

Desta forma, o estudo destas frações é importante para um melhor entendimento das transformações de P que podem ocorrer no solo, influenciadas pelas condições edafoclimáticas e de manejo, especialmente em solos com plantios de eucalipto, em que há escassez de estudos.

2.3 Fósforo orgânico

O fósforo orgânico é derivado de microrganismos, plantas e animais, e pode ser reciclado pela biomassa microbiana do solo ou estabilizado na matriz do solo (Oehl et al., 2004). A matéria orgânica de resíduos que contém significativas quantidades de Po, libera ortofosfato na solução do solo durante sua mineralização (Fuentes et al., 2006). O predomínio desta mineralização de Po sobre imobilização, que supre P às plantas, é dependente da concentração de P do resíduo orgânico disponível para a decomposição pelos microrganismos, sendo a concentração crítica de P de 2 g kg⁻¹ no resíduo, acima do qual predominará a mineralização (Novais e Smyth, 1999).

A distribuição de Po nos perfis do solo varia em função do clima, da vegetação e do material de origem, derivado principalmente de resíduos vegetais que retornam ao solo (Uriyo e Kesseba, 1975). O Po acumula durante o desenvolvimento do solo e pode variar de 20 a 80% do fósforo total no horizonte A, que é considerado importante para disponibilidade de P em muitos solos intemperizados (Agbenin e Tiessen, 1994). Uriyo e Kesseba (1975) encontraram, em perfis de solos na Tanzânia, Po variando de 26 até 90% do P total, com valores maiores próximos da superfície, que eles atribuíram à ação da vegetação na transferência de P da zona radicular para a liteira de superfície.

Ao estudar a dinâmica do fósforo orgânico (Po) de liteira em floresta úmida tropical no Panamá, Vincent et al. (2010) verificaram que a remoção da liteira por três anos reduziu a concentração de Po total do solo em cerca de 23% na superfície de 2 cm do solo mineral e a adição por três anos (~ 6 kg de P ha⁻¹ ano⁻¹) aumentou o Po total do solo em cerca de 16%, e segundo os autores esta taxa de “turnover” na camada de 0-2 cm do solo pode contribuir com cerca de 20% do P total necessário para sustentar o crescimento da floresta estudada.

Turner e Engelbrecht (2011), ao estudar florestas tropicais úmidas no Panamá, encontraram concentrações de Po em diferentes classes de solos variando de 22 a 494 mg kg⁻¹, que representou, em média, 26% do P total, e foi correlacionado com P total e carbono total do solo. Para estes autores, enquanto o P total exerce um controle primário na concentração de Po do solo, a percentagem do Po total parece ser uma função do ecossistema. Guerra et al. (1996) observaram para diferentes classes de solos estudadas, que o Po representou 27% do P total, com predomínio do Po lábil sobre Pi lábil.

Slazak et al. (2010) observaram que o Po contabilizou mais de 50% do P total do solo para os plantios florestais, sugerindo assim, que o Po tem um papel essencial na ciclagem de P e disponibilidade de nutrientes às plantas naquele solo arenoso. Eles também observaram que os valores de Po aumentaram com idade dos plantios para as duas camadas estudadas (0 – 10 cm e 10 – 20 cm). Isto está relacionado à adição de matéria orgânica à superfície do solo.

O fósforo orgânico tem maior importância para a nutrição das plantas quando há deficiência de P no solo, resultante de baixos teores totais e/ou forte adsorção por oxidróxidos de Fe e Al no solo (Zaia et al., 2008b). Isto ocorre principalmente em solo tropicais altamente intemperizados deficientes em P, onde

a ciclagem das formas orgânicas mantém o crescimento e desenvolvimento das plantas nos sistemas naturais. Assim, o Po apresenta-se como fonte em condições de cultivo sem fertilização fosfatada e quando ocorre a fertilização em solos com baixa fertilidade natural, comporta-se como dreno de Pi (Novais e Smyth, 1999).

As pesquisas com Po têm focado em sistemas florestais, buscando uma forma de manejo florestal e/ou sistema de uso da terra que possibilite uma melhor dinâmica deste nutriente através da ciclagem das formas orgânicas, semelhante ao que acontece nos sistemas naturais, diminuindo assim a entrada de fertilizantes químicos. Neste contexto, Cunha et al. (2007) mostraram que solos sob coberturas florestais apresentaram maior teor de Po total e Po lábil que os solos sob pastagem, além do Po lábil ter predominado sobre a fração inorgânica lábil nos solos sob florestas. Em solos tropicais altamente intemperizados não fertilizados, a disponibilidade de P às plantas está diretamente associada à decomposição de Po e mineralização da fração orgânica lábil (Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014).

Achat et al. (2010) observaram em solos florestais que a maior fração do P total do solo está nas formas orgânicas e as transformações destas formas de P têm um papel maior na biodisponibilidade de P nestes solos. Assim, as formas orgânicas representam parte considerável de P disponível às plantas em solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos tropicais (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007), e nestas regiões representa, em média, de 22% (Zaia et al., 2008b; Rita et al., 2013) a aproximadamente 30% (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a) do P total do solo. Desta forma, principalmente as frações lábeis de Po desempenham importante função como fornecedoras de P para as plantas em sistemas florestais via mineralização da matéria orgânica do solo.

2.4 Biodisponibilidade do fósforo orgânico

Em solos jovens com presença de minerais primários como apatitas, os fosfatos de cálcio são os principais fornecedores de P aos organismos vivos, enquanto que, em solos altamente intemperizados a biociclagem dos fosfatos

orgânicos assume grande importância na manutenção da biodisponibilidade de P, embora não seja suficiente para obter elevadas produtividades das culturas comerciais (Rheinheimer et al., 2008b). Assim, quanto mais pobre for o sistema em P disponível, maior será a dependência das formas orgânicas, inclusive do P armazenado na biomassa microbiana (Gatiboni et al., 2008).

O reservatório disponível para a vegetação da floresta durante a estação de crescimento inclui fontes internas de P (ex.: P reabsorvido de material senescente) e das formas de P fracamente ligadas do solo: P_i trocável e P_o prontamente disponível (Frizano et al., 2003).

O mais significativo composto de P nos solos em termos de biodisponibilidade é o ânion ortofosfato, que está associado com a disponibilidade de curto prazo facilmente acessível às plantas, enquanto que para disponibilidade de longo prazo, os compostos orgânicos podem ser degradados para liberar ortofosfato. Derivados de microrganismos e resíduos de plantas e animais, os compostos orgânicos formam parte dos materiais humificados que são estáveis na matriz do solo (Fuentes et al., 2006). O fósforo dos compostos orgânicos torna-se disponível através da hidrólise e mineralização pela biomassa microbiana, que é um processo fundamental para liberação de íons ortofosfatos às plantas (Oehl et al., 2004). Desta forma, o P orgânico pode se constituir em uma importante fonte de P às plantas através de sua mineralização, mediada pelas fosfatases, que catalisam a hidrólise de ésteres de fosfatos, liberando fosfato solúvel (Fernandes et al., 2002). Por outro lado, a susceptibilidade do P_o à hidrólise enzimática é potencialmente uma restrição para a aquisição de P pela planta (Hayes et al., 2000).

Outros mecanismos presentes no ambiente edáfico podem também contribuir para o aumento da disponibilidade de fósforo orgânico às plantas. Segundo Hayes et al. (2000), a exsudação de citrato, que ocorre na rizosfera pelas raízes de inúmeras espécies de plantas, é considerado um importante mecanismo para aumentar a aquisição de P_i . Ao estudar componentes de fósforo orgânico hidrolisados por enzimas, estes autores verificaram que o citrato pode aumentar a disponibilidade de P_o do solo às plantas por solubilização de frações que podem ser hidrolisadas por enzimas.

As micorrizas arbusculares aumentam a absorção de nutrientes pelas plantas, em que o P apresenta maior relevância (Joner, 2000), ao estabelecer

uma relação de simbiose com raízes de plantas que disponibilizam carboidratos ao fungo em troca de nutrientes, já que o fungo consegue explorar maior área de solos pela projeção de suas hifas. Segundo Baláz e Vosátka (1997), a maior extensão de colonização por micorrizas ocorre quando a concentração de P no solo é subótima para o crescimento da planta, e no caso contrário, a restrição à formação de simbiose é frequentemente detectada sob alta disponibilidade de fósforo. Estes mesmos autores relatam que além de bactérias, protozoários e até mesmo as raízes das plantas, os fungos também podem produzir fosfatases que hidrolisam formas orgânicas de fósforo; e que podem estimular a exsudação destas enzimas pelas raízes.

Na literatura há muito sobre os diversos mecanismos de biodisponibilidade de P às plantas. A mineralização do Po tem um papel importante na ciclagem do fósforo (Oehl et al., 2004), e constitui um processo fundamental para disponibilização deste elemento às plantas.

2.5 Efeito da vegetação e dos resíduos orgânicos na disponibilidade de fósforo

A matéria orgânica é um importante reservatório de P que, quando mineralizado pelos microrganismos, é capaz de produzir quantidades de P disponível em curto (meses) e longo (anos ou décadas) prazos (Frizano et al., 2003). Os microrganismos decompõem os materiais adicionados ao solo (ex.: adubos, resíduos de plantas) e mineralizam o Po juntamente com a matéria orgânica do solo; e a incorporação de P dos resíduos pela biomassa microbiana ocorre com alta recuperação de P sobre curtos períodos de tempo (Richardson e Simpson, 2011).

O P é liberado lentamente no solo durante a decomposição da matéria orgânica pelos microrganismos e pode ser absorvido pelas plantas e micorrizas antes de ser fixado, além de os próprios compostos orgânicos reduzirem a fixação dos compostos de P (Brady e Weil, 2013), pois o maior conteúdo de matéria orgânica possibilita a formação de complexos organominerais e complexação de nutrientes pelos radicais orgânicos.

Nwoke et al. (2004) avaliaram no oeste da África o impacto dos resíduos na disponibilidade de P, incluindo resíduos de milho, leguminosas arbóreas e

herbáceas e verificaram que o aumento na acumulação de P devido aos resíduos variaram entre os solos, em média, de 23 a 497%; também observaram correlações significativas entre os conteúdos de Po (em H₂SO₄ e NaHCO₃) dos resíduos com P acumulado e produção de matéria seca. Segundo Hocking (2001), esta relação da fração de Po de resíduo com produção de matéria seca e acumulação de P indica que a mineralização de Po de resíduo contribui consideravelmente para a nutrição de P dos cultivos. Para Nwoke et al. (2004), o efeito dos resíduos na disponibilidade de P é variável e dependente das características do solo tanto quanto da natureza dos resíduos adicionados.

Na literatura, muitos trabalhos mostram o efeito de sistemas de uso da terra que adicionam resíduos ao solo como sistemas agroflorestais e plantio direto, por exemplo, nas formas de fósforo orgânico. Ao estudar as formas de P em sistemas de produção de café no Brasil, Cardoso et al. (2003) encontraram dentro da forma lábil a fração orgânica superior à inorgânica, constituindo cerca de 62% da fração lábil e a porcentagem do fósforo orgânico nos pools lábeis foram superiores nos campos agroflorestais que nos campos de monoculturas. Gatiboni et al. (2007) verificaram que o Po representou a maior porção de P disponibilizada às plantas em sistema de plantio direto com baixas adições de fosfatos, em que as formas orgânicas representaram, em média, 80% do P absorvido. Ao estudarem o fósforo orgânico sob florestas, pastagens e eucalipto, Cunha et al. (2007) mostraram que o Po lábil predominou amplamente sobre a fração inorgânica lábil, em que o Po lábil representou mais de 80% nos solos sob florestas naturais e 65% no solo sob eucalipto.

Os sistemas florestais com eucalipto apresentam grande potencial de produção e acumulação de resíduos (folhas, galhos e casca) ao longo dos ciclos de produção, que mantidos no sistema após a colheita da madeira, podem liberar nutrientes via mineralização que são reabsorvidos pela planta. O P presente nestes resíduos representa quase 60% do P acumulado na parte aérea das plantas de eucalipto (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Bazani et al., 2014), e apresenta taxas de mineralização entre 36 e 50%, no intervalo de um ano (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Rocha, 2014). Assim, estes sistemas podem suprir parte da demanda de P pelas plantas de eucalipto principalmente em ambiente distrófico, em fase avançada de desenvolvimento (Bazani et al., 2014).

O estudo das frações de P em sistemas florestais que possuem grande potencial de acumulação de matéria orgânica no solo, como os plantios de eucalipto, possibilitará maior entendimento da dinâmica do P, principalmente das frações orgânicas, caracterizadas como importantes na disponibilização de P às plantas, em solos altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural, como a maioria dos solos tropicais. Com isso, este estudo contribuirá para o aperfeiçoamento das recomendações e o manejo de fertilizantes fosfatados.

3. TRABALHOS

3.1 FRAÇÕES LÁBEIS E NÃO LÁBEIS DE P NO SOLO EM SÍTIOS DE EUCALIPTO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

RESUMO

O eucalipto constitui a principal espécie em plantios florestais nas regiões tropicais. Sua produção por longos períodos nestas regiões pode ser limitada pela baixa disponibilidade natural de fósforo (P), devido à alta capacidade de fixação de P em solos altamente intemperizados. O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição das frações lábeis e não lábeis de P em plantios de eucalipto em diferentes solos de 11 sítios no estado de São Paulo, Brasil. As amostras de solo foram coletadas na camada 0-20 cm, nas entre linhas de plantio do eucalipto nas parcelas, em solos com diferentes características edafoclimáticas e de manejo. As frações de P foram extraídas sequencialmente pelo método de Hedley. Houve dissimilaridade entre os sítios, com variações significativas dos teores de P para todas as frações. As proporções dos teores totais de P inorgânico (Pi) e P orgânico (Po) em relação ao P total extraído foram similares, em torno de 30%, para cada (sem somar P residual ao Pi total). O teor médio de P lábil (Pi-resina + Pi-NaHCO₃ + Po-NaHCO₃) foi 43,4 mg kg⁻¹ (~9% do P total), onde a fração

orgânica (Po-NaHCO₃) predominou sobre as inorgânicas (Pi-resina + Pi-NaHCO₃), correspondendo ~58% do P lábil total. As frações Po-NaOH e Po-NaOH+ultrassom apresentaram altas correlações com carbono (C). A fração Pi-NaHCO₃ apresentou maior efeito direto positivo (D = 1,98) e a fração Pi-NaOH maior efeito direto negativo (D = -1,22) sobre a fração de Pi-resina. As frações Pi e Po em NaHCO₃ atuaram como fonte e as frações Pi e Po em NaOH como dreno de P à fração de Pi-resina. O fracionamento de P possibilitou avaliar as frações de P de diferentes disponibilidades às plantas, o que não pode ser observado em uma análise de rotina de fertilidade, além de evidenciar o potencial da fração Po lábil, de rápida mineralização, como fonte de P às plantas.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo de Hedley, sistemas florestais, relação fonte-dreno, propriedades físico-químicas do solo.

ABSTRACT

LABILE AND NON-LABILE PHOSPHORUS FRACTIONS OF SOIL IN SITES OF EUCALYPT IN SÃO PAULO STATE, BRAZIL

The eucalypt constitutes the principal species in forest plantations in the tropics. Its production for long-term in these areas may be limited by the low natural availability of phosphorus (P), due to the high P fixation capacity in highly weathered soils. The aim of this study was to evaluate the distributions of the labile and non-labile P fractions in eucalypt plantations, in different soils from 11 sites in the state of São Paulo, Brazil. Soil samples were collected at 0-20 cm layer, between the lines of planting eucalypt in the plots, in soils with different soil, climate and management characteristics. The P fractions were extracted sequentially by Hedley method. There was dissimilarity among the sites with significant variations in the levels of P for all fractions. The proportions of the total content of inorganic P (Pi) and organic P (Po) in relation to the total P extracted were similar, around 30%, for each (without adding residual P to the total Pi). The

average content of labile P (resin-Pi + NaHCO₃-Pi + NaHCO₃-Po) was 43.4 mg kg⁻¹ (~ 9% of total P), on which the organic fraction (NaHCO₃-Po) predominated over inorganic (resin-Pi + NaHCO₃-Pi) corresponding ~ 58% of total labile P. The NaOH-Po and NaOH-Po + ultrasound fractions showed strong correlations with carbon (C). The NaHCO₃-Pi fraction presented the highest positive direct effect (D = 1.98) and NaOH-Pi fraction the greatest negative direct effect (D = -1.22) over resin-Pi fraction. The NaHCO₃ Pi and Po fractions acted as source, and Pi and Po fractions in NaOH as sink of P to resin-Pi fraction. With the fractionation of P was possible to evaluate the fractions with different availabilities to plants, which can not be observed in a routine analysis fertility, besides evidencing the potential of labile Po, rapid mineralization, as P source to plants.

Keywords: Hedley phosphorus fractionation, forestry systems, source-sink relationship, physical-chemical soil properties.

INTRODUÇÃO

O eucalipto com mais de 20 milhões de hectares plantados em mais de 90 países (Booth, 2013), tem apresentado cada vez mais um importante papel na demanda mundial por produtos madeireiros e já representam 8% das áreas de florestas plantadas produtivas mundialmente, com um terço nos trópicos (Laclau et al., 2013). O Brasil conta com 7,6 milhões de hectares de florestas plantadas, onde 72% são do gênero *Eucalyptus* e é responsável por 17% da madeira colhida mundialmente (Bazani et al., 2014). Algumas características do gênero *Eucalyptus* como rápido crescimento, alta produtividade e adaptabilidade a diversas condições de clima e solo, com tolerância a acidez, toxidez por Al e baixa saturação por bases, justificam tamanha representatividade do eucalipto nos plantios florestais do Brasil e do mundo.

A fertilização dos plantios de eucalipto no Brasil é geralmente realizada durante os estágios iniciais de estabelecimento, onde se observam respostas mais frequentes e significativas à aplicação de P (Gonçalves et al., 2013). A limitação por nutrientes nos plantios tem aumentado em função do crescente uso

de solos de baixa fertilidade natural, como os do cerrado brasileiro, o que aumenta a demanda por fertilizantes. Apesar da necessidade de uso de fertilizantes e das grandes quantidades aplicadas em sistemas com eucalipto em décadas recentes, a limitação de suas aplicações está se tornando necessária por fatores econômicos e ambientais (Laclau et al., 2010). A adubação fosfatada representa, aproximadamente, 25% dos custos dos plantios de eucalipto (Bazani et al., 2014). Considerado um recurso finito e oneroso, o P tem impacto significativo nos custos de formação dos plantios e o esgotamento de suas fontes no mundo está entre os principais fatores que afetam a sustentabilidade dos plantios (Laclau et al., 2013).

Conhecido por limitar a produtividade primária das florestas naturais tropicais (Turner e Engelbrecht, 2011), o P é o principal fator nutricional limitante ao desenvolvimento de plantios florestais de eucalipto no Brasil. Esse problema ocorre principalmente em solos altamente intemperizados, como a maioria dos solos tropicais e subtropicais, caracterizada por baixos conteúdos de P total e disponível e, a alta capacidade de fixação de P nestes solos. O P é encontrado nos solos nas formas inorgânicas (P_i) e orgânicas (P_o), e de acordo com seu grau de estabilidade ou solubilidade, apresentam diferentes disponibilidades de absorção pelas plantas. O P_i pode ser encontrado em solução (P-solução) e fixado, através dos fenômenos de adsorção com óxidos de Fe e Al da fração argila, estabelecendo ligações do tipo fraca (P lábil) ou forte (P moderadamente lábil) com estes óxidos e, precipitado com Al, Fe e Ca, constituindo formas insolúveis (P não lábil). O P_o é formado pelos íons fosfatos, ligados aos compostos orgânicos e sua labilidade está diretamente relacionada à suscetibilidade de decomposição do radical orgânico que o fosfato está ligado (Gatiboni et al., 2008). Em sistemas naturais ou em solos com baixa ou nenhuma adição de P, a disponibilidade do elemento está diretamente relacionada à ciclagem das formas orgânicas (Cunha et al., 2007; Turner, 2008; Zaia et al., 2008; Vincent et al., 2010). Assim, o solo pode exercer papel de fonte de P, quando apresenta reservas de P disponível às plantas, ou dreno de P quando parte do fertilizante adicionado é fixado, caracterizando a competição com a planta pelo P disponível.

A complexa dinâmica desse nutriente nas condições tropicais justifica estudos mais aprofundados das relações entre suas frações buscando um melhor

entendimento das transformações de P que ocorrem nestes solos. Hedley et al. (1982) desenvolveram um método de fracionamento sequencial que extrai as frações inorgânicas e orgânicas de P do solo, baseado na solubilidade química. Este método permite distinguir as frações lábeis das não-lábeis, além de identificar as frações estáveis e as frações orgânicas, em ordem decrescente de disponibilidade à planta. Com base nesta extração, o P pode ser classificado como disponível às plantas ou microrganismos (P lábil) que inclui a soma de P_i e P_o extraídos em resina e bicarbonato, enquanto que as formas refratárias ou não lábeis de P incluem a soma das demais frações (P_i e P_o em hidróxido e em hidróxido + ultrassom, P_i em HCl e P residual por digestão sulfúrica) (Cross e Schlesinger, 1995). Em uma revisão sobre o uso do fracionamento de Hedley, contrastando agroecossistemas de climas tropicais e temperados, com diferentes usos e manejos de solo, Negassa e Leinweber (2009) relataram que as frações inorgânicas e orgânicas de P podem atuar como fonte ou dreno do P disponível às plantas, em função de diversos fatores como clima, manejo do solo e fertilização.

Apesar de a literatura evidenciar o potencial do método de fracionamento de Hedley em estudos que envolvam a dinâmica de P no solo (Tiessen et al., 1984; Guo e Yost, 1998; Cardoso et al., 2003; Frizano et al., 2003; Gatiboni et al., 2007; Souza et al., 2007; Negassa e Leinweber, 2009; Gatiboni et al., 2013; Gama-Rodrigues et al., 2014), há uma escassez de estudos em solos tropicais sob plantações de eucalipto. O objetivo deste estudo foi avaliar a distribuição das frações lábeis e não lábeis de P em plantios de eucalipto em diferentes solos de 11 sítios no estado de São Paulo, Brasil. Especificamente, foram avaliados: (1) a distribuição das frações lábeis e não-lábeis de P; (2) as relações entre as frações de P e as características físicas e químicas dos solos; (3) a contribuição das frações lábeis e não lábeis sobre o P disponível do solo, através da relação fonte-dreno.

MATERIAL E MÉTODOS

Sítios de estudo

O estudo foi realizado em sistemas florestais com eucalipto em 11 sítios de diferentes condições edafoclimáticas e de manejo, distribuídos em nove municípios do estado de São Paulo (Tabela 1). Nas áreas experimentais, onde são realizados diversos ensaios de fertilização, foram selecionadas parcelas com e sem fertilização de P no plantio. Para efeito de estudo todas as áreas foram consideradas não fertilizadas a base de P, já que a amostragem de solo foi feita nas entre linhas de plantio, logo não sofreu influência da adubação em sulco de plantio.

Caracterização físico-química do solo

Em cada sítio foram coletadas dez amostras simples de solo em cada parcela experimental (3 parcelas por sítio) na profundidade de 0–20 cm em um transecto diagonal à área útil das parcelas, nas entre linhas de plantio, em 2010. As amostras simples deram origem a uma amostra composta por parcela, que foi seca ao ar, homogeneizada, destorroada e passada em peneira de 2 mm. Estas amostras foram usadas para a caracterização físico-química e determinação das frações de P. A caracterização química (Raij et al., 2001) e física (Embrapa, 1999) dos solos é mostrada na tabela 2. Verifica-se que os sítios apresentaram grande variabilidade nas propriedades físico-químicas. Os solos foram caracterizados como muito ácidos; os teores de K e Ca são considerados inadequados para a maioria dos sítios e os teores de Mg adequados para todos os sítios, para uma produtividade de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com base nos níveis críticos para eucalipto (Barros e Novais, 1999). O baixo nível de bases (Ca e K) e a elevada acidez potencial (H+Al) refletiram em níveis de saturação por bases (V%) abaixo do ideal (30%), para a maioria dos sítios, apesar da saturação por alumínio (m) está dentro do máximo tolerável para o eucalipto (45%), para a maioria dos sítios (Alvarez V. e Ribeiro, 1999).

Tabela 1 - Composição dos arranjos experimentais, com espécies, espaçamentos, área útil de parcela, plantas por parcela, tipo de clima segundo a classificação de Köppen, temperatura (T) e precipitação (PP) médias anuais, tipo e textura do solo e, idade do povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios*	Espécie	Espaçamento (m)	Área útil (m ²)	Plantas por parcela	Clima ⁽¹⁾	T (°C)	PP (mm)	Solo ⁽²⁾	Textura	Idade (anos)
AG	<i>Eucalyptus grandis</i> (G-232)	3,0 x 2,0	144	24	Aw	21,6	1170	LVd	média	3,0
ANG	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	216	36	Cwa	20,6	1262	RQ	arenosa	2,0
BOT	<i>E. grandis</i> (G-232)	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,2	1302	RQ	arenosa	3,0
ITA	<i>E. grandis</i> (Suz.)	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	19,9	1308	LVAAd	média	4,0
ALT ⁽³⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,5	180	24	Aw	20,7	1517	RQ	arenosa	7,0
CB1 ⁽⁴⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 3,0	360	40	Cwa	20,1	1210	LAd	argilosa	9,0
CB2 ⁽⁵⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,1	1210	LVd	muito argilosa	1,4
CB3 ⁽⁶⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,1	1210	CXBd	média	1,6
PA ⁽⁷⁾	<i>E. grandis</i> (Parb.)	3,0 x 2,5	180	24	Cwa	20,8	1249	LVAAd	argilosa	11,0
VOT ⁽⁸⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	96	16	Cwa	21,3	1287	PVAd	muito argilosa	1,8
SMA ⁽⁹⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	216	36	Cwa	20,4	1174	LVAAd	muito argilosa	2,0

*Representado pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo. ⁽¹⁾ Aw significa clima tropical com estação seca de inverno e temperaturas médias no mês mais frio do ano superior a 18°C e Cwa significa clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. ⁽²⁾ Conforme EMBRAPA (1999): LVd = Latossolo Vermelho distrófico, RQ = Neossolo Quartzarênico, LAd = Latossolo Amarelo distrófico, CXBd = Cambissolo Háplico distrófico, LVAAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Seis sítios receberam adubação de NPK no plantio, com aplicação de ⁽³⁾123 kg ha⁻¹, ⁽⁴⁾290 kg ha⁻¹, ⁽⁵⁾183 kg ha⁻¹, ⁽⁶⁾183 kg ha⁻¹, ⁽⁷⁾120 kg ha⁻¹, e ⁽⁸⁾183 kg ha⁻¹ da fórmula 04-28-06. ⁽⁹⁾O sítio SMA apresentou histórico de uso com adubação fosfatada (cultura da batata). Os sítios AG e BOT receberam adubação com aplicação de 15 kg ha⁻¹ de N e K₂O, e 18 kg ha⁻¹ de N e K₂O, respectivamente, além de 13% de S e 10% de B, em cada sítio. Foi também realizada adubação complementar no plantio com outros elementos para os sítios CB1 (0,3% de B), CB2 (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn), CB3 (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn), PA (2,4% de Mg) e VOT (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn). Ainda foi realizada adubação de cobertura nos sítios CB1 aos 3 e 9 meses (8 kg ha⁻¹ de B); CB2 aos 3 meses (~41 kg de K₂O e 1,5% de B), 6 meses (~36 kg de K₂O, 0,5% de B e 1% de Zn) e 12 meses (~35 kg de K₂O, 0,7% de B e 1% de Zn); CB3 aos 3 meses (~40 kg de K₂O e 1,5% de B), 6 meses (~75 kg de K₂O, 0,5% de B e 1% de Zn) e 12 meses (~60 kg de K₂O, 0,7% de B e 1% de Zn); e VOT aos 3 meses (~41 kg de K₂O e 0,3% de B e 1% de Zn) e 9 meses (~126 kg de K₂O e 1,5% de B).

Fracionamento de P do solo

As frações de P do solo foram extraídas sequencialmente usando o método de Hedley (Hedley et al., 1982) com modificações, que separam o P do solo em cinco frações inorgânicas, três orgânicas e uma residual. O fracionamento foi realizado com resina (P disponível), NaHCO_3 (fração orgânica e inorgânica de P lábil), NaOH (fração orgânica e inorgânica de P pouco ou moderadamente lábil), NaOH + ultrassom (fração orgânica e inorgânica de P retida no interior dos agregados – P ocluso), HCl (P ligado ao Ca, oriundo de material primário) e uma digestão com $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ (P residual – não lábil). Considerou-se o P lábil a soma das frações $\text{Pi-resina} + \text{Pi}$ e Po em NaHCO_3 .

A determinação sequencial das frações de P inorgânico (Pi) obedeceu a seguinte ordem: (1) Pi-resina – extraído com 10 mL de água deionizada e uma tira de resina (1 x 5 cm, ANION 204UZRA) em um agitador horizontal a 120 rpm por 16 horas. Depois a resina foi retirada e colocada em tubo falcon de 15 ml e adicionado 10 ml de HCl 0,5 mol L^{-1} que após agitação e repouso, o extrato foi usado para determinação do P; (2) Pi-NaHCO_3 – o solo da etapa anterior foi centrifugado a 6000 rpm por 20 minutos e o sobrenadante descartado, então adicionou-se 10 mL do extrator NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} a pH 8,5 e seguiu para agitação por 16 horas em agitador horizontal a 120 rpm; logo após, o extrato foi centrifugado a 6000 rpm por 20 minutos, reservou o sobrenadante (extrato), sendo depois adicionado ao extrato mais 5 ml de NaCl 0,5 mol L^{-1} proveniente de mais uma agitação a 6000 rpm por 5 minutos com solo, completando o volume final; (3) Pi-NaOH – extraído com 10 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1} que seguiu as mesmas etapas subsequentes usadas na extração com bicarbonato; (4) Pi-NaOH+ultrassom – extraído com 10 mL de NaOH 0,1 mol L^{-1} que seguiu as mesmas etapas subsequentes usadas na extração anterior, mas as amostras nos tubos falcon de 15 mL foram submetidas ao ultrassom por 2 minutos (modelo: USC-1800A, frequência US: 40KHz, potência US: 153W), antes da agitação de 16 horas; (5) Pi-HCl – extraído com a adição de 10 mL de HCl 1,0 mol L^{-1} que seguiu as mesmas etapas com agitação e centrifugação ocorridas para o bicarbonato; (6) No solo remanescente, após todas as extrações, foi feita uma digestão $\text{H}_2\text{SO}_4+\text{H}_2\text{O}_2$, a 200 °C, determinando-se a fração P-residual. Para determinação de P total (Pt) nos extratos de NaHCO_3 0,5 mol L^{-1} , NaOH 0,1 mol L^{-1} e NaOH 0,1 mol L^{-1} + ultrassônico foi retirada uma alíquota e adicionado 1 mL

de H_2SO_4 24mol L^{-1} e 10 ml de $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ a 7,5% que foi autoclavado a 121°C e 103 KPa por 3 horas e, após resfriamento, o volume foi completado para 20 ml com água destilada. Nos extratos provenientes das diferentes extrações foram determinadas as frações Pi e P residual, pelo método colorimétrico de Murphy e Riley (1962) após o ajuste do pH, usando p-nitrophenol como indicador. As frações Pt pelo método colorimétrico de Dick e Tabatabai (1977). O P orgânico foi calculado por diferença entre a concentração de Pt e Pi em cada extrato ($\text{Po} = \text{Pt} - \text{Pi}$). As frações orgânicas foram denominadas Po-NaHCO_3 , Po-NaOH e Po-NaOH+ultrassom .

Tabela 2 – Caracterização física e química do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios	Argila	C	P ¹	pH	K	Ca	Mg	m	T	V
	g kg ⁻¹	g dm ⁻³	mg kg ⁻³	CaCl ₂	————	————	mmolc dm ⁻³	————	————	%
AG	167	12,2	3,98	3,9	4,8	4,8	2,4	52,2	70,7	17,0
ANG	100	10,4	8,46	4,0	0,6	5,0	2,5	44,5	47,0	17,0
BOT	100	8,7	8,33	4,0	0,4	4,0	5,0	36,9	49,5	25,0
ITA	193	11,0	2,38	2,6	0,9	2,1	2,4	67,8	65,6	8,0
ALT	67	11,6	6,20	4,3	0,3	11,0	4,0	20,7	58,0	28,0
CB1	478	16,2	1,38	3,9	1,2	1,7	2,3	78,2	94,9	5,0
CB2	653	20,3	1,36	4,4	2,7	15,2	9,3	31,8	107,3	25,0
CB3	272	12,8	3,47	4,1	1,4	9,9	9,5	43,9	102,5	21,0
PA	365	12,2	2,13	4,1	1,9	6,8	4,2	33,8	58,0	22,0
VOT	670	29,0	2,20	4,0	5,0	5,0	2,1	58,4	125,6	9,0
SMA	651	25,5	26,69	4,9	3,0	41,8	14,8	2,1	100,1	40,0

* Sítios representados pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo; ¹P Mehlich-1; m - Saturação por alumínio; T - Capacidade de troca de cátions a pH 7; V - Saturação por bases.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors, onde se verificou distribuição normal das variáveis analisadas. Em seguida foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e o teste de agrupamento de médias, Scott & Knott em nível de 5% de probabilidade.

Os dados foram também submetidos à análise de componentes principais (ACP), que permitiu a criação de um diagrama (gráfico) que reflete a variação multidimensional dos dados avaliados, com ordenação das variáveis em eixos de

acordo com sua similaridade. Na ACP, a direção e o comprimento das setas mostram a qualidade da correlação entre as frações e entre as frações e os componentes (Fontes et al., 2014), de forma que frações (setas) com ângulos estreitos são fortemente correlacionadas e com ângulos perpendiculares não mostram correlação (Zaia et al., 2012). Desta forma, foram obtidos três componentes, considerados significantes (autovalores > 1 ; carga fatorial $\geq 0,60$ no primeiro componente) (Hair Jr et al., 2009), porém foram usados apenas os dois primeiros componentes, para facilitar a interpretação do gráfico bi-dimensional e também porque o componente 3 explicou menos de 7% da variância total dos dados analisados.

As relações entre todas as frações de P e, das frações de P com as propriedades físicas e químicas do solo foram determinadas pelo coeficiente de correlação de Pearson. A análise de regressão múltipla foi usada com a fração Pi-resina como variável dependente e as demais frações como variáveis independentes. As frações de P do solo (variáveis independentes) que não contribuíram significativamente para a estimação da fração de Pi-resina a $P \leq 0,05$ foram eliminadas usando regressão “backward”. O ajuste do modelo foi medido pelo coeficiente de determinação (R^2), pela significância da regressão e pelos coeficientes β dos efeitos diretos das variáveis independentes (preditores) (Gama-Rodrigues et al., 2014). A análise de trilha foi usada apenas para as variáveis selecionadas por meio da regressão múltipla “backward”. Considerada uma extensão da regressão múltipla, a análise de trilha estima a força das relações causais, por efeitos diretos e indiretos, entre as variáveis (Lleras, 2005) e, pode então definir as frações de P que atuam como fonte ou dreno de P à fração Pi-resina. Para a análise de regressão múltipla foi usado o programa SAEG 9.1 (SAEG Inst. Inc.) e para análise de trilha o programa GENES 4.1 (GENES Inst. Inc.).

RESULTADOS

Distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P

De acordo com a análise de componentes principais (ACP) houve alta

dissimilaridade entre os sítios florestais, com formação de sete grupos distintos (Figura 1). Os sítios ALT, CB3, VOT e SMA, constituíram grupos individuais. Os sítios AG e ITA constituíram um único grupo da mesma forma que CB2 e PA, enquanto o maior grupo foi formado pelos sítios ANG, CB1 e BOT. Os componentes 1 (62,84%) e 2 (23,47%) explicaram 86,31% da variação total dentro do conjunto de dados. As variáveis mais associadas ao componente 1, em ordem decrescente de cargas fatoriais, foram Pi-NaOH (0,99), Pi-NaHCO₃ (0,96), Pi-NaOH+ultrassom (0,95), Po-NaOH (0,93), Pi-resina (0,92), e P-residual (0,84). As frações Po-NaOH+ultrassom e Po-NaHCO₃ estiveram estreitamente associadas ao componente 2 com cargas fatoriais de 0,91 e 0,81, respectivamente, e pouco contribuíram para a dissimilaridade entre os sítios (Figura 1), assim como a fração Pi-HCl que teve fraca associação aos dois primeiros componentes.

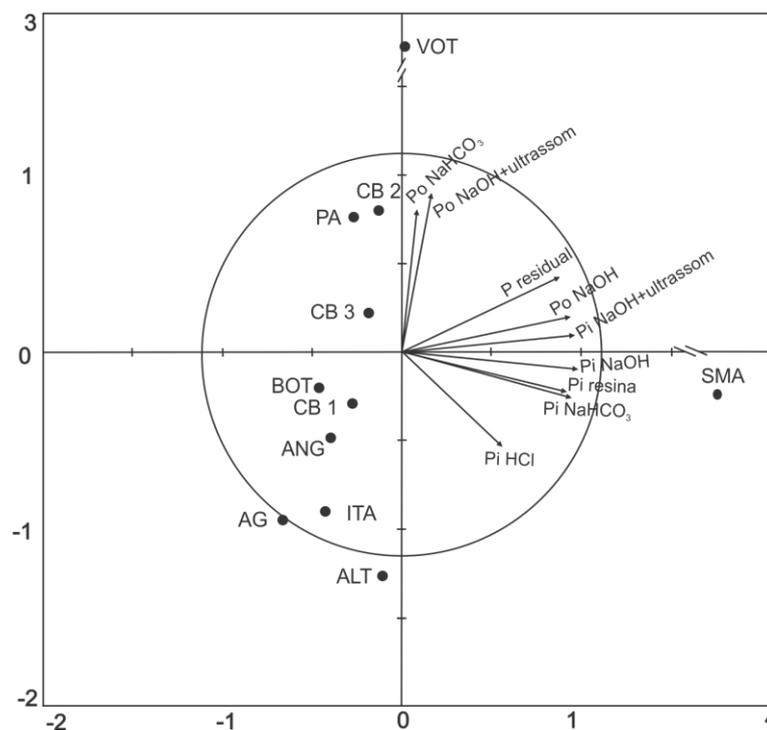


Figura 1 – Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais das frações de P do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto. Representação dos sítios: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo.

Houve uma ampla variação dos teores de todas as frações de P entre os sítios (Tabela 3). Destaca-se o sítio SMA onde ocorreram as maiores concentrações de P para a maioria das frações, à exceção das frações Po-NaHCO₃ e Po-NaOH+ultrassom. Apesar de os sítios apresentarem variações entre as frações orgânicas e inorgânicas, no geral, as proporções relativas dos totais de Pi e Po foram similares, com valores em torno de 30% para cada, na maioria dos sítios (Figura 2). Não foi considerado P residual para a composição do Pi total. O P geoquímico (Pi total + P residual) foi em torno de ±70% do P total extraído.

Houve grande variabilidade da distribuição relativa das frações de P entre os sítios (Figura 3). O P lábil (Pi-resina + Pi e Po em NaHCO₃) representou de 6,2 a 15,9% do P total do solo. O Po lábil representou em média 58,35% de P lábil total. As maiores proporções nos teores de P foram encontradas nas frações de disponibilidade intermediária (P extraído em NaOH) e não disponível (P-residual). O P-NaOH (Pi+Po) correspondeu de 28 a 44,5% do P total, enquanto que o P-residual variou de 32,2 a 46% do P total (Tabela 3; Figura 3). O P ocluso (Pi e Po em NaOH+ultrassom), considerado aqui como o P retido no interior dos agregados (não-lábil) variou de 6 a 19,3% do P total, enquanto o P de mineral primário, representado pela fração Pi-HCl (P ligado ao Ca) apresentou os menores teores de P entre os sítios, com valores entre 0,3 a 2,9%.

Tabela 3 – Teores de P no solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios	Pi	Pi	Po	Pi	Po	Pi	Po	Pi	P
	Resina	NaHCO ₃	NaHCO ₃	NaOH	NaOH	NaOH+U	NaOH+U	HCl	Residual
	mg kg ⁻¹								
AG	3,41 E	4,38 D	19,12 C	44,95 E	33,76 G	7,67 F	5,55 C	3,38 C	81,87 H
ANG	8,50 B	12,91 B	23,56 B	53,54 D	59,08 E	7,34 F	15,99 B	3,06 D	98,28 G
BOT	6,93 C	6,95 C	26,70 B	52,19 D	59,21 E	7,93 F	17,57 B	3,60 C	108,69 G
ITA	2,45 F	6,39 C	17,88 C	47,16 E	61,99 E	12,25 E	13,33 B	6,23 B	142,29 F
ALT	5,23 D	8,24 C	22,59 B	83,10 B	19,88 H	10,86 E	8,53 C	10,48 A	150,86 F
CB1	2,79 F	2,81 E	20,99 C	73,24 C	78,51 D	43,28 B	17,96 B	3,68 C	169,91 E
CB2	4,29 D	2,12 F	25,80 B	76,13 C	98,03 C	52,03 B	46,49 A	3,24 C	214,59 C
CB3	4,96 D	7,19 C	35,04 A	79,27 C	79,25 D	18,08 D	17,02 B	6,55 B	165,90 E
PA	5,22 D	7,43 C	25,76 B	84,49 B	38,26 F	26,32 C	58,40 A	3,97 C	188,58 D
VOT	3,48 E	4,40 D	38,23 A	73,87 C	166,80 B	49,57 B	67,68 A	2,55 E	332,29 B
SMA	25,96 A	62,96 A	23,05 B	256,30 A	323,41 A	157,58 A	24,32 B	9,19 A	419,39 A
Média	6,66	11,43	25,34	84,02	92,56	35,72	26,62	5,08	188,42

Grupos de médias com letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste Scott & Knott em nível de 5% de probabilidade; AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo; U = Ultrassom.

Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos

Houve correlações positivas e significativas entre quase todas as frações de P, à exceção das frações Po-NaHCO₃, Pi-HCl e Po-NaOH+ultrassom (Tabela 4). Estes resultados corroboraram os resultados observados na ACP, onde é possível observar que as frações fortemente associadas ficaram no componente 1 e as demais frações ficaram no componente 2 (Po-NaHCO₃ e Po-NaOH+ultrassom), ou no componente 3 (Pi-HCl) (Figura 1). Com as propriedades do solo houve correlações significativas e negativas das frações inorgânicas de P lábil (Pi-resina e Pi-NaHCO₃) e moderadamente lábil (Pi-NaOH) com a saturação com alumínio (m) (Tabela 5). As frações Po-NaOH, Pi-NaOH+ultrassom, Po-NaOH+ultrassom e P residual correlacionaram-se positiva e significativamente com os teores de argila e carbono orgânico (C) do solo. As frações lábeis inorgânicas de P (Pi-resina e Pi-NaHCO₃), as frações moderadamente lábeis (Pi-NaOH e Po-NaOH) e a fração Pi-NaOH+ultrassom estiveram positivamente associadas com a soma de bases (SB).

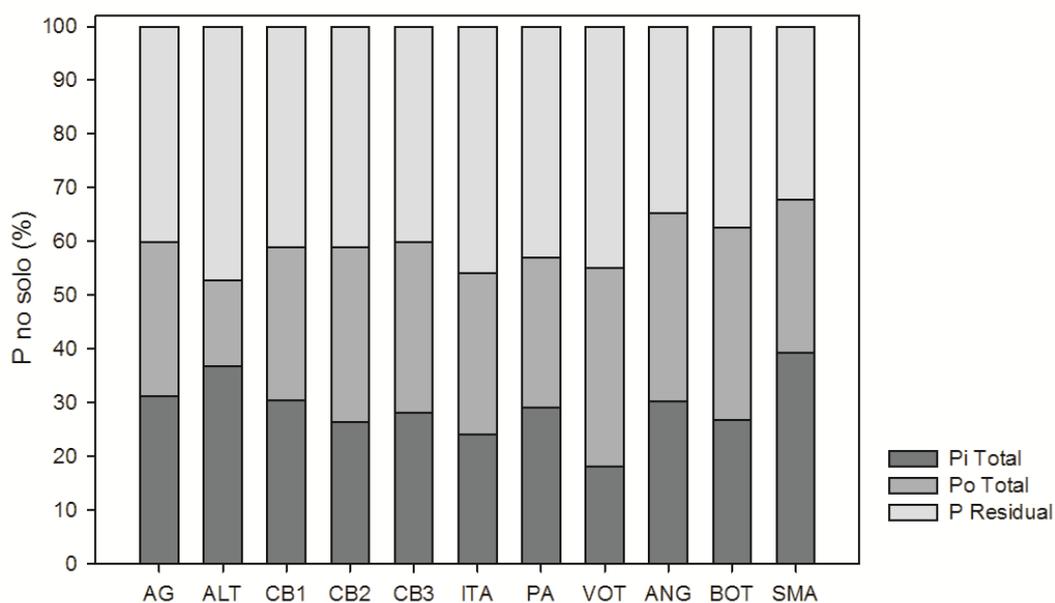


Figura 2 – Distribuição das frações de P orgânico total, P inorgânico total e P residual no solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto. Representação dos sítios: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo.

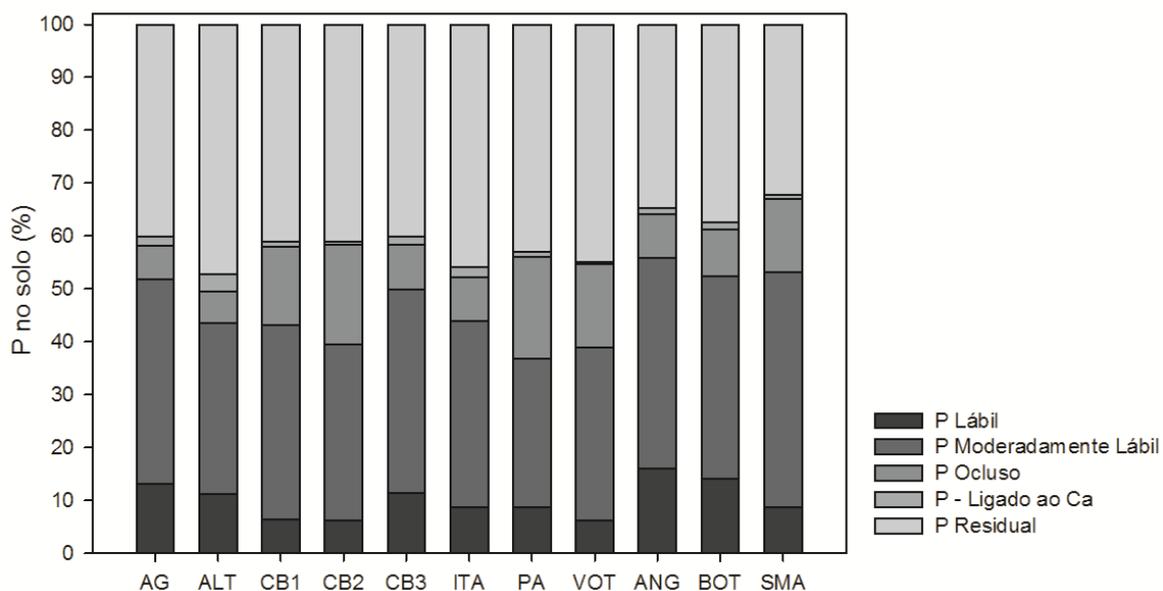


Figura 3 – Distribuição relativa das frações de P no solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto. Representação dos sítios: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo. P lábil (Pi-resina + Pi e Po em NaHCO₃), P moderadamente lábil (Pi e Po em NaOH), P ocluso (Pi e Po em NaOH+Ultrassom), P ligado ao Ca (Pi HCl) e P residual.

Tabela 4 – Matriz de correlações entre as frações de P do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

	Pi Resina	Pi NaHCO ₃	Po NaHCO ₃	Pi NaOH	Po NaOH	Pi NaOH+U	Po NaOH+U	Pi HCl	P Residual
Pi Resina	1	0,98***	-0,08	0,93***	0,82**	0,84**	-0,06	0,47	0,65*
Pi NaHCO ₃		1	-0,13	0,95***	0,85**	0,86***	-0,08	0,53	0,69*
Po NaHCO ₃			1	0,01	0,21	0,05	0,60	-0,20	0,37
Pi NaOH				1	0,88***	0,94***	0,09	0,55	0,82**
Po NaOH					1	0,95***	0,26	0,26	0,92***
Pi NaOH+U						1	0,25	0,33	0,90***
Po NaOH+U							1	-0,40	0,53
Pi HCl								1	0,27
P Residual									1

Valores de r significativos em nível de * 5% ** 1% e *** 0,1% de probabilidade; U = Ultrassom.

Regressão múltipla e análise de trilha

As frações Pi e Po em NaHCO₃, Pi e Po em NaOH e Pi-NaOH+ultrassom foram significativas para predição da fração Pi-resina no modelo de regressão

múltipla “backward”, com coeficiente de determinação (R^2) de 0,98 e um resíduo (U) de 0,11 (Tabela 6). A decomposição dos coeficientes de correlação entre a fração Pi-resina e as frações de P, selecionadas por análise de regressão “backward”, baseada em efeitos diretos e indiretos da análise de trilha, é mostrada na tabela 7.

Tabela 5 – Matriz de correlações entre as frações de P e as propriedades físicas e químicas do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

	Argila	C	pH	SB	m	T
Pi Resina	0,30	0,38	0,61*	0,88***	-0,73*	0,09
Pi NaHCO ₃	0,32	0,41	0,52	0,87***	-0,66*	0,13
Po NaHCO ₃	0,36	0,45	0,28	0,06	-0,04	0,55
Pi NaOH	0,52	0,57	0,64*	0,93***	-0,68*	0,34
Po NaOH	0,71*	0,80**	0,49	0,84**	-0,43	0,59
Pi NaOH+U	0,75**	0,75**	0,58	0,89***	-0,51	0,54
Po NaOH+U	0,69*	0,61*	0,21	0,09	-0,04	0,48
Pi HCl	-0,15	-0,02	0,22	0,50	-0,57	-0,07
P Residual	0,83**	0,90***	0,50	0,76**	-0,41	0,69*

Valores de r significativos em nível de * 5%, ** 1% e *** 0,1% de probabilidade; U – Ultrassom; SB – Soma de bases; m - Saturação por alumínio; T – Capacidade de troca de cátions a pH 7.

Tabela 6 – Regressão múltipla de Pi-resina com frações de P do solo.

	Coefficientes de regressão	β (efeitos diretos)
Pi NaHCO ₃	0,760122 ($P < 0,01$)	1,98
Po NaHCO ₃	0,359869 ($P < 0,05$)	0,34
Po NaOH	-0,834404 ($P < 0,05$)	-1,08
Pi NaOH+Ultrassom	0,195551 ($P < 0,05$)	1,29
Pi NaOH	-0,137231 ($P < 0,05$)	-1,22

$R^2 = 0,98$ ($P < 0,001$); U = 0,11

Todas as frações mostraram efeitos significativos diretos positivos (Pi e Po em NaHCO₃ e Pi-NaOH+ultrassom) e negativos (Pi e Po em NaOH) sobre a fração Pi-resina. A fração Pi-NaHCO₃ apresentou o maior efeito direto positivo (D = 1,98) e a fração Pi-NaOH o maior efeito direto negativo (D = -1,22) sobre a fração Pi-resina. A influência indireta dessas frações sobre Pi-resina ocorreu de forma positiva e significativa via Pi-NaHCO₃ (Pi e Po em NaOH e Pi-NaOH+ultrassom) e via Pi-NaOH+ultrassom (Pi-NaHCO₃, Pi e Po em NaOH); já os efeitos indiretos negativos e significativos ocorreram via Pi-NaHCO₃ (Po-

NaHCO₃), via Pi-NaOH (Pi-NaHCO₃, Po-NaOH e Pi-NaOH+ultrassom) e, via Po-NaOH (Pi e Po em NaHCO₃, Pi-NaOH e Pi-NaOH+ultrassom) (Tabela 7).

Tabela 7 – Efeitos diretos (diagonal, negrito) e indiretos (fora da diagonal) das frações de P do solo sobre o Pi-resina.

	Pi NaHCO ₃	Po NaHCO ₃	Pi NaOH	Po NaOH	Pi NaOH+Ultrassom	r
Pi NaHCO ₃	1,98*	-0,04	-1,16*	-0,91*	1,11*	0,98***
Po NaHCO ₃	-0,25*	0,34*	<0,01	-0,23*	0,06	-0,08
Pi NaOH	1,88*	0,00	-1,22*	-0,95*	1,22*	0,92***
Po NaOH	1,67*	0,07	-1,07*	-1,08*	1,23*	0,82**
Pi NaOH + Ultrassom	1,70*	0,02	-1,15*	-1,03*	1,29*	0,83**

Significativo a * $P < 0,05$; ** $P < 0,01$; *** $P < 0,001$; $R^2 = 0,98$; $U = 0,11$.

DISCUSSÃO

Distribuição das frações orgânicas e inorgânicas de P

A elevada dissimilaridade entre os sítios de eucalipto pela análise de componentes principais observada na figura 1 foi devida à especificidade dos sítios, com grande variabilidade das características edáficas e de manejo (Tabela 1, Tabela 2, Tabela 3). Os sítios que apresentaram os maiores teores de argila, também apresentaram os maiores teores de C (Tabela 2), dada a estreita relação entre estes elementos no solo ($r = 0,90$; $p < 0,001$). E nesses sítios foram observados os maiores teores de Po total, evidenciando as fortes relações entre P orgânico com C do solo (Cunha et al., 2007; Turner e Engelbrecht, 2011).

O sítio SMA apresentou as maiores concentrações de P para a maioria das frações em função do histórico de uso com adubações fosfatadas (cultura da batata), antes da implantação do sistema com *Eucalyptus* spp. O teor médio de Pi-resina de 6,6 mg kg⁻¹ está dentro da faixa de valores observados na literatura para solos tropicais de baixa fertilidade natural e não fertilizados, os quais apresentam teores nesta fração inferiores a 10 mg kg⁻¹ (Friesen et al., 1997; Cardoso et al., 2003; Araújo et al., 2004; Gatiboni et al., 2007; Gama-Rodrigues et al., 2014). A dominância do P orgânico sobre o inorgânico para as frações em NaHCO₃ e NaOH, na maioria dos sítios, tem grande importância na

disponibilidade de P às plantas para os sítios avaliados. Pois, em solos de baixa fertilidade, com pouca ou nenhuma adição de fertilizantes fosfatados, as formas orgânicas de P são as principais fontes de P às plantas (Tiessen et al., 1984; Gatiboni et al., 2007; Rheinheimer et al., 2008). Guo e Yost (1998) consideram que a labilidade de P ocorre em escala temporal para todas as frações, de maneira que em longo prazo todo o P do solo pode tornar-se lábil.

As frações orgânicas mantiveram proporções semelhantes às inorgânicas, com aproximadamente 30% do P total para cada, dentro da faixa encontrada em regiões tropicais para diversas classes de solos e sistemas de uso, com valores médios de Po total de ~ 26% (Araújo et al., 2004; Cunha et al., 2007; Dieter et al., 2010; Turner e Engelbrecht, 2011; Xavier et al., 2011) a ~ 31% (Frizano et al., 2003; Rheinheimer e Anghinoni, 2003; Turner, 2006; Zaia et al., 2008).

Os teores das frações que compõem o P lábil (Pi-resina + Pi e Po em NaHCO₃), estiveram dentro da faixa encontrada por outros autores em diversas classes de solos e sistemas de uso da terra (Cross e Schlesinger, 1995; Dieter et al., 2010; Schmitt et al., 2013). Desta maneira, o teor médio de P lábil (Pi-resina + Pi e Po em NaHCO₃), de 43,4 mg kg⁻¹ que corresponde à quantidade média de 86,8 kg ha⁻¹ de P lábil (considerando densidade aparente do solo = 1), é suficiente para compensar a acumulação de P pela parte aérea do eucalipto (folhas, galhos, lenho e casca) ao longo de sete anos 60 kg ha⁻¹ e uma exportação de P pela colheita da madeira (lenho e casca) de 54 kg ha⁻¹ (Bazani et al., 2014). Assim, o P lábil seria capaz de sustentar a demanda de P dos plantios, mesmo no sítio ITA, que apresentou a menor quantidade de P lábil (53,4 kg ha⁻¹), desde que a casca e os resíduos da copa sejam mantidos no campo, diminuindo a exportação de P para 41,8 kg ha⁻¹.

Os teores de Pi-HCl estão dentro do esperado para solos tropicais bastante intemperizados, como relatado por Cross e Schlesinger (1995), que encontraram proporções relativas inferiores a 1%. O P residual representou em torno de 40% do P total. Este valor está dentro do esperado para a maioria dos solos tropicais (Cross e Schlesinger, 1995; Araújo et al., 2004; Schmitt et al., 2013; Gama-Rodrigues et al., 2014), porém esta fração de P só pode ser utilizada em longo prazo pelo eucalipto, pois ela não é afetada em curto prazo por sistemas de manejo do solo e aplicação de fertilizantes (Gatiboni et al., 2007).

Relações entre as frações de P e as propriedades dos solos

Apesar de mostrar associação entre a maioria das frações de P, a análise de correlação simples não é capaz de fornecer informações suficientes para explicar as interações entre as frações de P nos sítios florestais avaliados, principalmente a função das frações lábeis e moderadamente lábeis sobre o P disponível (Pi-resina). Além disso, nem todas as frações foram inter-relacionadas, diferentemente do que foi observado por Gama-Rodrigues et al. (2014) para solos tropicais e subtropicais de diversas regiões do mundo.

Dentre as associações ocorridas entre as frações de P e as características físico-químicas dos solos avaliados, as correlações das frações orgânicas de P de baixa labilidade (Po-NaOH e Po-NaOH+ultrassom) com C, evidenciaram a dependência que o Po tem da matéria orgânica (MO) para os estoques de P no solo, destacada principalmente pelos sítios CB2, VOT e SMA, que apresentaram os maiores teores de C e Po total (Tabelas 2 e 3). Correlações entre Po e C foram também encontradas por Cunha et al. (2007) e Turner e Engelbrecht (2011). As formas orgânicas de P, através da ciclagem, desempenham importante função, através do fornecimento de P em sistemas naturais e/ou de baixa fertilidade (Cunha et al., 2007; Vincent et al., 2010), e os sistemas florestais com eucalipto, ao longo de seu ciclo de produção, são capazes de gerar grande quantidade de resíduos (folhas, galhos e casca), que através da mineralização da matéria orgânica acumulada, pode liberar nutrientes que são reabsorvidos pela planta. O P presente nestes resíduos representa quase 60% do P acumulado na parte aérea das plantas de eucalipto (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Bazani et al., 2014), com taxas de mineralização entre 36 e 50%, no período de um ano (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Rocha, 2014), e desta forma, poderiam suprir parte da demanda de P pelas plantas principalmente em ambiente distrófico, na fase avançada de desenvolvimento da plantação (Bazani et al., 2014).

As associações das frações Pi-resina, Pi-NaHCO₃ e Pi-NaOH, positiva com SB e negativa com saturação por Al, são esperadas em função da disponibilidade de P geralmente estar diretamente associada às bases disponíveis do solo e inversamente aos compostos formados com Al (óxidos de Al); estes últimos têm grande participação na fixação do Pi no solo, afetando diretamente a disponibilidade de P às plantas.

Regressão múltipla e análise de trilha

Através da análise de trilha foi possível observar o estabelecimento de um padrão de influência das frações lábeis e não-lábeis de P sobre Pi-resina, em que as frações Pi e Po em NaHCO₃ e Pi-NaOH+ultrassom, exerceram papel de fonte de P, enquanto que as frações Pi e Po em NaOH atuariam como dreno de P.

O Po-NaHCO₃ mostrou elevado potencial de suprimento de P em plantios de eucalipto nas condições edafoclimáticas avaliadas, pois esta fração de P representou em média 58% do P lábil total (Tabela 3). Em geral, Po predomina na fração de P lábil em solos tropicais (Cunha et al., 2007; Zaia et al. 2008), e, dada sua rápida mineralização (Bowman e Cole, 1978), pode constituir em importante fonte de P às plantas.

Por outro lado, as frações moderadamente lábeis de P (Pi e Po em NaOH), agiram como dreno de P, diferente dos resultados encontrados por Beck e Sanchez (1994) e Gama-Rodrigues et al. (2014). Isso reforça o quanto o P apresenta uma dinâmica complexa no solo, podendo sofrer variações em suas formas em função das condições de clima, solo e manejo (Gatiboni et al., 2013).

Os resultados deste estudo evidenciaram o potencial das frações lábeis de P em nutrir os plantios de eucalipto, particularmente a fração orgânica, que é de rápida mineralização em curto e médio prazo. Desta forma, é recomendável um manejo que favoreça a máxima manutenção dos resíduos nos plantios de eucalipto após colheita da madeira, favorecendo assim o acúmulo de matéria orgânica no solo, que pode influenciar diretamente na disponibilidade de P às plantas através da mineralização das formas orgânicas de P, tornando estes sistemas menos dependentes dos fertilizantes fosfatados e mais sustentáveis.

Assim, estudos complementares sobre fracionamento de P em povoamentos com eucalipto são ainda necessários, a fim de elucidar o papel dessas frações sobre a biodisponibilidade de P, para aperfeiçoar a recomendação e o manejo de fertilizantes fosfatados.

CONCLUSÕES

O fracionamento de P foi capaz de detectar o comportamento das frações de diferentes labilidades na disponibilidade de P às plantas para solos com eucalipto, o que não pode ser observado em uma análise de rotina de fertilidade, comumente usada. Assim, as frações lábeis, como fonte de P disponível, apresentaram grande potencial para disponibilizar P às plantas, enquanto as frações moderadamente lábeis, como dreno, competem com as plantas pelo P disponível, apesar de apresentarem potencial para nutrição em longo prazo, principalmente pelos significativos estoques de P orgânico.

A grande especificidade dos sítios, com diferentes características edáficas e de manejo que resultaram em grande dissimilaridade entre os sítios, evidenciou o quanto estas características influenciaram na distribuição das frações de P no solo.

A fração orgânica lábil predominou sobre a inorgânica lábil na maioria dos sítios, indicativo de que o P orgânico pode desempenhar importante papel na nutrição das plantas nestes sistemas florestais, dada a sua elevada capacidade de aporte de resíduos, que mediante a mineralização pode suprir parte considerável da demanda de P às plantas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez V., V. H., Ribeiro, A. C. (1999). Calagem. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 43-60).
- Araújo, M. S. B., Schaefer, C. E. R., Sampaio, E. V. S. B. (2004). Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*, 119(3-4), 309-321.
- Barros, N. F., Novais, R. F. (1999). Eucalipto. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 303-305).

- Bazani, J. H., Gonçalves, J. L. M., Rocha, J. H. T., Melo, E. S. A. C., Prieto, M. (2014). Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. *Informações Agronômicas*, 1-11.
- Beck, M. A., Sanchez, P. A. (1994). Soil-phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1424-1431.
- Booth, T. H. (2013). Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*, 301(0), 28-34.
- Bowman, R. A., Cole, C. V. (1978). Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NAHCO_3 extraction. *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- Cardoso, I., Janssen, B., Oenema, O., Kuyper, T. (2003). Phosphorus pools in Oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58(1), 55-64.
- Cross, A. F., Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64(3-4), 197-214.
- Cunha, G. d. M., Gama-Rodrigues, A. C. d., Costa, G. S., Velloso, A. C. X. (2007). Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-672.
- Dick, W. A., Tabatabai, M. A. (1977). Determination of Orthophosphate in Aqueous Solutions Containing Labile Organic and Inorganic Phosphorus Compounds. *J. Environ. Qual.*, 6(1), 82-85.
- Dieter, D., Elsenbeer, H., Turner, B. L. (2010). Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *CATENA*, 82(2), 118-125.
- Embrapa. (1999). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* (E. solos Ed.). Brasília - DF, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Fontes, A. G., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. S., Costa, M. G., Machado, R. C. R. (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, 1-23.

- Friesen, D. K., Rao, I. M., Thomas, R. J., Oberson, A., Sanz, J. I. (1997). Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil*, 196(2), 289-294.
- Frizano, J., Vann, D. R., Johnson, A. H., Johnson, C. M., Vieira, I. C. G., Zarin, D. J. (2003). Labile Phosphorus in Soils of Forest Fallows and Primary Forest in the Bragantina Region, Brazil. *Biotropica*, 35(1), 2-11.
- Gama-Rodrigues, A. C., Barros, N. F. (2002). Ciclagem de nutrientes em floresta natural e plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Árvore*, 26(2), 193-207.
- Gama-Rodrigues, A. C., Sales, M. V. S., Silva, P. S. D., Comerford, N. B., Cropper, W. P., Gama-Rodrigues, E. F. (2014). An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118(1-3), 453-469.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Kaminski, J. (2013). Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: uso e limitações *Tópicos em Ciência do Solo* (Vol. 8, pp. 141-187).
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Brunetto, G. (2008). Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1085-1091.
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Flores, J. P. C. (2007). Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 691-699.
- Gonçalves, J. L. d. M., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., . . . Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301(0), 6-27.
- Guo, F., Yost, R. S. (1998). Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Science*, 163(10), 822-832.
- Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2009). *Análise Multivariada de Dados* (S. t. Anna, Trans. Bookman Ed. 6 ed.). Porto Alegre – RS, Brasil.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., Chauhan, B. S. (1982). Changes in inorganic and organic soil-phosphorus fractions induced by cultivation practices and by

- laboratory incubations *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970-976.
- Laclau, J.-P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J. L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., . . . Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1771-1785.
- Laclau, J. P., Goncalves, J. L. D., Stape, J. L. (2013). Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. *Forest Ecology and Management*, 301, 1-5.
- Lleras, C. (2005). Path analysis. *Encyclopedia of social measurement*, 3, 25-30.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27(0), 31-36.
- Negassa, W., Leinweber, P. (2009). How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 172(3), 305-325.
- Novais, R. F., Barros, N. F., Neves, J. C. L. (1986). Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. *Revista Árvore*, 10, 105-111.
- Raij, B. van., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade do solo. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- Rheinheimer, D. d. S., Anghinoni, I. (2003). Accumulation of Soil Organic Phosphorus by Soil Tillage and Cropping Systems Under Subtropical Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(15-16), 2339-2354.
- Rheinheimer, D. d. S., Gatiboni, L. C., Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586.
- Rocha, J. H. T. (2014). *Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de Eucalyptus*

- grandis*. (Mestrado Dissertação), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP.
- Schmitt, D. E., Comin, J. J., Gatiboni, L. C., Tiecher, T., Lorensini, F., Melo, G. W. B. d., . . . Brunetto, G. (2013). Phosphorus fractions in sandy soils of vineyards in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 472-481.
- Souza, R. F. d., Faquin, V., Andrade, A. T. d., Torres, P. R. F. (2007). Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(6), 1535-1544.
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., Cole, C. V. (1984). Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 853-858.
- Turner, B. L. (2006). Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*, 136(1-2), 279-288.
- Turner, B. L. (2008). Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 96(4), 698-702.
- Turner, B. L., Engelbrecht, B. M. J. (2011). Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103(1-3), 297-315.
- Vincent, A. G., Turner, B. L., Tanner, E. V. J. (2010). Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*, 61(1), 48-57. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01200.x
- Xavier, F. A. d. S., Almeida, E. F., Cardoso, I. M., Mendonca, E. d. S. (2011). Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(1), 31-44.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 86(2), 197-212.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C. d., Gama-Rodrigues, E. F. d. (2008). Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e

pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.

3.2. FÓSFORO ORGÂNICO EM SOLOS DE SÍTIOS DE EUCALIPTO NO ESTADO DE SÃO PAULO, BRASIL

RESUMO

O eucalipto, uma espécie de ampla distribuição geográfica, apresenta-se entre os maiores plantios florestais no mundo e como os maiores no Brasil. A manutenção e produtividade desses plantios, nas regiões tropicais, estão associadas ao nível de fertilidade desses solos. Como os solos tropicais em sua maioria são bastante intemperizados e de baixa fertilidade natural, o P é considerado um fator limitante, principalmente em função da alta capacidade de adsorção do P no solo. Nestas condições, as formas orgânicas de P podem representar uma fonte de P às plantas. O objetivo deste estudo foi avaliar os estoques de P, especialmente as frações orgânicas e o potencial do P lábil sustentar a produção de eucalipto, em diferentes solos de onze sítios no estado de São Paulo, Brasil. As amostras de solo foram coletadas na camada 0-20 cm, nas entre linhas de plantio do eucalipto nas parcelas, em solos com diferentes características edafoclimáticas e de manejo. O P orgânico total foi determinado através da extração ácido-base de Bowman e as frações lábeis pelo método de Bowman e Cole. Os sítios apresentaram grande dissimilaridade entre si. A taxa de recuperação do método Bowman variou de 49 a 95% da digestão nitroperclórica entre os sítios e os maiores teores de P foram extraídos em meio ácido, ~ 80%. O teor médio da

fração Pi total foi 169,9 mg kg⁻¹ e do Po total foi 41,6 mg kg⁻¹. O teor médio da fração Pi lábil foi 6,4 mg kg⁻¹ e da fração Po lábil foi 4,6 mg kg⁻¹. Houve fortes correlações das frações Pi lábil com Pi Mehlich-1, e das frações Pi e Po totais com os teores de argila e C do solo. Entretanto, foi a capacidade troca de cátions (T), a propriedade do solo que exerceu efeito significativo direto sobre Po total ($R^2 = 0,77$; $p < 0,05$), caracterizando a matéria orgânica do solo (MOS) como principal fonte de T nos solos tropicais, dada a forte associação do Po com a MOS. Assim, a MOS pode influenciar os estoques de Po total, associada aos elevados teores de argila, além de constituir a principal fonte de T nestes solos. As quantidades estimadas de P lábil não apresentam potencial para sustentar os plantios de eucalipto com base nas exportações de P pelo eucalipto. Porém, as formas orgânicas de P podem compensar parte dessas exportações através da ciclagem de P. Para isso, recomenda-se o correto manejo dos sistemas que favoreça a manutenção dos resíduos após colheita, que via decomposição da MOS e mineralização do Po disponibilize P para ser reabsorvido pelas plantas, em médio e longo prazo.

Palavras-chave: Método de extração de Bowman, P lábil, sistemas florestais, propriedades físico-químicas do solo.

ABSTRACT

ORGANIC PHOSPHORUS IN SOILS OF SITES OF *EUCALYPTUS* SPP. IN SOUTHEASTERN BRAZIL

The eucalyptus, a species widely distributed, is among the largest forest plantations in the world and as the biggest in Brazil. Maintenance and productivity of these plantations in the tropics are associated with the level of fertility of these soils. Like most tropical soils are highly weathered and low natural fertility, the P is considered a limiting factor, mainly due to the high adsorption capacity of P in these soils. In these conditions, the organic forms of P may represent a source of

P to plants. The aim of this study was to evaluate P stocks, especially the organic fractions and the potential of the labile P to sustain the production of eucalypt in different soils of eleven sites in São Paulo state, Brazil. Soil samples were collected at 0-20 cm layer, between the lines of planting eucalypt in the plots, in soils with different soil, climate and management characteristics. Total organic P was determined by Bowman's extraction method and labile P by Bowman and Cole's method. The sites presented great dissimilarity between each other. The recovery rate of method ranged from 49 to 95% between sites and the greatest levels of P were extracted in acid medium, ~ 80%. The average content of Pi fraction was 169.9 mg kg⁻¹ and of the total Po was 41.6 mg kg⁻¹. The average content of the labile Pi was 6.4 mg kg⁻¹ and the labile Po fraction was 4.6 mg kg⁻¹. There were strong correlations of labile Pi with Mehlich Pi, and of the Pi and Po total fractions with clay and C of soil. However, it was the cation exchange capacity (T), the soil property that had a significant direct effect on the total Po ($R^2 = 0.77$, $p < 0.05$), characterizing the soil organic matter (SOM) as the main source of T in tropical soils, given the strong association of Po with MOS. Thus, the MOS can influence the overall Po stocks, associated with high clay content, and be the main source of T in these soils. The estimated P labile does not have the potential to sustain the eucalypt plantations based on exportation of P by eucalypt. However, the organic P forms may offset part of these exportations by cycling P. For this, it is recommended the correct management of the system to promote the maintenance of waste after harvest, which via decomposition of SOM and mineralization of Po makes available the P to be reabsorbed by plants in medium and long term.

Keywords: Bowman's extraction method, labile P, forestry systems, physical-chemical soil properties.

INTRODUÇÃO

Os plantios florestais de eucalipto são importantes mundialmente em função da crescente demanda de produtos madeireiros e principalmente por

representarem a principal matéria-prima para produtos à base de celulose. Com uma área de mais de 20 milhões de hectares (Booth, 2013), um terço nos trópicos (Laclau et al., 2013), o Brasil é o maior produtor mundial, com um quarto das florestas plantadas de eucalipto (ABRAF, 2013; Bazani et al., 2014). Composto por mais de 700 espécies, quase todas originárias da Austrália (FAO, 1981), a ampla distribuição e grande expressividade mundial do gênero *Eucalyptus* se deve à grande plasticidade ecológica das espécies, capazes de se adaptar às mais variadas condições edafoclimáticas (Macedo et al., 2014), com características favoráveis a seu estabelecimento principalmente nas condições de solos tropicais, como tolerância à acidez, toxicidade por Al e baixa saturação de bases trocáveis.

O fósforo (P), apesar de requerido em menor quantidade, é o nutriente que mais limita a produtividade das florestas de eucalipto nas regiões tropicais. A deficiência é mais comum nos estágios iniciais de estabelecimento (até 2 anos), quando os requerimentos são maiores (Gonçalves et al., 2013; Barros et al., 2014). Isso ocorre porque os solos tropicais são bastante intemperizados, com baixos teores de P total, além da elevada adsorção do P por oxidróxidos de Fe e Al, o que requer altas doses de fertilizantes fosfatados e, conseqüentemente, eleva os custos de produção. Por ser um recurso finito, além de caro, a exaustão das reservas de P no mundo compromete a sustentabilidade dos plantios de eucalipto em longo prazo (Laclau et al., 2013).

As formas orgânicas de P desempenham um proeminente papel para a nutrição das plantas nos solos tropicais, já que o fósforo orgânico (Po) é formado pelos íons fosfatos, associados diretamente à matéria orgânica do solo (MOS) acumulada no solo (Bowman e Moir, 1993; Gatiboni et al., 2008), e desta forma, a decomposição de resíduos e mineralização do Po, pode fornecer P às plantas (Guerra et al., 1996). Beck e Sanches (1994) observaram que o Po foi a fonte primária de P disponível às plantas em solos tropicais não fertilizados. Assim, em solos altamente intemperizados, como a maioria dos tropicais, as formas orgânicas representam parte considerável de P disponível às plantas (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007). Nestas regiões, o P orgânico representa, em média, de 22% (Zaia et al., 2008b; Rita et al., 2013) a aproximadamente 30% (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a) do P total do solo. Proporções superiores já foram observadas por Oliveira et al. (2014) em solos tropicais, com

valor médio em torno de 41% de P_o , em horizontes diagnósticos com elevados teores de matéria orgânica. Mesmo não representando a maior porção do P total do solo, a fração orgânica de P geralmente constitui a maior parte do P lábil total nos solos tropicais (Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b).

A grande capacidade de geração de resíduos pelos plantios de eucalipto através da manutenção da casca e resíduos da copa sob o solo, após a colheita, ao longo dos ciclos de produção, apresenta grande potencial para diminuição da dependência dos fertilizantes fosfatados, em função da quantidade de P que pode ser adicionada ao sistema pela ciclagem das formas orgânicas contidas nos resíduos vegetais. O P_o representa, nestas condições, importante reservatório de P às plantas, por reduzir os efeitos do processo de adsorção de P inorgânico pela fase mineral do solo, melhorando a disponibilidade de P no solo (Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008b). Portanto, o P_o lábil, considerado de disponibilidade imediata às plantas, via mineralização (Bowman e Cole, 1978; Tiessen et al., 1984) pode representar uma importante fonte de P para a manutenção dos plantios de eucalipto, nestas condições.

Embora existam muitos trabalhos com abordagens sobre o P orgânico em sistemas florestais e sua dinâmica nos solos (Bowman e Moir, 1993; Guerra et al., 1996; Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b; Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014), há uma carência de estudos em solos sob cultivos de eucalipto, especialmente para os solos tropicais e, também, sobre os estoques de P_o nesses sistemas e sua contribuição para a nutrição das plantas. O objetivo deste estudo foi avaliar os estoques de P, especialmente as frações orgânicas e o potencial do P lábil sustentar a produção de eucalipto, em diferentes solos de onze sítios no estado de São Paulo, Brasil. Foram avaliados: (1) a distribuição das formas orgânicas e inorgânicas de P nos diferentes solos; (2) o potencial da fração lábil de P sustentar os plantios de eucalipto; e (3) as relações das frações de P com as características físicas e químicas dos solos.

MATERIAL E MÉTODOS

Sítios de estudo

O trabalho foi realizado em sistemas florestais com espécies do gênero *Eucalyptus* composto por onze diferentes sítios, distribuídas em nove municípios do estado de São Paulo, com diferentes características (Tabela 1). Nestas áreas experimentais, onde são realizados diversos ensaios de fertilização, foram selecionadas parcelas com e sem fertilização de P no plantio. Para efeito de estudo todas as áreas foram consideradas não fertilizadas a base de P já que a amostragem de solo foi feita nas entre linhas de plantio, logo não sofreu influência da adubação em sulco de plantio.

Caracterização físico-química do solo

Em cada sítio foram coletadas dez amostras simples de solo em cada parcela experimental (3 parcelas por sítio) na profundidade de 0–20 cm em um transecto diagonal à área útil das parcelas, nas entre linhas de plantio, em 2010. As amostras simples deram origem a uma amostra composta por parcela, que foram secas ao ar, homogeneizadas, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm. Estas amostras foram usadas para a caracterização físico-química e determinação das frações de P. A caracterização química (Raij et al., 2001) e física (EMBRAPA, 1999) dos solos é mostrada na tabela 2. Observa-se que os sítios apresentaram grande variabilidade nas propriedades físico-químicas. Os solos foram caracterizados como muito ácidos; os teores de K e Ca são considerados inadequados para a maioria dos sítios e os teores de Mg adequados para todos os sítios, para uma produtividade de $50 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, com base nos níveis críticos para eucalipto (Barros e Novais, 1999). O baixo nível de bases (Ca e K) e a elevada acidez potencial (H+Al) refletiram em níveis de saturação por bases (V%) abaixo do ideal (30%), para a maioria dos sítios, apesar da saturação por alumínio (m) estar dentro do máximo tolerável para o eucalipto (45%), para a maioria dos sítios (Alvarez V. e Ribeiro, 1999). Os solos mais argilosos apresentaram os maiores teores de carbono (C).

Determinação do fósforo orgânico

A determinação do Po total, foi realizada com a utilização do método de extração ácido-base de Bowman (1989), que consiste na solubilização das substâncias orgânicas através da adição de ácido (H_2SO_4 18 mol L^{-1}) e, em seguida, aumentando o pH do meio pela adição de álcali (NaOH 0,5 mol L^{-1}). O Po é extraído junto às substâncias orgânicas, destruídas posteriormente por digestão do extrato. Com o objetivo de clarear o extrato para a determinação do Pi extraído, foi utilizado carvão ativado, como modificação do método, proposta por Guerra et al. (1996). Para isso, o carvão ativado deve estar livre de Pi para não influenciar as amostras, e, portanto, deve passar por lavagens sucessivas com a mesma solução extratora, com exceção para extração com H_2SO_4 , em que o carvão é lavado com HCl 6 mol L^{-1} .

Nos extratos ácidos e alcalinos clarificados, o Pi foi determinado pelo método de Murphy e Riley (1962). Os conteúdos de Pi, P total (PT) e Po foram determinados nos extratos ácidos e alcalinos, e o Po total calculado como a soma do Po nos extratos ácidos e alcalinos, como segue:

$$\text{Po}_{\text{ácido}} = \text{PT}_{\text{ácido (digerido)}} - \text{Pi}_{\text{ácido (extraído)}}$$

$$\text{Po}_{\text{alcalino}} = \text{PT}_{\text{alcalino (digerido)}} - \text{Pi}_{\text{alcalino (extraído)}}$$

$$\text{Po}_{\text{total}} = \text{Po}_{\text{ácido}} + \text{Po}_{\text{alcalino}}$$

O Po lábil (mineralização rápida) foi determinado por extração com NaHCO_3 a 0,5 mol L^{-1} conforme Bowman e Cole (1978). As concentrações de Pi lábil e P lábil total nos extratos, foram determinadas pelo método de Murphy e Riley (1962). O teor de Po lábil foi estimado pela subtração de Pi lábil do P total lábil, ambos extraídos por NaHCO_3 .

O P total extraído por digestão nitroperclórica (Bataglia et al., 1983), foi usado para estimar a capacidade de recuperação de P pelo método Bowman.

Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos ao teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov e Lilliefors, onde se verificou distribuição normal das variáveis analisadas. Em seguida foi aplicada a análise de variância (ANOVA) e o teste de agrupamento de médias, Scott & Knott em nível de 5% de probabilidade. As relações entre todas as frações de P e, das frações de P com as propriedades

Tabela 1 - Composição dos arranjos experimentais, com espécies, espaçamentos, área útil de parcela, plantas por parcela, tipo de clima segundo a classificação de Köppen, temperatura (T) e precipitação (PP) médias anuais, tipo e textura do solo e, idade do povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios*	Espécie	Espaçamento (m)	Área útil (m ²)	Plantas por parcela	Clima ⁽¹⁾	T (°C)	PP (mm)	Solo ⁽²⁾	Textura	Idade (anos)
AG	<i>Eucalyptus grandis</i> (G-232)	3,0 x 2,0	144	24	Aw	21,6	1170	LVd	média	3,0
ANG	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	216	36	Cwa	20,6	1262	RQ	arenosa	2,0
BOT	<i>E. grandis</i> (G-232)	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,2	1302	RQ	arenosa	3,0
ITA	<i>E. grandis</i> (Suz.)	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	19,9	1308	LVAd	média	4,0
ALT ⁽³⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,5	180	24	Aw	20,7	1517	RQ	arenosa	7,0
CB1 ⁽⁴⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 3,0	360	40	Cwa	20,1	1210	LAd	argilosa	9,0
CB2 ⁽⁵⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,1	1210	LVd	muito argilosa	1,4
CB3 ⁽⁶⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	144	24	Cwa	20,1	1210	CXBd	média	1,6
PA ⁽⁷⁾	<i>E. grandis</i> (Parb.)	3,0 x 2,5	180	24	Cwa	20,8	1249	LVAd	argilosa	11,0
VOT ⁽⁸⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	96	16	Cwa	21,3	1287	PVAd	muito argilosa	1,8
SMA ⁽⁹⁾	<i>E. grandis</i> e <i>E. urophylla</i>	3,0 x 2,0	216	36	Cwa	20,4	1174	LVAd	muito argilosa	2,0

*Representado pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo. ⁽¹⁾ Aw significa clima tropical com estação seca de inverno e temperaturas médias no mês mais frio do ano superior a 18°C e Cwa significa clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. ⁽²⁾ Conforme EMBRAPA (1999): LVd = Latossolo Vermelho distrófico, RQ = Neossolo Quartzarênico, LAd = Latossolo Amarelo distrófico, CXBd = Cambissolo Háplico distrófico, LVAd = Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, PVAd = Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico. Seis sítios receberam adubação de NPK no plantio, com aplicação de ⁽³⁾123 kg ha⁻¹, ⁽⁴⁾290 kg ha⁻¹, ⁽⁵⁾183 kg ha⁻¹, ⁽⁶⁾183 kg ha⁻¹, ⁽⁷⁾120 kg ha⁻¹, e ⁽⁸⁾183 kg ha⁻¹ da fórmula 04-28-06. ⁽⁹⁾O sítio SMA apresentou histórico de uso com adubação fosfatada (cultura da batata). Os sítios AG e BOT receberam adubação com aplicação de 15 kg ha⁻¹ de N e K₂O, e 18 kg ha⁻¹ de N e K₂O, respectivamente, além de 13% de S e 10% de B, em cada sítio. Foi também realizada adubação complementar no plantio com outros elementos para os sítios CB1 (0,3% de B), CB2 (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn), CB3 (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn), PA (2,4% de Mg) e VOT (10% de Ca, 4% de S, 0,3% de Cu e 0,7% de Zn). Ainda foi realizada adubação de cobertura nos sítios CB1 aos 3 e 9 meses (8 kg ha⁻¹ de B); CB2 aos 3 meses (~41 kg de K₂O e 1,5% de B), 6 meses (~36 kg de K₂O, 0,5% de B e 1% de Zn) e 12 meses (~35 kg de K₂O, 0,7% de B e 1% de Zn); CB3 aos 3 meses (~40 kg de K₂O e 1,5% de B), 6 meses (~75 kg de K₂O, 0,5% de B e 1% de Zn) e 12 meses (~60 kg de K₂O, 0,7% de B e 1% de Zn); e VOT aos 3 meses (~41 kg de K₂O e 0,3% de B e 1% de Zn) e 9 meses (~126 kg de K₂O e 1,5% de B).

físicas e químicas do solo, foram determinadas pelo coeficiente de correlação de Pearson, com uso do programa SAEG 9.1 (SAEG Inst. Inc.).

As frações de P foram submetidas à análise de componentes principais (ACP), que permitiu a criação de um diagrama (gráfico) que reflete a variação multidimensional dos dados avaliados, com ordenação das variáveis em eixos de acordo com sua similaridade. Na ACP, a direção e o comprimento das setas mostram a qualidade da correlação entre as frações e entre as frações e os componentes (Fontes et al., 2014), de forma que frações (setas) com ângulos estreitos são fortemente correlacionadas e com ângulos perpendiculares não mostram correlação (Zaia et al., 2012). Desta forma, foram obtidos dois componentes, considerados significantes (autovalores > 1; carga fatorial $\geq 0,60$ no primeiro componente) (Hair Jr et al., 2009). Foi utilizado o programa XL Stat® 2014.

Tabela 2 – Caracterização física e química do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios*	Argila	C	P ¹	P ²	pH	K	Ca	Mg	m	T	V
	g kg ⁻¹	g dm ⁻³	— mg kg ⁻¹ —		CaCl ₂	mmolc dm ⁻³					
											%
AG	167	12,2	3,98	103,83	3,9	4,8	4,8	2,4	52,2	70,7	17,0
ANG	100	10,4	8,46	107,33	4,0	0,6	5,0	2,5	44,5	47,0	17,0
BOT	100	8,7	8,33	92,17	4,0	0,4	4,0	5,0	36,9	49,5	25,0
ITA	193	11,0	2,38	161,00	2,6	0,9	2,1	2,4	67,8	65,6	8,0
ALT	67	11,6	6,20	157,50	4,3	0,3	11,0	4,0	20,7	58,0	28,0
CB1	478	16,2	1,38	266,00	3,9	1,2	1,7	2,3	78,2	94,9	5,0
CB2	653	20,3	1,36	357,00	4,4	2,7	15,2	9,3	31,8	107,3	25,0
CB3	272	12,8	3,47	254,33	4,1	1,4	9,9	9,5	43,9	102,5	21,0
PA	365	12,2	2,13	239,17	4,1	1,9	6,8	4,2	33,8	58,0	22,0
VOT	670	29,0	2,20	522,67	4,0	5,0	5,0	2,1	58,4	125,6	9,0
SMA	651	25,5	26,69	1122,33	4,9	3,0	41,8	14,8	2,1	100,1	40,0

* Representado pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo; m - Saturação por alumínio; T - Capacidade de troca de cátions; V - Saturação por bases; ¹P Mehlich-1; ²P total digestão nitroperclórica.

A análise de regressão múltipla foi usada com a fração Po total como variável dependente e como variáveis independentes, as propriedades do solo: argila, carbono (C) e capacidade de troca de cátions (T). O ajuste do modelo foi

medido pelo coeficiente de determinação (R^2), pela significância da regressão e pelos coeficientes β dos efeitos diretos das variáveis independentes (preditores) (Gama-Rodrigues et al., 2014). A análise de trilha foi usada para as variáveis utilizadas na regressão múltipla. A análise de trilha estima a força das relações causais, por efeitos diretos e indiretos, entre as variáveis (Lleras, 2005) e, pode então apontar, além de efeito direto, os efeitos indiretos das propriedades do solo sobre o Po total do solo. Foi usado o programa SAEG 9.1 (SAEG Inst. Inc.) para as análises de regressão múltipla e trilha.

RESULTADOS

Distribuição das frações de P nos solos

De acordo com a análise de componentes principais (ACP), ocorreu alta dissimilaridade entre os sítios florestais, com formação de grupos distintos (Figura 1). Os sítios AG, ANG, BOT e SMA constituíram grupos individuais. Foram formados dois grupos com dois sítios cada (ALT e ITA, CB1 e PA), enquanto que o maior grupo foi constituído pelos sítios CB2, CB3 e VOT. Os componentes 1 (56,28%) e 2 (25,07%) explicaram 86,31% da variação total do conjunto de dados. As variáveis mais associadas ao componente 1, em ordem decrescente de cargas fatoriais, foram Pi lábil (0,98), Pi Mehlich-1 (0,98) e Pi total (0,94), enquanto que as frações Po total e Po lábil apresentaram-se associadas ao componente 2 com cargas fatoriais de 0,84 e 0,70, respectivamente.

Os teores de P para as frações de P extraídas em meio ácido mostraram-se superiores aos teores solúveis em meio básico (Tabela 3). Os teores de P, em média, foram de 138,4 mg kg⁻¹ de Pi em ácido (PiH⁺) e 31,5 mg kg⁻¹ de Pi em base (PiOH⁻); 171,1 mg kg⁻¹ de P total em ácido (PtH⁺) e 40,4 mg kg⁻¹ de P total em base (PtOH⁻), que conseqüentemente geraram maiores teores de Po em extrator ácido, com valores médios de 32,7 mg kg⁻¹ de Po em ácido (PoH⁺) e 8,8 mg kg⁻¹ de Po em base (PoOH⁻), para os sítios (Tabela 3). A extração em solução ácida foi superior à extração em solução alcalina não apenas em teores médios, mas também em teores absolutos para quase todos os sítios nas frações de P

inorgânica, orgânica e total, que apresentaram ~ 81% das frações solúveis em meio ácido (PiH^+ , PtH^+ e PoH^+) e ~19% solúveis em meio alcalino ($PiOH^-$, $PtOH^-$ e $PoOH^-$) (Tabela 3). A única exceção foi o sítio SMA, que apresentou ~ 20% de Po extraído em meio ácido.

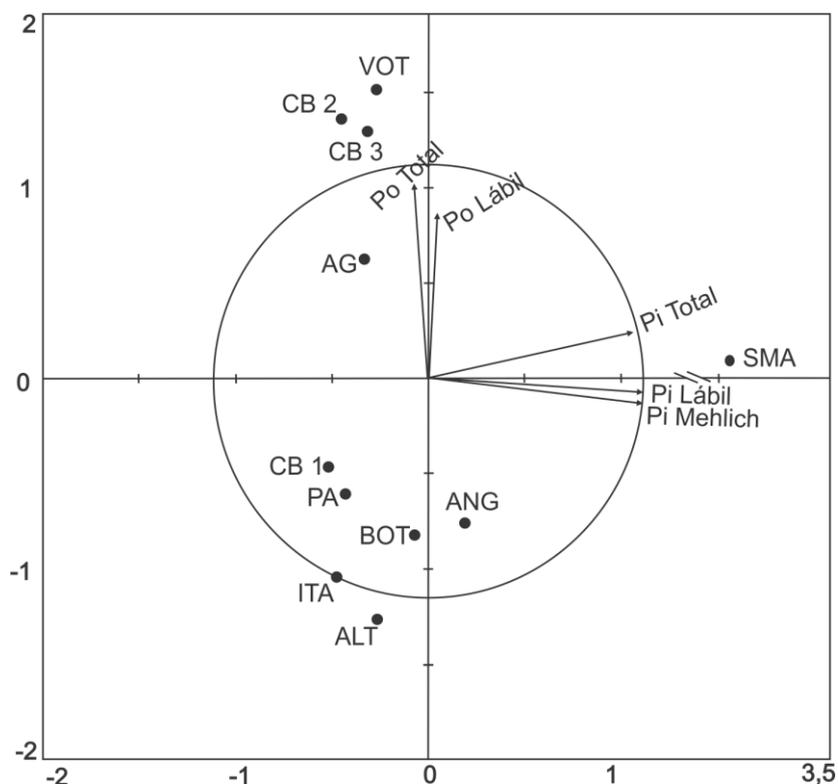


Figura 1 – Diagrama de ordenação produzido por análise de componentes principais das frações de P do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto. Representação dos sítios: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo.

Houve ampla variação das frações de P entre os sítios de *Eucalyptus* spp. (Tabela 4). Os sítios CB2, VOT e SMA apresentaram os maiores teores de Pi total, Po total e P total, exceto a fração Po total para o sítio SMA, porém este último apresentou também os maiores teores de P inorgânico lábil, que influenciaram diretamente para o maior teor de P lábil total neste sítio.

A taxa de recuperação do método $(Pi + Po)/P$ total em digestão nitroperclórica, variou de 49 a 95% entre os sítios (não mostrado). O teor médio de P total, extraído, foi de $211,5 \text{ mg kg}^{-1}$, com valores variando de 78,3 a 867 mg kg^{-1} .

kg⁻¹ entre os sítios. As frações inorgânicas superaram as orgânicas na composição do P total, com teores médios 169,9 mg kg⁻¹ e 41,6 mg kg⁻¹, respectivamente (Tabela 4), o que representou em média ~80% de P na forma inorgânica e ~20% de P na forma orgânica (Tabela 4).

Tabela 3- Teores de P nas frações inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po) solúveis em ácido e base no solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios*	Pi		Po	
	H ⁺	OH ⁻	H ⁺	OH ⁻
	mg kg ⁻¹			
AG	60,42 (91)	6,22 (9)	27,85 (87)	4,01 (13)
ANG	48,61 (88)	6,89 (12)	24,39 (90)	2,77 (10)
BOT	38,06 (78)	10,59 (22)	29,20 (98)	0,42 (2)
ITA	48,33 (77)	14,74 (23)	15,93 (98)	0,37 (2)
ALT	75,28 (82)	15,97 (18)	31,80 (92)	2,85 (8)
CB1	114,72 (84)	22,00 (16)	40,84 (86)	6,57 (14)
CB2	140,83 (82)	31,22 (18)	51,80 (77)	15,15 (23)
CB3	91,94 (82)	19,70 (18)	50,40 (90)	5,71 (10)
PA	69,44 (81)	16,22 (19)	29,58 (87)	4,52 (13)
VOT	145,28 (69)	66,67 (31)	50,14 (69)	22,39 (31)
SMA	689,44 (83)	136,74 (17)	8,33 (20)	32,50 (80)
Média	138,40 (81)	31,54 (19)	32,75 (79)	8,84 (21)

* Representado pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo;
⁽¹⁾ Proporções dos teores em percentagem de P extraídos em meio ácido e base, para cada fração.

O P lábil total com média de 10,9 mg kg⁻¹, correspondeu a ~5% do P total do solo. A fração inorgânica lábil (Pi lábil) superou a orgânica lábil (Po lábil) na maioria dos sítios, com teores médios de 6,38 mg kg⁻¹ e 4,59 mg kg⁻¹, respectivamente, que correspondeu, em média, a ~58% de Pi lábil e ~42% de Po lábil (Tabela 4). Por outro lado, em cinco sítios, com e sem adubação no plantio, o Po lábil foi superior, com valores equivalentes de 60 a 80% do P lábil total do solo.

Relações entre as frações de P e com as propriedades dos solos

Observou-se correlações positivas e significativas da fração Pi lábil com Pi total e das frações inorgânicas, Pi lábil e Pi total, com o P total por digestão nitroperclórica (Tabela 5). Nenhuma correlação ocorreu com as frações Po total e

Po lábil. Houve correlação positiva e significativa entre o P total pelo método Bowman com o P total por digestão nitroperclórica.

Tabela 4- Teores de P nas frações inorgânicas (Pi) e orgânicas (Po), totais e lábeis, do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

Sítios*	Pi		Po		Pi + Po	
	Total	Lábil*	Total	Lábil*	Total	Lábil
	mg kg ⁻¹					
AG	66,6 H (68)	3,26 F (27)	31,8 G (32)	8,94 A (73)	98,5 H	12,20 C (12)
ANG	55,5 J (67)	11,26 B (71)	27,2 H (33)	4,51 D (29)	82,7 I	15,77 B (19)
BOT	48,6 K (62)	6,15 C (63)	29,6 G (38)	3,69 E (37)	78,3 J	9,84 E (13)
ITA	63,1 I (79)	2,81 G (39)	16,3 I (21)	4,47 D (61)	79,4 J	7,28 G (9)
ALT	91,2 F (73)	3,48 E (83)	34,6 F (27)	0,73 F (17)	125,9 F	4,21 H (3)
CB1	136,7 D (74)	1,56 H (53)	47,4 D (26)	1,39 F (47)	184,1 D	2,95 I (2)
CB2	172,1 C (72)	1,48 H (21)	67,0 B (28)	5,68 C (79)	239,0 C	7,16 G (3)
CB3	111,6 E (66)	3,70 E (33)	56,1 C (34)	7,53 B (67)	167,8 E	11,24 D (7)
PA	85,7 G (72)	4,07 D (55)	34,2 F (28)	3,34 E (45)	119,8 G	7,42 G (6)
VOT	211,9 B (75)	3,48 E (40)	72,5 A (25)	5,31 C (60)	284,5 B	8,79 F (3)
SMA	826,2 A (95)	28,89 A (86)	40,8 E (5)	4,88 D (14)	867,0 A	33,77 A (4)
Média	169,9 (80)	6,4 (58)	41,6 (20)	4,6 (42)	211,5	10,9 (5)

* Representado pelas siglas: AG - Agudos, ALT - Altinópolis, CB1 - Capão Bonito 1, CB2 - Capão Bonito 2, CB3 - Capão Bonito 3, ITA - Itatinga, PA - Paraibuna, VOT - Votorantim, ANG - Angatuba, BOT - Botucatu, SMA - São Miguel Arcanjo. Médias com letras diferentes nas colunas diferem entre si pelo teste Scott & Knott em nível de 5% de probabilidade; ⁽¹⁾ Proporções dos teores em percentagem de P em relação ao P total; * Proporção em relação ao P Lábil Total.

Tabela 5 - Matriz de correlações entre as frações de P e os teores totais de P do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

	Pi Lábil	Po lábil	Pi Total	PoTotal	P Total ²
Pi Lábil	1	0,04	0,88**	-0,15	0,78*
Po lábil		1	0,05	0,20	0,06
Pi Total			1	0,20	0,97**
PoTotal				1	0,36
P Total ¹					0,98**

Valores de r significativos em nível de * 1% e ** 0,1% de probabilidade; ¹P total resultante do somatório das frações de Bowman; ² P total resultante da digestão nitroperclórica.

Com as características físicas e químicas do solo, houve correlações significativas e positivas da fração Pi lábil com Pi Mehlich, soma de bases (SB) e negativa com saturação por alumínio (m) (Tabela 6). O Pi total e Po total apresentaram correlações significativas e positivas com argila e carbono (C) do solo, o que influenciou em correlações similares para o P total. Somente o Po total apresentou correlações significativas e positivas com a capacidade de troca de cátions (T). Apesar das correlações positivas de argila e C com Po total, apenas T

foi significativo na predição do Po total do solo ($R^2 = 0,77$; $U = 0,48$; $p < 0,05$) (Tabela 7), com efeito significativo direto positivo sobre o Po total ($D = 0,91$), enquanto que argila e C apresentaram apenas efeitos indiretos sobre Po total via T (Tabela 8).

Tabela 6- Matriz de correlações entre as frações de fósforo e as propriedades físicas e químicas do solo, em povoamento de diferentes sítios de eucalipto.

	Argila	C	pH	P ¹	SB	m	T
Pi Lábil	0,25	0,36	0,52	0,98***	0,81**	-0,65*	0,04
Po lábil	0,10	0,12	-0,02	-0,01	0,18	0,03	0,30
P Lábil Total	0,26	0,37	0,49	0,92***	0,82**	-0,61*	0,13
Pi Total	0,61*	0,68*	0,58	0,86***	0,92***	-0,58	0,45
PoTotal	0,75**	0,73*	0,46	-0,19	0,25	0,01	0,88***
P Total	0,66*	0,72*	0,60*	0,83**	0,93***	-0,57	0,51

Valores de r significativos em nível de * 5%, ** 1% e *** 0,1% de probabilidade; m - saturação por alumínio; ¹ P Mehlich-1.

Tabela 7- Regressão múltipla de Po total com as propriedades do solo.

	Coeficientes de regressão	β (efeitos diretos)
Argila	0,55649 ($P > 0,05$)	0,08
C	-0,29095 ($P > 0,05$)	-0,11
T	0,58772 ($P < 0,05$)	0,91

$R^2 = 0,77$ ($P < 0,05$); $U = 0,48$; C = carbono; T = Capacidade de troca de cátions.

Tabela 8- Efeitos diretos (diagonal, negrito) e indiretos (fora da diagonal) das propriedades do solo sobre o Po total.

	Argila	C	T	r
Argila	0,08	-0,10	0,77	0,75*
C	0,07	-0,11	0,77	0,73*
T	0,07	-0,09	0,91*	0,88*

* Significativo a $P < 0,05$; $R^2 = 0,77$; $U = 0,48$; C = carbono; T = Capacidade de troca de cátions.

DISCUSSÃO

Distribuição das frações de P nos solos

A grande variabilidade de características edáficas dos sítios avaliados influenciou diretamente para a grande dissimilaridade encontrada entre os sítios através da análise de componentes principais (Figura 1). Já os elevados teores de P nas frações Pi lábil e Pi total, no sítio SMA, foram fortemente influenciados pelas adubações ocorridas pelo uso da terra anterior ao plantio de eucalipto (plantios de batata), que certamente contribuíram para os maiores teores nas frações inorgânicas e conseqüentemente, no P total.

O teor médio de $6,4 \text{ mg kg}^{-1}$ de Pi lábil está dentro da faixa de valores da literatura para solos tropicais com florestas naturais ou com eucalipto não fertilizado (Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b), enquanto que o teor encontrado para o sítio SMA, de aproximadamente 29 mg kg^{-1} de Pi lábil está muito acima da média dos sítios; uma evidência do efeito da fertilização do uso anterior de terra na elevação dos teores desta fração no sítio SMA.

A taxa de recuperação do método ficou dentro do observado por Condron et al. (1990) com valores entre 30 e 107%, Guerra et al. (1996) entre 48 e 109%, Cunha et al. (2007) entre 50 e 82%, Zaia et al. (2008b) entre 40 e 169%, e Oliveira et al. (2014) entre 46 e 99%.

A dominância das frações inorgânicas sobre as orgânicas através do método de Bowman observado neste estudo, já foi identificada anteriormente em outros trabalhos para solos tropicais (Guerra et al., 1996, Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b; Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014). Já a média de ~20% de Po do P total extraído, sofreu forte influência do sítio SMA, que interferiu para o baixo valor médio observado, pois a exclusão desse sítio, que apresentou menos de 5% de Po, elevaria a média de Po dos demais sítios para ~30% do P total. De qualquer forma, estes valores estão de acordo com os observados por Guerra et al. (1996), que encontraram valores de Po entre 13 e 47%, Cunha et al. (2007) entre 14,6 e 36,9%, Zaia et al. (2008a) entre 23,7 e 39,5%, Zaia et al. (2008b) entre 7,7 e 36,3%, Rita et al. (2013) entre 11 e 32,5%, enquanto que Oliveira et al. (2014) observaram valores relativos de Po de 36 a 46% do P total do solo, para horizontes diagnósticos com elevados teores de matéria orgânica.

O teor médio de P lábil total (Pi+Po) de 10,97 mg kg⁻¹ que corresponde à quantidade média de ~22 kg ha⁻¹ de P lábil (considerando densidade aparente do solo = 1), é considerado inadequado para compensar a acumulação de P pela parte aérea do eucalipto ao longo de sete anos 60 kg ha⁻¹ e uma exportação de P pela colheita da madeira de 54 kg ha⁻¹ (Bazani et al., 2014). Desta forma, o P lábil total não é capaz de nutrir adequadamente os plantios na fase de manutenção.

Já a proporção de ~ 58% para Pi lábil em relação ao P lábil total contrastou com outros estudos em solos tropicais (Guerra et al., 1996, Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b; Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014). O sítio SMA com ~86% de Pi lábil do P lábil total, provavelmente sofreu influência da adubação ocorrida com uso de terra anterior ao *Eucalyptus*, mas sem considerar este sítio, tem-se metade dos sítios com predomínio do Po lábil sobre o Pi lábil. Desta forma, apenas parte dos sítios avaliados está em consonância com outros estudos em solos tropicais, onde houve predomínio do Po lábil sobre Pi lábil (Guerra et al., 1996, Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008a,b; Rita et al., 2013; Oliveira et al., 2014). Já a predominância das frações extraídas em meio ácido sobre as extraídas em meio básico, é uma característica observada em outros estudos que também apontaram para ~ 80% das frações solúveis em meio ácido para diferentes solos (Bowman, 1989; Condon et al., 1990; Nogueira et al., 2008).

Relações entre as frações de P e com as propriedades dos solos

A alta correlação do P total, extraído pelo método de Bowman, com o P total por digestão nitroperclórica, certifica a manutenção das proporções extraídas pelo método utilizado, apesar das diferenças no poder de extração de P total pelo Bowman destacado anteriormente através das taxas de recuperação do método.

A forte associação entre Pi lábil e Pi Mehlich-1, neste estudo, é corroborada por Cross e Schlesinger (1995), Guo e Yost, (1998) e Gatiboni et al. (2007), que consideraram o P lábil extraído em NaHCO₃, como prontamente disponível às plantas. A associação positiva do Pi lábil com SB é esperada em função da disponibilidade de P geralmente estar diretamente associada às bases disponíveis do solo, enquanto que a associação negativa do Pi lábil com saturação por Al (m), mostra efeito inverso, já que a SB está negativamente associada à m ($r = -0,77$; $p < 0,05$). Em solos ácidos com predomínio de argilas

de baixa atividade, como caulinita, e oxiidróxidos (gibbissita), o alumínio trocável (Al^{3+}) apresenta elevada atividade na solução do solo (Souza et al., 2007), como ocorre na maioria dos solos tropicais. Nestas condições, o fosfato tende a reagir com Al da solução, formando fosfato de alumínio no solo (Novais et al., 2007; Souza et al., 2007). Isso explica em parte a associação negativa do Pi lábil com m.

Os sítios com maiores teores de argila também apresentaram os maiores teores de C ($r = 0,90$; $p < 0,001$), com destaque para os sítios CB2 e VOT, os quais apresentaram os maiores teores de Po total, como reflexo da forte relação do P orgânico com os teores de argila e C. Isso evidencia que os níveis de MOS influenciaram os teores de Po total do solo, como observado por outros autores (Guerra et al., 1996; Lardy et al., 2001; Cunha et al., 2007; Turner e Engelbrecht, 2011). Apesar das fortes associações dessas propriedades com Po total, elas não exerceram influência direta sobre os estoques de Po total, como mostrado pelas análises de regressão e trilha (Tabelas 7 e 8), mas indiretamente via T. Como nos solos tropicais a fase mineral é dominada por argilas de baixa atividade, a MOS constitui o principal regulador de T nestes solos e isso pode explicar a relação direta entre T e Po total, já que o Po faz parte da MOS. Assim, a ciclagem das formas orgânicas de P presentes na MOS exerce um papel crucial na disponibilidade de P em sistemas naturais ou em solos com baixa ou nenhuma adição de fósforo (Cunha et al., 2007; Zaia et al., 2008b), via processo de mineralização, que pode chegar até 76% para o Po lábil em solos tropicais (Rita et al., 2013). Porém, essa disponibilidade de Po depende de muitos fatores como tipos de solos, clima, fontes de P e histórico de uso da terra (Gama-Rodrigues et al., 2014).

A capacidade de acúmulo de MOS nos sistemas florestais com eucalipto, através de deposição e manutenção de parte sua biomassa aérea (folhas, galhos e casca) é capaz de disponibilizar grande quantidade de P no solo por mineralização. O P presente nesses resíduos, que devem ser mantidos no solo após a colheita da madeira, representa quase 60% do P acumulado na parte aérea das plantas de eucalipto (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Bazani et al., 2014), com uma taxa de mineralização de até 50% do P presente, em aproximadamente um ano (Gama-Rodrigues e Barros, 2002; Rocha, 2014). Isso pode suprir boa parte da demanda de P pelas plantas, em solos de baixa

fertilidade, para fase de manutenção dos plantios. Isso potencializa a capacidade das frações orgânicas suprirem parte da demanda de P em plantios de eucalipto, em curto e longo prazo, através das frações Po lábil e Po total, respectivamente.

Assim, estudos complementares destas frações de P em povoamentos com eucalipto são importantes para esclarecer melhor seu papel para a nutrição das plantas, de forma a melhorar as recomendações de manejo e diminuir a dependência dos fertilizantes fosfatados nos plantios.

CONCLUSÕES

O Pi total predominou sobre o Po total para quase todos os sítios avaliados, o que constitui uma característica inerente ao método Bowman que inclui no Pi total até as formas inorgânicas recalcitrantes e orgânicas insolúveis.

A fração de P lábil total extraído por Bowman não apresentou potencial de sustentar os plantios para as condições observadas, com base na demanda e exportação de P pelo eucalipto ao longo do ciclo, que são bem superiores às quantidades estimadas pelo método nesta fração.

A fração Pi lábil predominou sobre Po lábil para a maioria dos sítios de estudo.

A matéria orgânica do solo pode influenciar os níveis de Pi e Po totais nos solos, associada aos elevados teores de argila, além de constituir a principal fonte de T nestes solos. Desta forma, a matéria orgânica nestes solos constitui um importante reservatório de Po que via mineralização pode disponibilizar P para ser reabsorvido pelas plantas, em médio e longo prazo e compensar parte das exportações de P pelo eucalipto ao longo do ciclo de produção.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraf. (2013). Anuário estatístico ABRAF 2013. *Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas*, 148.
- Alvarez V., V. H., Ribeiro, A. C. (1999). Calagem. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 43-60).
- Barros, N. F., Neves, J. C. L., Novais, R. F. (2014). Nutrição e adubação mineral do eucalipto. In A. B. Vale, C. C. Machado, J. M. M. Pires, M. B. Vilar, C. B. Costa, A. P. Nacif (Eds.), *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência* (pp. 187-208). Viçosa - MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF.
- Barros, N. F., Novais, R. F. (1999). Eucalipto. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 303-305).
- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R., Gallo, J. R. (1983). Métodos de análise química de plantas Vol. 78. Boletim Técnico (pp. 48).
- Bazani, J. H., Gonçalves, J. L. M., Rocha, J. H. T., Melo, E. S. A. C., Prieto, M. (2014). Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. *Informações Agronômicas*, 1-11.
- Beck, M. A., Sanchez, P. A. (1994). Soil-phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1424-1431.
- Bowman, R. A. (1989). A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric-acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 362-366.
- Bowman, R. A., Cole, C. V. (1978). Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- Bowman, R. A., Moir, J. O. (1993). Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), 1516-1518.

- Brady, N. C., Weil, R. R. (2013). *Elementos da natureza e propriedades dos solos* (Bookman Ed. 3ª edição ed.). Porto Alegre - RS.
- Condon, L. M., Moir, J. O., Tiessen, H., Stewart, J. W. B. (1990). Critical-evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1261-1266.
- Cross, A. F., Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64(3-4), 197-214.
- Cunha, G. d. M., Gama-Rodrigues, A. C. d., Costa, G. S., Velloso, A. C. X. (2007). Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-672.
- Embrapa. (1999). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* (E. solos Ed.). Brasília - DF, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Fao. (1981). Eucalypts for planting FAO Forestry Series Vol. 11. M. R. Jacobs (Ed.) (pp. 735).
- Fontes, A. G., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. S., Costa, M. G., Machado, R. C. R. (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, 1-23.
- Gama-Rodrigues, A. C., Barros, N. F. (2002). Ciclagem de nutrientes em floresta natural e plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Árvore*, 26(2), 193-207.
- Gama-Rodrigues, A. C., Sales, M. V. S., Silva, P. S. D., Comerford, N. B., Cropper, W. P., Gama-Rodrigues, E. F. (2014). An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118(1-3), 453-469.
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Brunetto, G. (2008). Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1085-1091.
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Flores, J. P. C. (2007). Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 691-699.

- Gonçalves, J. L. d. M., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., . . . Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301(0), 6-27.
- Guerra, J. G. M., Almeida, D. L. d., Santos, G. d. A., Fernandes, M. S. (1996). Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31(4), 291-299.
- Guo, F., Yost, R. S. (1998). Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Science*, 163(10), 822-832.
- Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2009). *Análise Multivariada de Dados* (S. t. Anna, Trans. Bookman Ed. 6 ed.). Porto Alegre – RS, Brasil.
- Laclau, J. P., Goncalves, J. L. D., Stape, J. L. (2013). Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. *Forest Ecology and Management*, 301, 1-5.
- Lardy, L. C., Brossard, M., Assad, M. L. L., Laurent, J. Y. (2002). Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. *Agriculture Ecosystems Environment*, 92(2-3), 147-158.
- Lleras, C. (2005). Path analysis. *Encyclopedia of social measurement*, 3, 25-30.
- Macedo, R. L. G., Venturin, R. P., Venturin, N., Vale, R. S., Vale, F. A. F. (2014). Plasticidade ecofisiológica. In A. B. Vale, C. C. Machado, J. M. M. Pires, M. B. Vilar, C. B. Costa, A. P. Nacif (Eds.), *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência* (pp. 421-440). Viçosa - MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27(0), 31-36.
- Nogueira, R. S., Oliveira, T. S., Sá Mendonça Filho, E., Filho, J. A. A. (2008). Phosphorus fractions in a Luvisolo Crômico Órtico under agroforestry systems in the Sobral, Ceará, Brazil. *Revista Ciencia Agronomica*, 39(4), 494-502.

- Novais, R. F., Barros, N. F., Neves, J. C. L. (1986). Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. *Revista Árvore*, 10, 105-111.
- Novais, R. F., Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais* (UFV Ed.). Viçosa - MG, Brasil.
- Oliveira, R. I., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Pereira, M. G., Fontana, A. (2014). Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(5), 1411-1420.
- Rheinheimer, D. d. S., Gatiboni, L. C., Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586.
- Rheinheimer, D. S., Cassol, P. C., Kaminski, J., Anghinoni, I. (2008). Fósforo orgânico do solo *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais* (2 ed., pp. 101-112). Porto Alegre - RS, Brasil.
- Rita, J. C. d. O., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Nunes, D. A. D. (2013). Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1207-1215.
- Rocha, J. H. T. (2014). *Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de Eucalyptus grandis*. (Mestrado Dissertação), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP.
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., Cole, C. V. (1984). Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 853-858.
- Turner, B. L., Engelbrecht, B. M. J. (2011). Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103(1-3), 297-315.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 86(2), 197-212.

- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C. d., Gama-Rodrigues, E. F. d. (2008). Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C. d., Gama-Rodrigues, E. F. d., Machado, R. C. R. (2008). Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1987-1995.

4. RESUMO E CONCLUSÕES

O fracionamento de P de Hedley possibilitou avaliar as frações de diferentes disponibilidades de P às plantas, em solos com eucalipto, o que não pode ser observado em uma análise de rotina de fertilidade, comumente usada. Assim, as frações lábeis, como fonte de P disponível, apresentaram grande potencial para disponibilizar P às plantas, enquanto as frações moderadamente lábeis, como dreno, competem com as plantas pelo P disponível, apesar de apresentarem potencial para nutrição em longo prazo, principalmente pelos significativos estoques de P orgânico.

Pelo fracionamento, a fração orgânica lábil predominou sobre a inorgânica lábil na maioria dos sítios diferentemente do que ocorreu com a extração de Bowman, que apresentou o inverso, indicativo das diferenças entre os métodos, que foi observado também pelas diferenças no poder de extração de P do solo. Enquanto as proporções nos totais de P_i e P_o foram similares no fracionamento, através da extração de Bowman, houve um predomínio do P_i total sobre o P_o total para quase todos os sítios avaliados.

A grande especificidade dos sítios, com diferentes características edáficas e de manejo que resultaram em grande dissimilaridade entre os sítios, evidenciou o quanto estas características influenciaram na distribuição das frações de P no solo.

A matéria orgânica do solo pode influenciar os níveis de P_o total nos solos, associada aos elevados teores de argila e constitui um importante

reservatório de Po que via mineralização pode disponibilizar P para ser reabsorvido pelas plantas, em médio e longo prazo e compensar parte das exportações de P do sistema. Portanto, recomenda-se o correto manejo dos sistemas que favoreça a manutenção dos resíduos após colheita com acúmulo de matéria orgânica.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abraf. (2013). Anuário estatístico ABRAF 2013. *Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas*, 148.
- Agbenin, J. O., Tiessen, H. (1994). Phosphorus transformations in a toposequence of lithosols and cambisols from semiarid northeastern Brazil. *Geoderma*, 62(4), 345-362.
- Alvarez V., V. H., Ribeiro, A. C. (1999). Calagem. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 43-60).
- Araújo, M. S. B., Schaefer, C. E. R., Sampaio, E. V. S. B. (2004). Soil phosphorus fractions from toposequences of semi-arid Latosols and Luvisols in northeastern Brazil. *Geoderma*, 119(3-4), 309-321.
- Baláž, M., Vosátka, M. (1997). Vesicular-arbuscular mycorrhiza of *Calamagrostis villosa* supplied with organic and inorganic phosphorus. *Biologia Plantarum*, 39(2), 281-288.
- Barros, N. F., Neves, J. C. L., Novais, R. F. (2000). Recomendação de fertilizantes minerais em plantios de eucalipto. In J. L. M. Gonçalves & V. Benedetti (Eds.), *Nutrição e fertilização florestal* (pp. 270-286). Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais.
- Barros, N. F., Neves, J. C. L., Novais, R. F. (2014). Nutrição e adubação mineral do eucalipto. In A. B. Vale, C. C. Machado, J. M. M. Pires, M. B. Vilar, C. B. Costa, A. P. Nacif (Eds.), *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e*

- ambiência* (pp. 187-208). Viçosa - MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF.
- Barros, N. F., Novais, R. F. (1999). Eucalipto. In A. C. Ribeiro, P. T. G. Guimarães, V. H. Alvarez V. (Eds.), *Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais* (5 ed., pp. 303-305).
- Bataglia, O. C., Furlani, A. M. C., Teixeira, J. P. F., Furlani, P. R., Gallo, J. R. (1983). Métodos de análise química de plantas Vol. 78. Boletim Técnico (pp. 48).
- Bazani, J. H., Gonçalves, J. L. M., Rocha, J. H. T., Melo, E. S. A. C., Prieto, M. (2014). Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. *Informações Agronômicas*, 1-11.
- Beck, M. A., Sanchez, P. A. (1994). Soil-phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a typic paleudult. *Soil Science Society of America Journal*, 58(5), 1424-1431.
- Booth, T. H. (2013). Eucalypt plantations and climate change. *Forest Ecology and Management*, 301(0), 28-34.
- Bowman, R. A. (1989). A sequential extraction procedure with concentrated sulfuric-acid and dilute base for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 53(2), 362-366.
- Bowman, R. A., Cole, C. V. (1978). Transformations of organic phosphorus substrates in soils as evaluated by NaHCO_3 extraction. *Soil Science*, 125(1), 49-54.
- Bowman, R. A., Moir, J. O. (1993). Basic EDTA as an extractant for soil organic phosphorus. *Soil Science Society of America Journal*, 57(6), 1516-1518.
- Brady, N. C., Weil, R. R. (2013). *Elementos da natureza e propriedades dos solos* (Bookman Ed. 3ª edição ed.). Porto Alegre - RS.
- Cardoso, I., Janssen, B., Oenema, O., Kuyper, T. (2003). Phosphorus pools in Oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58(1), 55-64.
- Condon, L. M., Moir, J. O., Tiessen, H., Stewart, J. W. B. (1990). Critical-evaluation of methods for determining total organic phosphorus in tropical soils. *Soil Science Society of America Journal*, 54(5), 1261-1266.

- Cross, A. F., Schlesinger, W. H. (1995). A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: Applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. *Geoderma*, 64(3-4), 197-214.
- Cunha, G. d. M., Gama-Rodrigues, A. C. d., Costa, G. S., Velloso, A. C. X. (2007). Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 667-672.
- Dick, W. A., Tabatabai, M. A. (1977). Determination of Orthophosphate in Aqueous Solutions Containing Labile Organic and Inorganic Phosphorus Compounds. *J. Environ. Qual.*, 6(1), 82-85.
- Dieter, D., Elsenbeer, H., Turner, B. L. (2010). Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *CATENA*, 82(2), 118-125.
- Embrapa. (1999). *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes* (E. solos Ed.). Brasília - DF, Brasil: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.
- Fao. (1981). Eucalypts for planting FAO Forestry Series Vol. 11. M. R. Jacobs (Ed.) (pp. 735).
- Farias, D. R. d., Oliveira, F. H. T. d., Santos, D., Arruda, J. A. d., Hoffmann, R. B., Novais, R. F. (2009). Fósforo em solos representativos do estado da Paraíba: I- isothermas de adsorção e medidas do fator capacidade de fósforo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 623-632.
- Fontes, A. G., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Sales, M. V. S., Costa, M. G., Machado, R. C. R. (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, 1-23.
- Friesen, D. K., Rao, I. M., Thomas, R. J., Oberson, A., Sanz, J. I. (1997). Phosphorus acquisition and cycling in crop and pasture systems in low fertility tropical soils. *Plant and Soil*, 196(2), 289-294.
- Frizano, J., Vann, D. R., Johnson, A. H., Johnson, C. M., Vieira, I. C. G., Zarin, D. J. (2003). Labile Phosphorus in Soils of Forest Fallows and Primary Forest in the Bragantina Region, Brazil. *Biotropica*, 35(1), 2-11.
- Fuentes, B., Bolan, N., Naidu, R., Mora, M. d. I. L. (2006). PHOSPHORUS IN ORGANIC WASTE-SOIL SYSTEMS. *Revista de la ciencia del suelo y nutrición vegetal*, 6, 64-83.

- Gama-Rodrigues, A. C., Barros, N. F. (2002). Ciclagem de nutrientes em floresta natural e plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Árvore*, 26(2), 193-207.
- Gama-Rodrigues, A. C., Sales, M. V. S., Silva, P. S. D., Comerford, N. B., Cropper, W. P., Gama-Rodrigues, E. F. (2014). An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. *Biogeochemistry*, 118(1-3), 453-469.
- Gatiboni, L. C., Brunetto, G., Rheinheimer, D. S., Kaminski, J. (2013). Fracionamento químico das formas de fósforo do solo: uso e limitações *Tópicos em Ciência do Solo* (Vol. 8, pp. 141-187).
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Brunetto, G. (2008). Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatases ácidas durante a diminuição do fósforo disponível no solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43, 1085-1091.
- Gatiboni, L. C., Kaminski, J., Rheinheimer, D. d. S., Flores, J. P. C. (2007). Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31, 691-699.
- Gonçalves, J. L. d. M., Alvares, C. A., Higa, A. R., Silva, L. D., Alfenas, A. C., Stahl, J., . . . Epron, D. (2013). Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301(0), 6-27.
- Guerra, J. G. M., Almeida, D. L. d., Santos, G. d. A., Fernandes, M. S. (1996). Conteúdo de fósforo orgânico em amostras de solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 31(4), 291-299.
- Guo, F., Yost, R. S. (1998). Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. *Soil Science*, 163(10), 822-832.
- Hair Jr, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., Anderson, R. E., Tatham, R. L. (2009). *Análise Multivariada de Dados* (S. t. Anna, Trans. Bookman Ed. 6 ed.). Porto Alegre – RS, Brasil.
- Hayes, J. E., Richardson, A. E., Simpson, R. J. (2000). Components of organic phosphorus in soil extracts that are hydrolysed by phytase and acid phosphatase. *Biology and Fertility of Soils*, 32(4), 279-286.
- Hedley, M. J., Stewart, J. W. B., Chauhan, B. S. (1982). Changes in inorganic and organic soil-phosphorus fractions induced by cultivation practices and by

- laboratory incubations *Soil Science Society of America Journal*, 46(5), 970-976.
- Hocking, P. J. (2001). Organic acids exuded from roots in phosphorus uptake and aluminum tolerance of plants in acid soils *Advances in Agronomy* (Vol. Volume 74, pp. 63-97): Academic Press.
- Joner, E. J. (2000). The effect of long-term fertilization with organic or inorganic fertilizers on mycorrhiza-mediated phosphorus uptake in subterranean clover. *Biology and Fertility of Soils*, 32(5), 435-440.
- Laclau, J.-P., Ranger, J., de Moraes Gonçalves, J. L., Maquère, V., Krusche, A. V., M'Bou, A. T., . . . Deleporte, P. (2010). Biogeochemical cycles of nutrients in tropical Eucalyptus plantations: Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1771-1785.
- Laclau, J. P., Gonçalves, J. L. D., Stape, J. L. (2013). Perspectives for the management of eucalypt plantations under biotic and abiotic stresses. *Forest Ecology and Management*, 301, 1-5.
- Lardy, L. C., Brossard, M., Assad, M. L. L., Laurent, J. Y. (2002). Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. *Agriculture Ecosystems Environment*, 92(2-3), 147-158.
- Lleras, C. (2005). Path analysis. *Encyclopedia of social measurement*, 3, 25-30.
- Moreira, F. M. S., Siqueira, J. O. (2006). *Microbiologia e bioquímica do solo* (2ª ed.). Lavras - MG: Editora UFLA.
- Macedo, R. L. G., Venturin, R. P., Venturin, N., Vale, R. S., Vale, F. A. F. (2014). Plasticidade ecofisiológica. In A. B. Vale, C. C. Machado, J. M. M. Pires, M. B. Vilar, C. B. Costa, A. P. Nacif (Eds.), *Eucaliptocultura no Brasil: silvicultura, manejo e ambiência* (pp. 421-440). Viçosa - MG: Sociedade de Investigações Florestais - SIF.
- Murphy, J., Riley, J. P. (1962). A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27(0), 31-36.
- Negassa, W., Leinweber, P. (2009). How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil

- phosphorus: A review. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science-Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde*, 172(3), 305-325.
- Nogueira, R. S., Oliveira, T. S., Sá Mendonça Filho, E., Filho, J. A. A. (2008). Phosphorus fractions in a Luvisolo Crômico Órtico under agroforestry systems in the Sobral, Ceará, Brazil. *Revista Ciencia Agronomica*, 39(4), 494-502.
- Novais, R. F., Barros, N. F., Neves, J. C. L. (1986). Interpretação de análise química do solo para o crescimento de *Eucalyptus* spp. – níveis críticos de implantação e de manutenção. *Revista Árvore*, 10, 105-111.
- Novais, R. F., Smyth, T. J. (1999). *Fósforo em solo e planta em condições tropicais* (UFV Ed.). Viçosa - MG, Brasil.
- Nwoke, O. C., Vanlauwe, B., Diels, J., Sanginga, N., Osonubi, O. (2004). Impact of residue characteristics on phosphorus availability in West African moist savanna soils. *Biology and Fertility of Soils*, 39(6), 422-428.
- Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D., Oberson, A. (2004). Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(4), 667-675.
- Oliveira, R. I., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Pereira, M. G., Fontana, A. (2014). Organic phosphorus in diagnostic surface horizons of different Brazilian soil orders. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38(5), 1411-1420.
- Raij, B. van., Andrade, J.C., Cantarella, H., Quaggio, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade do solo. Campinas: Instituto Agrônomo, 2001. 285p.
- Rheinheimer, D. d. S., Anghinoni, I. (2003). Accumulation of Soil Organic Phosphorus by Soil Tillage and Cropping Systems Under Subtropical Conditions. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 34(15-16), 2339-2354.
- Rheinheimer, D. d. S., Anghinoni, I., Conte, E. (2000). Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 24(3), 589-597.
- Rheinheimer, D. d. S., Gatiboni, L. C., Kaminski, J. (2008). Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. *Ciência Rural*, 38(2), 576-586.

- Rheinheimer, D. S., Cassol, P. C., Kaminski, J., Anghinoni, I. (2008). Fósforo orgânico do solo *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais* (2 ed., pp. 101-112). Porto Alegre - RS, Brasil.
- Richardson, A. E., Simpson, R. J. (2011). Soil microorganisms mediating phosphorus availability update on microbial phosphorus. *Plant Physiol*, 156(3), 989-996.
- Rita, J. C. d. O., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Zaia, F. C., Nunes, D. A. D. (2013). Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 1207-1215.
- Rocha, J. H. T. (2014). *Reflexos do manejo de resíduos florestais na produtividade, nutrição e fertilidade do solo em plantações de Eucalyptus grandis*. (Mestrado Dissertação), Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP.
- Schachtman, D. P., Reid, R. J., Ayling, S. M. (1998). Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol*, 116(2), 447-453.
- Schmitt, D. E., Comin, J. J., Gatiboni, L. C., Tiecher, T., Lorensini, F., Melo, G. W. B. d., . . . Brunetto, G. (2013). Phosphorus fractions in sandy soils of vineyards in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 37, 472-481.
- Slazak, A., Freese, D., Matos, E. d. S., Huettl, R. F. (2010). Soil organic phosphorus fraction in pine-oak forest stands in Northeastern Germany. *Geoderma*, 158(3-4), 156-162.
- Souza, R. F. d., Faquin, V., Andrade, A. T. d., Torres, P. R. F. (2007). Formas de fósforo em solos sob influência da calagem e adubação orgânica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 31(6), 1535-1544.
- Tiessen, H., Stewart, J. W. B., Cole, C. V. (1984). Pathways of phosphorus transformations in soils of differing pedogenesis *Soil Science Society of America Journal*, 48(4), 853-858.
- Turner, B. L. (2006). Organic phosphorus in Madagascan rice soils. *Geoderma*, 136(1-2), 279-288.
- Turner, B., Wells, A., Condon, L. (2014). Soil organic phosphorus transformations along a coastal dune chronosequence under New Zealand temperate rain forest. *Biogeochemistry*, 121(3), 595-611.

- Turner, B. L. (2008). Resource partitioning for soil phosphorus: a hypothesis. *Journal of Ecology*, 96(4), 698-702.
- Turner, B. L., Engelbrecht, B. M. J. (2011). Soil organic phosphorus in lowland tropical rain forests. *Biogeochemistry*, 103(1-3), 297-315.
- Uriyo, A. P., Kesseba, A. (1975). Amounts and distribution of organic phosphorus in some profiles in tanzania. *Geoderma*, 13(3), 201-210.
- Vincent, A. G., Turner, B. L., Tanner, E. V. J. (2010). Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. *European Journal of Soil Science*, 61(1), 48-57. doi: 10.1111/j.1365-2389.2009.01200.x
- Xavier, F. A. d. S., Almeida, E. F., Cardoso, I. M., Mendonca, E. d. S. (2011). Soil phosphorus distribution in sequentially extracted fractions in tropical coffee-agroecosystems in the Atlantic Forest biome, Southeastern Brazil. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 89(1), 31-44.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C., Gama-Rodrigues, E. F., Moço, M. K. S., Fontes, A. G., Machado, R. C. R., Baligar, V. C. (2012). Carbon, nitrogen, organic phosphorus, microbial biomass and N mineralization in soils under cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 86(2), 197-212.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C. d., Gama-Rodrigues, E. F. d. (2008). Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1191-1197.
- Zaia, F. C., Gama-Rodrigues, A. C. d., Gama-Rodrigues, E. F. d., Machado, R. C. R. (2008). Fósforo orgânico em solos sob agrossistemas de cacau. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 1987-1995.