

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Fertilidade e frações de fósforo em solos sob povoamentos monoespecíficos  
e mistos de *Eucalyptus* e *Acacia mangium***

**Tiago de Oliveira Godinho**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba  
2015**

**Tiago de Oliveira Godinho**  
**Engenheiro Florestal**

**Fertilidade e frações de fósforo em solos sob povoamentos monoespecíficos e mistos de**  
***Eucalyptus e Acacia mangium***

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em:  
Silvicultura e Manejo Florestal

**Piracicaba**  
**2015**

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

Godinho, Tiago de Oliveira

Fertilidade e frações de fósforo em solos sob povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus* e *Acacia mangium* / Tiago de Oliveira Godinho. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2015.

98 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Fracionamento químico 2. Interações ecológicas 3. Nutrição florestal 4. Produtividade  
I. Título

CDD 634.9734  
G585f

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

## DEDICATÓRIA

A todas as pessoas que

de alguma forma

contribuíram para

que pudéssemos viver

em um

MUNDO MELHOR.

**A vocês,**

**dedico**

**este trabalho.**



## AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), à Universidade de São Paulo (USP), ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais e a todos os seus colaboradores, que contribuíram para a minha formação profissional, em especial à Giovana Maria de Oliveira;

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Leonardo de Moraes Gonçalves, pela oportunidade, por desde o primeiro momento se mostrar grande incentivador da minha pesquisa, pelo crédito, confiança, amizade e saberes repassados;

Aos meus ex-orientadores: Marcos Vinicius Winckler Caldeira e Marcelo Nogueira. Vocês fazem parte de toda a minha trajetória acadêmica. Obrigado pela confiança, pois sem ela eu não estaria aqui;

Ao Programa Temático de Silvicultura e Manejo (PTSM) do Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF), por todo apoio logístico e financeiro, e ao coordenador do programa José Carlos Arthur Júnior;

Aos estagiários do PTSM, Eduardo Marques, Camila Denoni, Camila Mazão, Patrícia Torquato, Caio e Marcello Pizzi;

Aos Doutores Jean-Paul Laclau e Jean-Pierre Bouillet e à Dra Maurren Voigtlaender, por gentilmente cederem informações e conselhos essenciais para a realização deste trabalho;

À equipe do viveiro de mudas da ESALQ, Amarildo, Sabino e Natanael, por todo apoio;

À revista Scientia Forestalis, em especial à Editora Executiva Kizzy França, por todo apoio nas publicações;

Às empresas florestais que concederam suas áreas e o apoio de seus funcionários para o trabalho experimental, Suzano Papel e Celulose S/A, em especial ao Eng. Florestal José Luiz Gava, ao Técnico Florestal Fernando Marcio da Silva e aos ajudantes de campo. À International Paper do Brasil Ltda., em especial ao Eng. Florestal Rodrigo Hakamada. À Cenibra (Celulose Nipo-Brasileira S/A), em especial ao Eng. Florestal Fernando Palha Leite, ao Técnico Florestal Gilson dos Santos Gaudereto e Eng. Agrônomo Guilherme Luiz de Jesus;

À equipe da Estação Experimental de Itatinga, em especial ao Rildo Moreira, ao Lorival, à Elaine e às “Tias” do refeitório, por todo apoio na realização das atividades;

Ao Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, por me liberar para que eu pudesse concluir este trabalho, e, em especial, a todos os amigos que pude fazer no instituto;

Ao Jurandir, pelo apoio na realização das análises laboratoriais e todos os ensinamentos filosóficos que me deram forças para a realização deste trabalho. Ao Marcos, Wilfrand e ao professor Pavinato, pela ajuda para a realização do fracionamento de P. À professora Marisa Piccolo, por disponibilizar a realização das análises de Ct;

Ao Prof. Dr. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues e ao Marlon Costa, ambos da UENF, onde realizei treinamento a respeito do fracionamento de P;

À CAPES e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pela bolsa de estudos, Processo FAPESP: 2010/16623-9 e 2011/20996-8. Sou muito grato e espero ser capaz de retribuir o investimento e a confiança depositados em mim. Agradeço à assessoria "ad hoc" que acreditou no meu projeto e no meu trabalho;

Aos amigos do PTSM, José Rocha, Eduardo, Ayeska, José Bazani, Ranieri, Eric, Carolina, Fábio, Yesid e Estela, por todo apoio, desde a fase de redação do projeto até às coletas e preparo das amostras, e pelos bons momentos que dividimos. Acredito que teremos histórias para contar pelo resto de nossas vidas;

Aos amigos de Piracicaba, em especial a Everton Hilo, Luiz Francisco, Leonardo Martins, Cartiane Rocha, Sandra, Fábio Coutinho e ao Luiz Xavier;

Aos membros da comissão do exame de qualificação, pelas críticas e sugestões dadas a este trabalho;

Aos membros da comissão julgadora, pelo aceite do convite para participar da defesa;

A todos os autores citados nas referências bibliográficas, pelos trabalhos pioneiros que possibilitaram o desenvolvimento desta tese;

A todos que contribuíram de alguma forma para a elaboração desta tese e para a minha formação;

À minha namorada Sarah, que me incentivou e ajudou a superar os desânimos ao final desta etapa, e, finalmente, à minha família, que sempre me conduziu e apoiou incondicionalmente durante toda a minha vida, especialmente nos momentos de decisão, como este, em que me deram a força necessária para a finalização de mais uma etapa muito importante.

**Muito Obrigado!**

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Tiago de Oliveira Godinho, filho de Marilea Reis de Oliveira Godinho e Dorgal de Aguiar Godinho, nasceu em 08 de novembro de 1984, em Vila Velha, Espírito Santo.

Morou na cidade de São Luís, no estado do Maranhão, até os seus seis anos de idade, mudando para a cidade de Serra, no estado do Espírito Santo.

Em 2003, ingressou no curso de Engenharia Florestal, no Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), na Cidade de Alegre, graduando-se em fevereiro de 2009.

Ainda no mesmo ano e na referida universidade, ingressou no Mestrado em Ciências Florestais, concluindo-o em 2011, quando se mudou para a cidade de Piracicaba/SP, para cursar o doutorado em Recursos Florestais, na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), da Universidade de São Paulo (USP).

Em novembro de 2012, começou a trabalhar como pesquisador no Instituto Capixaba de Pesquisa, Assistência Técnica e Extensão Rural, onde, em 2013, se tornou responsável técnico pelo Laboratório de Química de Solos.



## SUMÁRIO

RESUMO .....	11
ABSTRACT .....	13
LISTA DE FIGURAS .....	15
LISTA DE TABELAS .....	17
LISTA DE SIGLAS .....	19
1       INTRODUÇÃO.....	21
2       REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1     Plantios mistos .....	25
2.2     Fósforo no solo.....	27
3       MATERIAL E MÉTODOS.....	35
3.1     Localização e caracterização das áreas de estudo .....	35
3.2     Coleta e preparo das amostras de solo .....	38
3.3     Análises químicas dos solos.....	40
3.4     Fracionamento de P no solo .....	41
3.5     Ataque sulfúrico no solo .....	44
3.6     Análise granulométrica do solo.....	45
3.7     Produtividade florestal .....	46
3.8     Análises estatísticas.....	47
4       RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	49
4.1     Atributos químicos dos solos .....	49
4.2     Frações de P nos solos.....	55
4.3     Labilidade das frações de P .....	73
4.4     Produtividade florestal.....	78
5       CONCLUSÕES .....	85
REFERÊNCIAS .....	87



## RESUMO

### **Fertilidade e frações de fósforo em solos sob povoamentos monoespecíficos e mistos de *Eucalyptus* e *Acacia mangium***

O plantio consorciado com leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio (N) pode incrementar a produtividade das árvores de eucalipto. A dinâmica do fósforo (P) em ecossistemas naturais e manejados é estabelecida, em grande parte, pelas interações do nutriente com as fases inorgânica e orgânica no solo e com os microrganismos. Portanto, pesquisas detalhadas sobre a dinâmica e a disponibilidade do P requerem a separação e a identificação das diferentes frações do nutriente no solo. A razão teórica do uso de plantios consorciados com leguminosas é propiciar maiores teores de N e P, em decorrência da maior qualidade e diversidade vegetal. Isso permitiria o incremento nos teores de carbono total (Ct), nitrogênio total (Nt), P e uma menor relação C/N e C/P, favorecendo a rápida ciclagem dos nutrientes e, conseqüentemente, o melhor desenvolvimento do eucalipto. Com o intuito de esclarecer o efeito dos plantios mistos na modificação da fertilidade e das frações de P no solo, este estudo integra os seguintes objetivos: i) avaliar a fertilidade do solo; ii) avaliar as frações de P no solo; iii) determinar as relações entre as frações de P no solo e atributos físicos e químicos do solo; iv) compreender o efeito da fertilidade e das modificações das frações do P no solo, na produtividade dos plantios. O estudo foi realizado em quatro áreas experimentais, localizadas nos municípios de Itatinga, Bofete e Luiz Antônio/SP, e em Santana do Paraíso/MG. Foi avaliada a produtividade dos povoamentos puros de eucalipto ou acácia e o misto entre as duas espécies e os solos sob esses tratamentos. Foram coletadas amostras de solo em duas profundidades (0 – 5 e 5 – 10 cm), sendo determinados os teores de macro, micronutrientes, Ct, Nt, as frações de P e a granulometria. O curto período de consórcio entre as espécies não permitiu verificar se houve tendência no incremento dos teores dos nutrientes e nas frações de P. No entanto, para os plantios que estavam na segunda rotação de cultivo sob os mesmos tratamentos, as diferenças foram maiores, indicando que, com os anos de cultivo consorciados este acréscimo dos teores dos nutrientes e nas frações de P possam ser mais significativos. A percentagem de P orgânico (Po) em relação ao P total do solo variou entre 16 e 36%, desconsiderando o P residual, a percentagem de Po, variou entre 22 e 60%. Correlações significativas e positivas foram encontradas entre os atributos e as frações de P no solo, com a produtividade das culturas. Esses resultados indicam melhor manutenção nutricional nos plantios que contém a *A. mangium* (Acácia e Misto), pela capacidade de melhorar a fertilidade do solo e, ainda, aumentar a diversidade das culturas. A não correlação do crescimento da *A. mangium* com as frações lábeis de P e a correlação positiva de seu crescimento com as frações moderadamente lábeis e não lábeis sugerem que a espécie é capaz de absorver o P oriundo de frações não prontamente disponíveis. O eucalipto teve alta competição com a *A. mangium* nos plantios mistos, principalmente nas áreas experimentais de clima mais ameno (Itatinga, Bofete e Luiz Antônio), acarretando em menor crescimento da *A. mangium*.

Palavras-chave: Fracionamento químico; Interações ecológicas; Nutrição florestal; Produtividade



## ABSTRACT

### **Fertility and phosphorus fractions in soils under monospecific and mixed stands of *Eucalyptus* and *Acacia mangium***

The intercropping planting with nitrogen-fixing species can enhance the productivity of eucalyptus plants. The dynamics of P in natural ecosystems is established and managed, in large part, by interactions of inorganic and organic phases of soil nutrient and soil microorganisms. Therefore, detailed research on the dynamics and the availability of phosphorus (P) require separation and identification of the different forms of the nutrient in the soil. The theoretical reason for using intercropping with leguminous plant is to provide higher levels of nitrogen (N) and P, due to the higher quality and plant diversity. This would allow an increase in the total carbon (Ct), total nitrogen (Nt) and P levels, and a smaller C/N and C/P ratios, favoring a rapid cycling of nutrients and, consequently, better development of eucalyptus. Given the above, in order to clarify the effect of mixed plantings in fertility change and P fractions in the soil, this study includes the following objectives: i) to evaluate soil fertility; ii) evaluate the P fractions in soil; iii) determine the relationship between P fractions in soil and physical and chemical properties of the soil; iv) understand the effect of fertility and changes in P fractions in soil, on the productivity of plantations. The study was conducted in four experimental areas, located in the municipalities of Itatinga, Bofete and Luiz Antônio/SP, and Santana do Paraíso/MG. Productivity of single eucalyptus or acacia plantations and mixed between the two species and soils under these treatments was evaluated. Soil samples were collected at two depths (0 - 5 and 5 - 10 cm), and where were determined contents of macro, micronutrients, Ct, Nt, P fractions and particle size. The consortium short period allowed between species not verify whether there was a trend in increasing the nutrient content and the fractions of P. However, for the crops that were in the second rotation cultivation under the same treatment, the differences were higher, indicating that with the years of intercropping this increase in the levels of nutrients and in the P fractions can be more significant. The percentage of organic P (Po) in relation to the total P soil varied between 16 and 36% excluding the residual P, the proportion Po varied between 22 and 60%. Significant positive correlations were found between the attributes and the fractions of P in soil with crop yields. These results indicate better nutritional maintenance on crops containing the *A. mangium* (Acacia and Mixed), the ability to improve soil fertility and also increase the diversity of crops. The non-correlation of the growth of *A. mangium* with the labile fractions of P and the positive correlation of growth with the moderately labile and non-labile fractions suggest that the species is able to absorb the P derived fractions not readily available. Eucalyptus had high competition with *A. mangium* in mixed plantings, especially in experimental areas of milder weather (Itatinga, Bofete and Luiz Antonio), resulting in lower growth of *A. mangium*.

Keywords: Chemical fractionation; Ecological interactions; Forestry nutrition; Productivity



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Modificações nas formas de P no solo, com o avanço do intemperismo (GATIBONI et al., 2013 adaptado de WALKER; SYERS, 1976).....30
- Figura 2 - Localização geográfica das quatro áreas experimentais do estudo..... 35
- Figura 3 - Esquema de distribuição das árvores nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto.. 38
- Figura 4 - Esquema dos locais de coleta de solo..... 39
- Figura 5 - (a) Locais de coletas na entrelinha de plantio e (b) Buracos após a coleta de solo..40
- Figura 6 – Esquema da técnica do fracionamento de P proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações de Condrón, Goh e Newman (1985) e Gatiboni (2003).....43
- Figura 7 – Distribuição de P inorgânico, orgânico e residual, em duas camadas no solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nos experimentos localizados em (a) Itatinga/SP, (b) Bofete/SP, (c) Luiz Antônio/SP e (d) Santana do Paraíso/MG.....74
- Figura 8 – Distribuição das frações de P quanto à sua labilidade, em duas camadas no solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nos experimentos localizados em (a) Itatinga/SP, (b) Bofete/SP, (c) Luiz Antônio/SP e (d) Santana do Paraíso/MG. Valores seguidos de diferentes letras, dentro de cada camada, nos diferentes experimentos, diferem entre si pelo Teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% pelo teste F; \*  $p < 0,05$ ; e \*\*  $p < 0,01$  pelo teste F.....77
- Figura 9 – Produtividade de lenho e resíduos da colheita (folhas, galhos vivos, galhos mortos e casca) nos tratamentos Acácia (A), Eucalipto (E) e Misto (M), nos experimentos localizados em Itatinga/SP, aos 72 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (a); em Bofete/SP, aos 75 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (b); em Luiz Antônio/SP, aos 73 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (c); e, em Santana do Paraíso/MG, aos 76 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (d). Letras diferentes nas colunas das biomassas do lenho indicam diferença significativa entre os tratamentos na mesma área ( $p < 0,05$ ).....79



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Frações de P no solo, em diferentes locais, tipos de solo e vegetação.....	34
Tabela 2 – Localização, altitude, relevo e características climáticas (série histórica) das áreas experimentais do estudo.....	36
Tabela 3 – Principais características experimentais.....	37
Tabela 4 - Tratamentos utilizados no experimento....	38
Tabela 5 – Teores de óxidos de Si, Al, Fe, Ti e Mn e relações moleculares Ki e Kr nos solos, nas diferentes áreas experimentais.....	45
Tabela 6 – Análise granulométrica de duas camadas do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais.....	46
Tabela 7 – Atributos químicos dos solos em duas camadas (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais.....	53
Tabela 8 – Teores de micronutrientes nos solos em duas camadas (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais.....	55
Tabela 9 – Frações de P em duas camadas do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais.....	58
Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Itatinga/SP.....	60
Tabela 11 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Bofete/SP.....	62
Tabela 12 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Luiz Antônio/SP.....	64
Tabela 13 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Santana do Paraíso/MG.....	67
Tabela 14 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, considerando todas as áreas experimentais.....	72
Tabela 15 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos do solo, altura total e circunferência à altura do peito das árvores, nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG).....	80

Tabela 16 – Coeficientes de correlação de Spearman entre as frações de P no solo, a altura total e a circunferência à altura do peito das árvores nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG).....82

Tabela 17 – Coeficientes de correlação de Spearman entre a altura total e a circunferência à altura do peito das árvores, nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto, em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG)..83

**LISTA DE SIGLAS**

- CAP – Circunferência à Altura do Peito
- COS – Carbono Orgânico do Solo
- Ct – Carbono Total
- MO – Matéria Orgânica
- MOS – Matéria Orgânica do Solo
- Nt – Nitrogênio Total
- P<sub>BIC</sub> – Fósforo Inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>
- P<sub>HCl</sub> – Fósforo Inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>
- P<sub>HID-0,1</sub> – Fósforo Inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>
- P<sub>HID-0,5</sub> – Fósforo Inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>
- Pi-L – Fósforo Inorgânico Lábil
- Pi-ML – Fósforo Inorgânico Moderadamente Lábil
- Pi-ÑL – Fósforo Inorgânico Não Lábil
- P<sub>RTA</sub> – Fósforo Inorgânico extraído por Resina de Troca Aniônica
- P-mel – P extraído por Mehlich-1
- P<sub>OBIC</sub> – Fósforo Orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>
- P<sub>OHID-0,1</sub> – Fósforo Orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>
- P<sub>OHID-0,5</sub> – Fósforo Orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>
- Po-L – Fósforo Orgânico Lábil
- Po-ML – Fósforo Orgânico Moderadamente Lábil
- Po-ÑL – Fósforo Orgânico Não Lábil
- P-rem – Fósforo remanescente
- P<sub>Residual</sub> – Fósforo Residual
- P<sub>TOTAL</sub> – Fósforo Total



## 1 INTRODUÇÃO

O setor florestal brasileiro tem crescente relevância para o país, visto que a área ocupada com florestas plantadas totalizou aproximadamente 7,2 milhões de hectares em 2012. Destes, 71% são plantados com espécies do gênero *Eucalyptus* e 2,06% com espécies do gênero *Acacia*. Em 2012, o valor bruto da produção obtido pelo setor de base florestal associado às florestas plantadas totalizou R\$ 56,3 bilhões, um acréscimo de 4,6% em relação a 2011. Os tributos arrecadados corresponderam a R\$ 7,6 bilhões ou 0,5% da arrecadação nacional (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA - ABRAF, 2013).

A sustentabilidade da produção das florestas plantadas, a médio e longo prazo, tem grandes desafios, pois pouco se conhece sobre os impactos ambientais ocasionados pela substituição das florestas naturais por plantações florestais mistas. Os maiores problemas em plantios florestais no Brasil estão relacionados ao seu estabelecimento em regiões de baixa aptidão agrícola, compostas por solos de baixa fertilidade natural e pouca reserva de nutrientes (BARROS; NOVAIS; NEVES, 1990; BELLOTE; SILVA, 2000; GONÇALVES et al., 2008a), comumente nos Latossolos de textura média e nos Neossolos Quartzarênicos (GONÇALVES et al., 2000, 2008b, 2013). Sob tais circunstâncias, o plantio sucessivo de espécies florestais, que tem grande capacidade de extração de nutrientes, gera um impacto significativo sobre as reservas minerais dos solos, principalmente em solos naturalmente inférteis. Conseqüentemente, há redução da qualidade dos solos, quando não devidamente manejados, necessitando, portanto, de uma estratégia de fertilização para o adequado desenvolvimento das plantas, sem perda de produtividade em rotações subsequentes. Neste sentido, formas de manejo que visem à entrada e, ou, manutenção dos teores de nutrientes nos ecossistemas, vêm sendo amplamente buscadas, objetivando, sobretudo, a sustentabilidade ambiental dos plantios, além da certificação florestal.

A melhoria da fertilidade do solo é um indicador importante de sustentabilidade do sistema de produção, tanto no sentido de uso dos fertilizantes de forma mais eficiente, quanto na avaliação das possíveis perdas e respectivas conseqüências técnicas, econômicas e ambientais (RODRIGUES, 2013). A compreensão dos fenômenos básicos da dinâmica do fósforo (P) no solo auxilia na tomada de decisão tanto sobre a necessidade de adição, quanto para a definição de doses e dos modos de aplicação de fertilizantes fosfatados. O tipo mais comum de resposta à fertilização encontrada em plantações florestais é aquela na qual ocorre uma aceleração do crescimento das árvores em idades mais jovens (GONÇALVES et al.,

2008b). Entretanto, depois do período de rápido crescimento, as florestas voltam ao seu ritmo de desenvolvimento, após o fechamento das copas, dependendo da qualidade do sítio (NAMBIAR, 1999).

As formas e o grau de labilidade do P no solo variam com as características e propriedades do solo. Em solos jovens e com menor grau de intemperismo, os fosfatos de cálcio são os principais fornecedores de P aos organismos vivos. Por outro lado, em solos altamente intemperizados, a biociclagem dos fosfatos orgânicos assume grande importância na manutenção da biodisponibilidade, embora não seja suficiente para a obtenção da máxima produtividade econômica das culturas comerciais (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008). A dinâmica do P em ecossistemas naturais e manejados é estabelecida, em grande parte, pelas interações do nutriente com as fases inorgânica e orgânica no solo, e com os microrganismos. Portanto, pesquisas detalhadas sobre a dinâmica e a disponibilidade do P requerem a separação e a identificação das diferentes frações do nutriente no solo (SOUZA FILHO, 2014).

Nesse sentido, têm sido propostos e testados plantios de eucaliptos consorciados com espécies leguminosas (p. ex.: *A. mangium*) para reduzir os problemas de depleção de nitrogênio (N) e fixação de P (FORRESTER; BAUHUS; KHANNA, 2004), sobretudo em solos tropicais com predominância de cargas variáveis (BOUILLET et al., 2008; JOURDAN et al., 2008; LACLAU et al., 2008). A razão teórica do uso de plantios consorciados com leguminosas é propiciar maiores teores de N e P, em decorrência da maior qualidade e da diversidade vegetal (BINI et al. 2013a, 2013b).

Plantações mistas, com leguminosas fixadoras de  $N_2$ , destacam-se como uma opção de manejo sustentável do ecossistema, sendo um dos desígnios da intensificação ecológica. Neste contexto, a *Acacia mangium* além de ser uma espécie fixadora de  $N_2$ , que pode beneficiar/facilitar os cultivos de *Eucalyptus* spp., uma vez que as micorrizas presentes na *A. mangium* permitem maior absorção de P no solo, gerando uma serapilheira mais rica em P. Com a decomposição e a posterior mineralização dessa serapilheira, esse P seria mais facilmente absorvido pelo *Eucalyptus* spp. No entanto, precisa-se de um conhecimento aprofundado das diferentes interações ecológicas entre as espécies, buscando como alvo interações relacionadas à facilitação.

O desenvolvimento de novas tecnologias, como genótipos mais eficientes na utilização dos recursos nutricionais dos solos, torna-se cada vez mais necessário. Com isso, é possível que se tenha produtividades cada vez mais altas, o que é desejado pelas empresas florestais.

No entanto, esses materiais podem depauperar a fertilidade do solo, pois extraem maiores quantidades de nutrientes por apresentarem maior produtividade.

Em plantações de eucalipto, com produtividade média de 20 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, exporta na madeira e na casca o equivalente a 5 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de P e são aplicados em média de 60 a 80 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (GONÇALVES, 2011). Por isso, torna-se fundamental a reposição e a correção das limitações do solo, por meio de fertilizações ou associações com espécies fixadoras de N<sub>2</sub>. Isso permitiria o incremento nos teores de carbono (Ct), nitrogênio (Nt) e P e uma menor relação C/N e C/P, favorecendo a rápida ciclagem dos nutrientes. A maioria dos estudos em países tropicais e subtropicais, em solos altamente intemperizados, como os deste estudo, mostrou forte resposta dos plantios de eucalipto às fertilizações fosfatadas.

Para tanto, foram testadas as seguintes hipóteses:

- I. Os plantios mistos com leguminosas fixadoras de N<sub>2</sub> aumentam a fertilidade do solo;
- II. Os plantios mistos modificam a dinâmica do P, promovendo o acúmulo de frações orgânicas em camadas superficiais e o aumento das frações de maior labilidade no solo;
- III. O consórcio favorece o maior desenvolvimento e a produção das árvores de eucalipto e acácia.

Desse modo, com o intuito de esclarecer o efeito dos plantios mistos na modificação da fertilidade e das frações de P no solo, este estudo integra os seguintes objetivos: i) avaliar a fertilidade do solo; ii) avaliar as frações de P no solo, em função dos cultivos monoespecíficos ou mistos; iii) determinar as relações entre as frações de P no solo e os atributos físicos e químicos do solo; iv) compreender o efeito da fertilidade e das modificações das frações do P no solo na produtividade dos plantios.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Plantios mistos

Do ponto de vista econômico, a melhor espécie florestal é aquela que cresce mais no menor intervalo de tempo, produzindo o máximo de biomassa de madeira e necessitando do mínimo de fertilizantes e água para o seu desenvolvimento. Entretanto, nem sempre o que é ótimo economicamente em curto prazo é o melhor para o ecossistema. Por isto, antes de se tomar qualquer decisão sobre a intervenção num ecossistema natural, como campo, capoeira, floresta nativa, entre outros, por meio da introdução de uma ou mais espécies florestais, na forma de plantios homogêneos ou mistos, é preciso: fazer estudos experimentais; acercar-se a respeito da ecologia de cada uma das espécies; e avaliar seus reflexos no ecossistema como um todo. Uma maior produtividade dos plantios consorciados, em relação aos plantios monoespecíficos, ocorre somente quando a interação entre as duas espécies aumenta a eficiência de uso de uma fonte de nutriente, ou se uma delas aumenta o fornecimento de alguma fonte de nutriente (BAUHUS; VAN WINDEN; NICOTRA, 2004).

Inicialmente, devem-se avaliar as condições naturais do local onde as espécies serão implantadas (vegetação, solo, relevo, geologia, clima, entre outros). Uma vez plantadas, deve-se realizar um monitoramento permanente da dinâmica das condições edafoclimáticas da área de plantio, com um acompanhamento periódico do desenvolvimento dos povoamentos, bem como com um inventário da biomassa produzida e da dinâmica dos nutrientes. Portanto, se a meta do silvicultor for assegurar a sustentabilidade dos ecossistemas como um todo, a fim de que estes possam ser utilizados pelas gerações futuras, ele deve ter conhecimento das características potenciais das espécies florestais, para que tenha condições de optar pela mais conveniente. Pois, caso contrário, os efeitos poderão ser ecológico e economicamente comprometidos.

Diversas espécies de eucalipto têm sido empregadas em larga escala em reflorestamentos e agrossilviculturas no Brasil, desde o início do século XX. Entretanto, sua expansão foi impulsionada a partir de meados da década de 1960, com o estabelecimento do programa de incentivos fiscais, que visava à sua utilização como matéria-prima nas indústrias, sobretudo, para obter celulose e energia (LIMA, 1987). O rápido crescimento dessa árvore, sua alta produtividade e diversidade de espécies (MORA; GARCIA, 2000), sua adaptação às mais variadas condições edafoclimáticas e a ampla gama de sua utilização explicam o sucesso obtido pelo eucalipto (GONÇALVES et al., 2002; GARAY et al., 2003).

Plantações consorciadas de *Eucalyptus* com espécies arbóreas fixadoras de N<sub>2</sub> podem produzir quantidades significativamente maiores de biomassa aérea, quando comparadas com plantios homogêneos, ou seja, somente de eucaliptos (BINKLEY et al., 2003; FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2005a). Essa maior produtividade foi encontrada onde havia dois tipos de relação ecológica entre as espécies: a primeira, por meio da utilização dos recursos complementares entre as espécies, tanto a estratificação do dossel, quanto a das raízes; e a segunda, pela facilitação de melhorias nutricionais, articulada à utilização dos recursos complementares (KELTY, 2006).

Segundo levantamento feito por Higa e Higa (2000), espécies de acácia também vêm sendo empregadas para o estabelecimento de plantações florestais, sendo que a espécie *Acacia mangium* Willd. tem mostrado significativa capacidade de adaptação às condições edafoclimáticas brasileiras (FRANCO et al., 1995; FORTES, 2000; ANDRADE; COSTA; FARIA, 2000; GARAY et al., 2003), destacando-se em programas de recuperação de áreas degradadas (FRANCO; FARIA, 1997; BALIEIRO et al., 2004). A *Acacia mangium* Willd. pertence à família Mimosaceae e é uma espécie arbórea leguminosa. O interesse por leguminosas arbóreas é despertado por seu poder de fixação de N atmosférico e sua simbiose com fungos micorrízicos. Os fungos micorrízicos auxiliam na absorção de nutrientes e água, melhorando a atuação da raiz na nutrição da planta (MENDES-FILHO et al., 2009), o que facilita seu estabelecimento em solos pobres em nutrientes e MOS (FRANCO et al., 1995).

As acácias, em seu ambiente natural, são espécies pioneiras, com um bom crescimento, e utilizadas como produto madeireiro e não madeireiro (VOIGTLAENDER, 2012). É uma espécie de rápido crescimento e de vida entre 30 e 50 anos. Adaptada a uma larga faixa de solos (pH em H<sub>2</sub>O de 4,5 a 6,5) nos trópicos úmidos, com um bom crescimento em uma grande variedade de tipos de solos, geralmente ácidos, de média a baixa fertilidade (VADEZ et al., 1995).

Plantações homogêneas têm uma estrutura mais simples que as florestas naturais, em termos de árvores equiâneas, pois possuem maximização da concentração de recursos para o crescimento, manejo simplificado e otimização da colheita de árvores uniformes (EVANS; TURNBULL, 2004; BAUHUS; VAN DER MEER; KANNINEN, 2010). A introdução de espécies arbóreas leguminosas de rápido crescimento pode constituir uma alternativa viável para a sustentabilidade de plantações de eucalipto altamente produtivas (VOIGTLAENDER, 2012). A influência da facilitação da espécie *Falcataria mollucana* sobre árvores de eucalipto foi observada por meio do aumento da disponibilidade de P no solo, resultante das altas taxas de fixação de N<sub>2</sub> em solos com baixos teores de P (BOYDEN; BINKLEY; SENOCK, 2005).

Plantios mistos, em que o eucalipto e as espécies arbóreas capazes de fixar  $N_2$  crescem no mesmo povoamento, têm potencial de melhorar a ciclagem de nutrientes (FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2005b), aumentar a fertilidade do solo (GARAY et al., 2004), a produção de biomassa (BINKLEY et al., 2003; FORRESTER; BAUHUS; KHANNA, 2004), o sequestro de carbono (KAYE et al., 2000; RESH; BINKLEY; PARROTA, 2002; FORRESTER et al., 2006), a diversificação de produtos florestais (KHANNA, 1997; MONTAGNINI, 2000), além de melhorar as propriedades físicas e a diversidade biológica do solo (GARAY et al., 2004) e proteger as árvores contra o ataque de pragas e doenças (MONTAGNINI; GONZALES; PORRAS, 1995; DEBELL; COLE; WHITESELL, 1997; MEDHURST et al., 2003). Outros estudos não mostraram diferenças entre povoamentos consorciados e monoespecíficos (PARROTTA, 1999), ou até apontaram efeitos desfavoráveis dos plantios mistos sobre a produtividade (FORRESTER et al., 2006; FIRN; ERSKINE; LAMB, 2007). Estes resultados contrastantes indicam a necessidade de realização de mais pesquisas com diferentes espécies, em diferentes condições edafoclimáticas.

## **2.2 Fósforo no solo**

As árvores podem manter ou aumentar a fertilidade das camadas superficiais do solo por razão da adição de matéria orgânica, da ciclagem de nutrientes, da fixação biológica de nitrogênio, do aumento da atividade biológica e da melhoria das propriedades físicas do solo. As espécies florestais têm sistema radicular bastante desenvolvido e vigoroso, explorando maior volume de solo em profundidade que a maioria das culturas agrícolas, sobretudo as de ciclo curto. Essa particularidade permite que as árvores transfiram grande quantidade de nutrientes absorvidos das camadas inferiores do solo para as superiores, por meio do processo de ciclagem de nutrientes (GONÇALVES et al., 2011).

Os solos brasileiros geralmente têm uma alta capacidade de fixação de P, devido aos altos teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, resultando em baixos teores de P na solução do solo, limitando o rendimento das culturas (NOVAIS; SMYTH; NUNES, 2007). Aliado a isso, recentes previsões indicam aumento do custo de fertilizantes fosfatados, ligados ao aumento da demanda global por P e o declínio das reservas minerais de fosfatos de rocha (CORDELL; DRANGERT; WHITE, 2009; ELSER et al., 2014). A insuficiência de P limita a produtividade das plantas em muitos ecossistemas terrestres (BATJES, 1997) e esse é, muitas vezes, o primeiro ou o segundo nutriente que limita a produtividade primária líquida aérea das

florestas (PLASSARD; DELL, 2010). Tais fatores levantam sérias preocupações sobre a eficiência na utilização desse recurso não renovável.

O P, quando aplicado no solo, pode tornar-se não disponível para as plantas no decorrer de processos geoquímicos e biológicos (OLANDER; VITOUSEK, 2004). A imobilização geoquímica do P inorgânico do solo ocorre devido: à adsorção em óxidos de Fe e Al, muito comum nos solos brasileiros; à difusão em microporos e camadas de argila; e à oclusão ou transformação em estados mais estáveis de adsorção (SIMS; PIERYNSKI, 2005). Bioquimicamente, o P do solo também pode ser imobilizado por incorporação da biomassa microbiana (BOLAN, 1991). No Brasil, essas condições conduzem, frequentemente, à deficiência de P, sendo necessária a adição de altas quantidades de fertilizantes fosfatados para a manutenção da produtividade (GONÇALVES et al., 2008b).

O teor total de P dos solos, de modo geral, pode variar entre 35 a 5.300 mg kg<sup>-1</sup>, com valores médios em torno de 800 mg kg<sup>-1</sup> (ESSINGTON, 2004). O P no solo possui grande habilidade para formar compostos de alta energia de ligação com os coloides, sendo predominante sua presença na fase sólida. Assim, mesmo que os teores totais de P no solo sejam elevados, apenas uma pequena fração do nutriente tem baixa energia de ligação, o que possibilita sua dessorção e disponibilidade às plantas (GATIBONI, 2003).

Os solos podem ser considerados fonte ou dreno do nutriente P. Locais em estágio avançado de intemperismo, como os solos tropicais do cerrado brasileiro, têm como atributos: maior eletropositividade; menor capacidade de troca de cátions; aumento da adsorção aniônica; e diminuição da saturação por bases, entre outros. Nesse cenário, o solo compete com a planta pelo fertilizante adicionado, caracterizando-se como dreno (NOVAIS; SMYTH, 1999). Ao buscar o entendimento da dinâmica das frações de P no solo, deve-se levar em conta, além das transformações químicas do elemento no solo, a atuação constante de organismos, principalmente, as plantas e a biomassa microbiana do solo (GATIBONI et al., 2013). As frações orgânicas e inorgânicas de P no solo podem atuar como fonte ou dreno de P da solução do solo, dependendo das características mineralógicas, das condições ambientais, da fertilização e do manejo do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999).

As formas e o grau de labilidade do P também variam com as características e propriedades do solo. Em solos jovens, os fosfatos de Ca são os principais fornecedores de P aos organismos vivos. Por outro lado, em solos altamente intemperizados, a biociclagem dos fosfatos orgânicos assume grande importância na manutenção da biodisponibilidade, embora não seja suficiente para a obtenção da máxima produtividade econômica das culturas comerciais (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

Nos solos altamente intemperizados, como os Latossolos, predominam as formas inorgânicas ligadas à fração mineral, com alta energia, e as formas orgânicas estabilizadas física e quimicamente. De acordo com o maior ou menor grau de estabilidade desses compostos, são enquadrados como P lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis. A fração lábil é representada pelo conjunto de compostos fosfatados, capazes de repor rapidamente a solução do solo, quando ele é absorvido por plantas ou por microrganismos. Por isso, as frações mais lábeis são dependentes, além do grau de intemperismo do solo, da mineralogia, da textura, do teor de MOS, das características físico-químicas, da atividade biológica e da vegetação predominante (WALKER; SYERS, 1976; CROSS; SCHLESINGER, 1995). Assim, os processos geoquímicos e biológicos transformam os fosfatos naturais em formas orgânicas e inorgânicas estáveis e transferem o P entre os compartimentos do solo (SANTOS; GATIBONI; KAMINSKI, 2008).

A exportação, em cada rotação de cultivo, de grande quantidade de nutrientes pela biomassa, geralmente não é repostada por meio da fertilização (LACLAU et al., 2005; GONÇALVES et al., 2008b). O P orgânico (Po) é originário dos resíduos vegetais adicionados ao solo, do tecido microbiano e dos produtos de sua decomposição (DALAL, 1977; RHEINHEIMER; ANGHINONI; CONTE, 2000; CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2002, 2003; MARTINAZZO et al., 2007). O Po pode constituir entre 5 a 80% do P total do solo e, nos solos tropicais, com baixa adição de insumos é a principal fonte do nutriente às plantas e deve ser levado em consideração em estudos envolvendo a sua dinâmica e a sua biodisponibilidade (CROSS; SCHLESINGER, 1995; RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003). As principais formas de Po são os fosfatos de inositol (10 a 80% do Po total), além dos fosfolipídios (0,5 a 7%), ácidos nucleicos (cerca de 3%) e outros ésteres fosfato (aproximadamente 5%) (DALAL, 1977). A estabilidade desses compostos é dependente de sua natureza e de sua interação com a fração mineral, pois são usados como fonte de carbono (C) e elétrons pelos microrganismos, cujo resultado é a mineralização dos compostos orgânicos e a disponibilização do P para as plantas.

A mineralização lenta e gradual dos resíduos orgânicos proporciona a liberação e a redistribuição das formas orgânicas de P, mais móveis no solo e menos suscetíveis às reações de adsorção. Além disso, elas podem manter um fluxo contínuo de diferentes formas de C, as quais competem com os íons fosfato pelos sítios de carga positiva dos coloides inorgânicos e complexam íons de  $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ , formando compostos hidrossolúveis complexos e estáveis, resultando em aumento da disponibilidade de P para as raízes (RHEINHEIMER; ANGHINONI, 2003).

A distribuição quantitativa do P nativo do solo nas diferentes formas inorgânicas de P (Pi) e Po é muito variável e dependente da intensidade de atuação dos fatores de formação do solo, sendo o grau de intemperismo um dos principais determinantes da quantidade de P em cada forma (GATIBONI et al., 2013). Em trabalho realizado por Walker e Syers (1976), os autores ordenaram a relação entre as frações de P e a pedogênese, a partir dos trabalhos de Williams e Walker (1969a, 1969b) e Smeck (1973). Tais autores concluíram, baseados na exportação de P pelos organismos vivos e pelas perdas do sistema, que o teor de P total no solo vai diminuindo paulatinamente com o avanço do intemperismo, determinando que quanto mais intemperizado for um solo, menor é o seu teor de P total (WALKER; SYERS, 1976) (Figura 1).

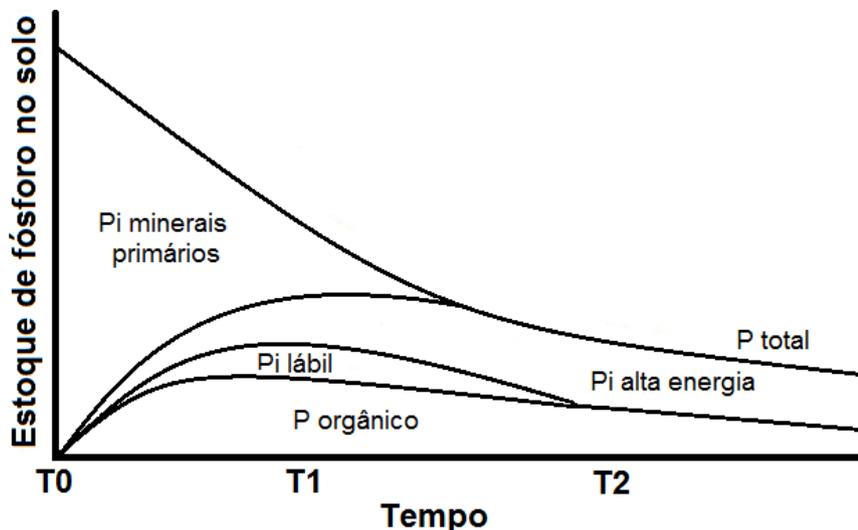


Figura 1 – Modificações nas formas de P no solo com o avanço do intemperismo (GATIBONI et al., 2013, adaptado de WALKER; SYERS, 1976)

O manejo do solo e o tipo de vegetação influenciam as formas de P no solo, principalmente as formas orgânicas, por estarem diretamente relacionadas à atividade biológica no solo (CONTE; ANGHINONI; RHEINHEIMER, 2002). O uso consorciado de espécies fixadoras de  $N_2$  pode contribuir potencialmente para a sustentabilidade da plantação florestal e para o aumento da produção de madeira. Essas espécies podem, ainda, melhorar a dinâmica dos nutrientes no solo, essencialmente pelo aumento dos teores de N no solo, por meio da reciclagem do  $N_2$  atmosférico por fixação biológica (ROTHER; BINKLEY, 2001). Também por aumentar a disponibilidade de P, devido à melhor exploração do solo, ao aumento do teor de MOS e à alta capacidade para mobilizar o Pi insolúvel (GUNES et al., 2007; PRESCOTT, 2010).

A avaliação de diferentes manejos da fertilização fosfatada, ou mesmo de plantios homogêneos ou consorciados sobre a dinâmica e a disponibilidade de P no solo, pode ser realizada por meio da utilização do fracionamento das frações de P. Com o fracionamento, é possível o entendimento mais amplo das transformações do P no solo, por quantificar não apenas o P lábil, mas também as frações de menor labilidade, compreendidas entre o P lábil e o P total no solo (GATIBONI et al., 2013).

A metodologia amplamente utilizada para esses estudos em sistemas agrícolas é a proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982). Sua principal vantagem é a identificação concomitante do Pi e Po, os quais podem ser agrupados segundo a labilidade no solo. Essas frações de P são arbitrárias, em razão da dificuldade de definir e medir o P lábil (NOVAIS; SMYTH, 1999) e, pelos mesmos motivos, o P não lábil e moderadamente lábil. Isto porque, dependendo da taxa de absorção de P pela planta, pode-se considerar uma fração de P como lábil ou não lábil. Assim, a divisão, tanto do Pi quanto do Po em frações lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis, é arbitrária e meramente didática, servindo apenas para informar que há compartimentos de Pi e Po no solo, com maior ou menor capacidade de suprimento à solução do solo. Contudo, é razoável inferir que nos compartimentos de maior labilidade predominem ligações com menor energia entre o P e o adsorvente, como as monodentadas, e que nos de menor labilidade prevaleçam formas de P que envolvam maior energia de ligação e menor reversibilidade, como as ligações bidentadas e binucleadas (GATIBONI et al., 2013).

As técnicas de fracionamento de P no solo, como qualquer procedimento analítico que use soluções extratoras, estão sujeitas a erros, além de limitações inerentes à “supermanipulação” de uma única amostra de solo, por causa da extração sequencial (GATIBONI et al., 2013). Da mesma forma, o P no solo também pode ser classificado em dois grandes grupos, sendo eles Pi e Po, dependendo da natureza do composto a que está ligado. Entretanto, a identificação das frações de P dentro desses dois grupos se torna complicada, devido à infinidade de reações que o elemento pode sofrer e seus compostos resultantes (GATIBONI, 2003).

Em revisão realizada por Gatiboni et al. (2013), os autores relatam que uma limitação do fracionamento de P pelo método de Hedley é a própria falta de padronização do método. Como se trata de um nutriente de dinâmica complexa no solo e variável com as condições de solo, clima, manejo, etc., os esquemas de fracionamento foram extensivamente modificados por diversos autores, para se adaptarem às situações de estudo propostas. Assim, é muito difícil comparar quantitativamente as frações de P obtidas em diferentes trabalhos científicos,

devendo-se ter cautela nessas comparações, pois as alterações de protocolos acarretam modificações dos teores extraídos e, provavelmente, também das frações de P extraídas. Contudo, como todos os fracionamentos e suas variantes usam como princípio a extração sequencial com extratores cada vez mais fortes, é possível comparar, relativamente, em diferentes trabalhos, a dinâmica das frações mais lábeis e mais recalcitrantes (Tabela 1).

O P extraível no solo é usado para estimar a necessidade de sua suplementação via fertilização e representa um índice de disponibilidade de P para as plantas cultivadas (CUNHA et al., 2007). Todavia, esse índice ignora frações de Pi e Po menos disponíveis (BECK; SANCHES, 1994). Nas florestas, em particular, a disponibilidade de P no solo não reflete o acúmulo deste elemento na biomassa, tampouco a quantidade de P ciclado anualmente (NOVAIS; SMYTH, 1999). Atribui-se, portanto, a absorção de P pelas plantas às frações menos lábeis de Pi e Po contidas em solos mais intemperizados. Essas frações, normalmente, não são detectadas por procedimentos comuns de determinação de P disponível, como a resina ou Mehlich-1 (TIESSSEN, STEWART; COLE, 1984).

Atualmente, há boa disponibilidade de curvas de calibração para espécies com diferentes exigências nutricionais, o que facilita a interpretação dos resultados das análises de solo. No Estado de São Paulo o método utilizado para determinação do P disponível é a resina trocadora de íons e no Estado de Minas Gerais o extrator Mehlich-1. Na camada de 0 – 20 cm do solo, Gonçalves et al. 2011, definem para a cultura do eucalipto, como sendo muito baixo, baixo, médio e alto os teores de P-resina, nas faixas entre 0 a 2, 3 a 4, 5 a 7 e  $\geq 8$  mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. No manual Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais (RIBEIRO et al., 1999), os níveis críticos de P na camada de – 20 cm, para a manutenção no campo dos plantios de eucalipto foram definidos de acordo com o incremento médio anual (m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>). Para os incrementos de 20, 30, 40 e 50 m<sup>3</sup> ha ano<sup>-1</sup>, os níveis críticos de P (Mehlich-1) são de 4,3; 4,3; 4,4 e 4,5 para solos argilosos e 6,2; 6,3; 6,4 e 6,5 para solos arenosos, respectivamente.

As técnicas de fracionamento visam à identificação das frações preferenciais com que o P é retido no solo, sua ocorrência e a magnitude com que contribuem para a capacidade de suprimento às plantas. Assim, estudar as frações desse nutriente é de suma importância, levando em consideração a variação existente entre diferentes tipos de solos e sistemas de cultivo, sobretudo, no manejo das práticas de correção e fertilização empregadas, o que altera o comportamento e a dinâmica das frações do P nos solos (RODRIGUES, 2013; GATIBONI et al., 2013).

As plantas têm capacidades diferenciadas quanto ao aproveitamento dos nutrientes no solo, as quais se manifestam, principalmente, por alterações na rizosfera. Dentre essas, pode-se citar a liberação de exudatos orgânicos, a alteração do pH e a associação com microrganismos, como bactérias diazotróficas e micorrizas.

Os principais fatores que influenciam a taxa de mineralização do resíduo vegetal são a quantidade e a qualidade do substrato (PAUL; CLARK, 1996). A liberação do Po para a solução do solo é controlada pela taxa de mineralização da MOS e depende da atividade microbiana (BARBER, 1984). A velocidade de liberação de nutrientes oriundos da decomposição dos resíduos culturais depende da localização e da forma na qual esses nutrientes se encontram no tecido vegetal. Para o P, pelo fato de ele ser um constituinte da estrutura do tecido vegetal, a sua liberação tem uma íntima relação com a mineralização dos resíduos vegetais (GIACOMINI et al., 2003).

Tabela 1 – Frações de P no solo, em diferentes locais, tipos de solo e vegetação

Local	Solo	Vegetação	Pi-L		Po-L	Pi-ML		Po-ML	Pi-ÑL	Po-ÑL	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	Met	Ref
			Pi <sub>RTA</sub>	Pi <sub>BIC</sub>	Po <sub>BIC</sub>	Pi <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HCl</sub>	Po <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HID-0,5</sub>	Po <sub>HID-0,5</sub>				
mg kg <sup>-1</sup>														
<b>0 – 10 cm</b>														
São Desidério, BA	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico	Cerrado	7,2	0,0	0,0	9,6	4,4	29,6	8,5	30,9	45	135	1	A
<b>0 – 5 cm</b>														
Costa Rica, MS	Latossolo Vermelho	Cerrado	6,2	20,0	44,7	118,3	1,0	27,0	83,2	12,1	220	533	1	B
Sapezal, MT	Latossolo Vermelho		10,2	31,0	43,1	90,8	1,5	91,2	172,0	12,6	250	702		
Luziânia, GO	Latossolo Vermelho-Amarelo		2,4	15,9	6,9	55,3	2,0	31,1	50,3	50,5	185	399		
Tasso Fragoso, MA	Latossolo Vermelho-Amarelo		8,0	20,3	5,6	46,3	0,7	6,6	28,2	9,4	201	326		
<b>5 – 10 cm</b>														
Costa Rica, MS	Latossolo Vermelho	Cerrado	4,2	16,8	19,4	104,0	0,8	3,3	68,8	6,0	227	450	1	B
Sapezal, MT	Latossolo Vermelho		7,6	27,7	19,1	106,9	0,7	19,2	122,6	11,3	248	563		
Luziânia, GO	Latossolo Vermelho-Amarelo		2,0	12,1	4,8	41,8	1,7	27,7	74,5	17,9	176	359		
Tasso Fragoso, MA	Latossolo Vermelho-Amarelo		7,2	17,2	4,3	37,2	0,4	2,8	25,2	10,3	181	286		
<b>Rizosfera</b>														
16 locais	16 tipos de solos	Floresta tropical	0 a 76,9	0 a 93,1	0 a 57,5	0 a 89,3	0 a 306,6	0 a 17,3			0 a 61	39 a 1129	2	C
Indonésia	Latossolo		0	83,2	0	89,3	1,8	0			40	351		
			3 a 229	1 a 697	0 a 526	10 a 1354	0 a 1560	3 a 570			19 a 3786	116 a 4986	2	D

Pi-L: P inorgânico lábil; Po-L: P orgânico lábil; Pi-ML: P inorgânico moderadamente lábil; Po-ML: P orgânico moderadamente lábil; Pi-ÑL: P inorgânico não lábil; Po-ÑL: P orgânico não lábil; Pi<sub>RTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; Pi<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>BIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total. 1= Hedley, Stewart e Chauhan (1982), modificado por Condron e Goh (1989); e, 2= Hedley, Stewart e Chauhan (1982). A = Souza Filho (2014); B = Rodrigues (2013); C = Levy e Schlesinger (1999); e, D = Negassa e Leinweber (2009)

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização e caracterização das áreas de estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas experimentais, localizadas nos municípios de Itatinga, Bofete e Luiz Antônio, no estado de São Paulo, e em Santana do Paraíso, no estado de Minas Gerais (Figura 2). Estas áreas são pertencentes ao Departamento de Ciências Florestais da ESALQ/USP e às empresas de reflorestamento da região Sudeste do país e estão inseridas em condições edafoclimáticas representativas de extensas áreas plantadas com *Eucalyptus* spp. no Brasil (Tabela 2).

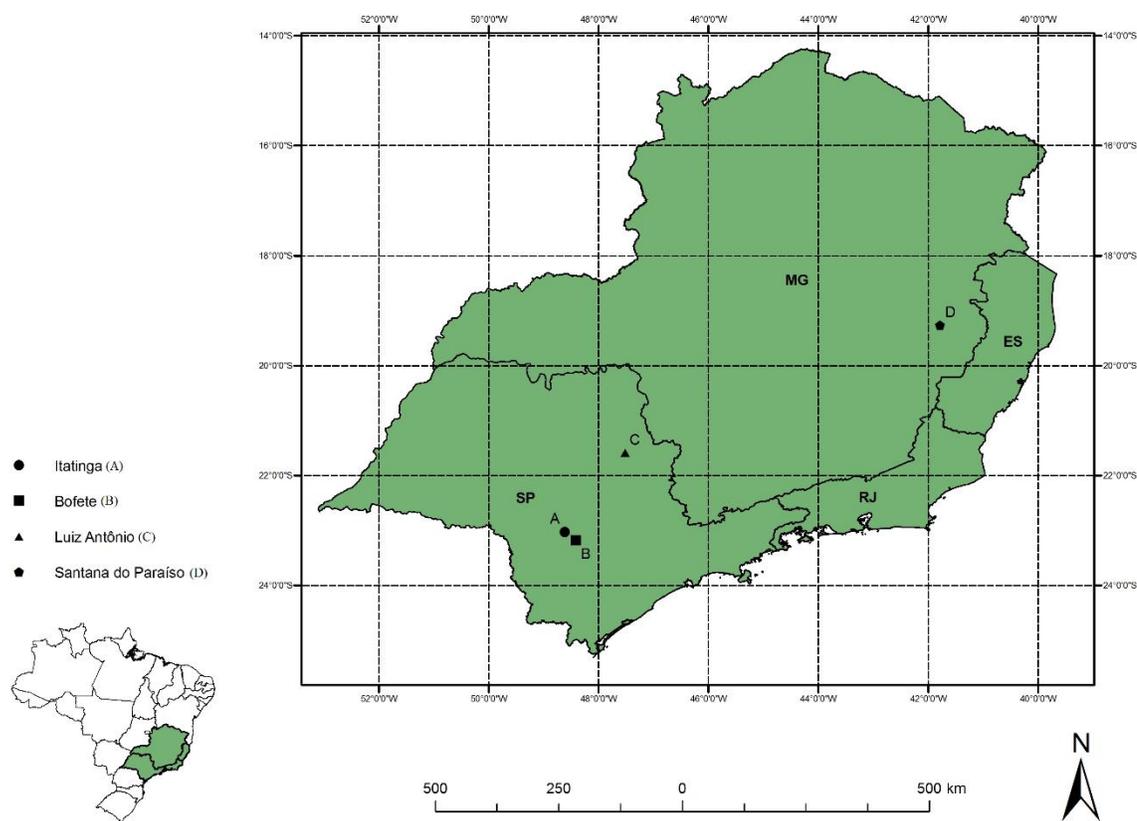


Figura 2 - Localização geográfica das quatro áreas experimentais do estudo

As áreas experimentais de Itatinga (A) e Bofete (B) estão, aproximadamente, 20 km distantes entre si. A área A está situada na Estação Experimental de Ciências Florestais de Itatinga, SP, da Universidade de São Paulo, na região centro-sul do estado de São Paulo, sendo o experimento instalado em área plana, com declividade inferior a 3 %. A área em Bofete (B) é de propriedade da empresa Suzano Papel e Celulose S/A, área no município de Luiz Antônio (C), pertence à International Paper do Brasil Ltda., e a área de Santana do Paraíso (D), à Cenibra (Celulose Nipo-Brasileira S/A).

Tabela 2 – Localização, altitude, relevo e características climáticas (série histórica) das diferentes áreas experimentais do estudo

Área	Latitude Longitude	Altitude (m)	Relevo	Precipitação anual (mm)	Temperatura média do ar (°C)	Umidade relativa média do ar (%)	Clima <sup>A</sup>
Itatinga, SP (A)	23° 02' S 48° 37' O	830	Suave ondulado	1.319	19,4	70	Cfa
Bofete, SP (B)	23° 11' S 48° 25' O	570	Suave ondulado	1.293	19,9	71	Cfa
Luiz Antônio, SP (C)	21° 35' S 47° 31' O	620	Suave ondulado	1.463	20,7	65	Cwa
Santana do Paraíso, MG (D)	19° 16' S 41° 47' O	290	Ondulado	1.394	22,0	71	Aw

<sup>A</sup>Classificação de Köppen de acordo com Alvares et al. (2013)

As áreas onde os experimentos foram instalados são reflorestadas, desde 22 a 62 anos atrás, com *Eucalyptus* spp. (Tabela 3). Em todas as áreas, utilizou-se o delineamento em blocos ao acaso, com três tratamentos e quatro blocos (Tabela 4). Os tratamentos puros Acácia e Eucalipto e o tratamento Misto, apresentavam a mesma densidade arbórea, sendo constituídos por plantios com e sem leguminosa (Figura 3).

As mudas de *Acacia mangium* foram inoculadas com bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> BR 3609T e BR 6009, especificamente selecionadas para essa espécie pela EMBRAPA Agrobiologia (Rio de Janeiro). Em todas as áreas experimentais, utilizou-se o sistema de cultivo mínimo do solo, visando à redução dos custos na implantação da floresta e à melhoria das condições ambientais dessas áreas, com a eliminação do uso do fogo e o preparo do solo com o mínimo de mobilização.

Tabela 3 – Principais características experimentais

Área	Genótipo	Espaçamento (m x m)	Densidade (Árvores ha <sup>-1</sup> )	Plantio (Mês/Ano)	Tamanho total da parcela (Árvores)	Tamanho da Parcela útil (Árvores)	Blocos	Histórico de uso do solo <sup>B</sup>	Fertilização convencional <sup>C</sup> em todos os tratamentos (kg ha <sup>-1</sup> )	Tipo de Solo <sup>D</sup>
Itatinga, SP	<i>E. grandis</i>	3 x 3	1.111	05/2003 11/2009 <sup>A</sup>	10 x 10	6 x 6	4	< 1940: cerrado 1940-1988: <i>E. saligna</i> (talhadia) 1988-2002: <i>E. grandis</i>	P: 44; K:85 Calcário: 2000 B, Fe, Zn, Mn	Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico, textura média
Bofete, SP	<i>E. grandis</i>	3 x 2	1.666	02/2005	8 x 10	4 x 6	4	< 1972: pasto 1972-2004: <i>Eucalyptus</i> <i>sp.</i>	P: 37; K: 186 Cinzas de caldeira de biomassa: 3000 B, S	Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico, textura média
Luiz Antônio, SP	<i>E.</i> <i>urophylla</i> <i>x E.</i> <i>grandis</i>	3 x 3	1.111	02/2005	10 x 10	6 x 6	4	< 1982: cerrado 1982-2004: <i>E. grandis</i>	N: 4 <sup>E</sup> ; P: 29; K: 147 Calcário: 1200 Cu, Zn, B	Neossolo Quartzarênico
Santana do Paraíso, MG	<i>E.</i> <i>urophylla</i> <i>x E.</i> <i>grandis</i>	3 x 3	1.111	11/2004	10 x 10	6 x 6	4	< 1960: cerrado 1960-2004: <i>Eucalyptus</i> <i>sp.</i>	N: 6; P: 45; K: 162 Dolomita: 1500 Cu, B, Zn	Latossolo Amarelo distrófico típico, textura muito argilosa

<sup>A</sup> A primeira rotação do experimento foi de maio de 2003 até setembro de 2009, sendo reinstalado o experimento em novembro de 2009, com as mesmas características e na mesma área do plantio anterior. <sup>B</sup> Em todas as áreas, as brotações das rotações anteriores foram suprimidas com a aplicação de glifosato. Na colheita, foram retirados somente os troncos (lenho + casca), os demais resíduos, espalhados uniformemente na área. <sup>C</sup> Fertilização convencional, realizada rotineiramente pelas empresas reflorestadoras de eucalipto, nas respectivas áreas de instalação do experimento, sendo que o eucalipto e a acácia tiveram a mesma adubação; <sup>D</sup> Classificação realizada por BOUILLET et al., 2013, de acordo com EMBRAPA (2013). <sup>E</sup> N incluído no fertilizante NPK, aplicado nas plantações comerciais. A fertilização foi parcelada entre a fertilização de plantio e a fertilização de cobertura, após 1,5 ano do plantio, sendo o P aplicado em covetas laterais às mudas

Tabela 4 - Tratamentos utilizados no experimento

Tratamento	Descrição
Acácia	Plantio homogêneo de <i>Acacia mangium</i> , fertilização convencional sem N
Eucalipto	Plantio homogêneo de <i>Eucalyptus</i> , fertilização convencional sem N
Misto	Plantio de <i>Eucalyptus</i> , consorciado com <i>Acacia mangium</i> , na densidade de plantio de 50 % para cada espécie, fertilização convencional sem N

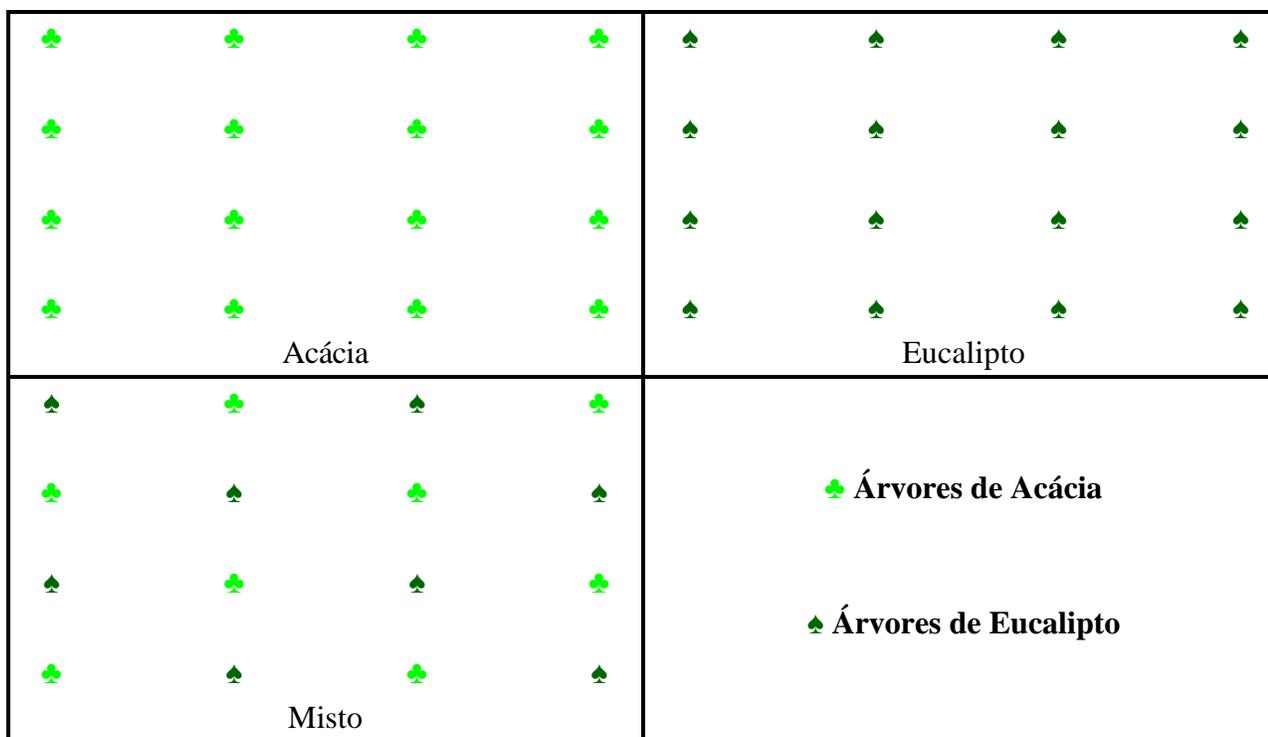


Figura 3 - Esquema de distribuição das árvores nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto

### 3.2 Coleta e preparo das amostras de solo

As coletas de solo foram realizadas com o auxílio de um trado tipo sonda de 40 cm de comprimento, sendo escolhidos cinco locais nas linhas e cinco locais nas entrelinhas do plantio, totalizando 10 locais por parcela útil (Figura 4). Em cada um desses 10 locais foram coletadas oito amostras de 0-5 e de 5-10 cm (Ponto 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8), totalizando 80 amostras simples por parcela útil, para as profundidades de 0-5 e de 5-10 cm (Figura 5). A partir das 80 amostras simples por parcela, gerou-se uma amostra composta em cada uma das profundidades. O grande número de amostras simples coletado por parcela útil foi devido ao pequeno volume de solo retirado em cada coleta com o trado. Optou-se, como instrumento de coleta, pela sonda, que tem

vantagens em relação a outros instrumentos comumente utilizados, como evitar a perda de solo superficial e o revolvimento do solo nas camadas sub-superficiais, resultando em maior exatidão na amostragem.

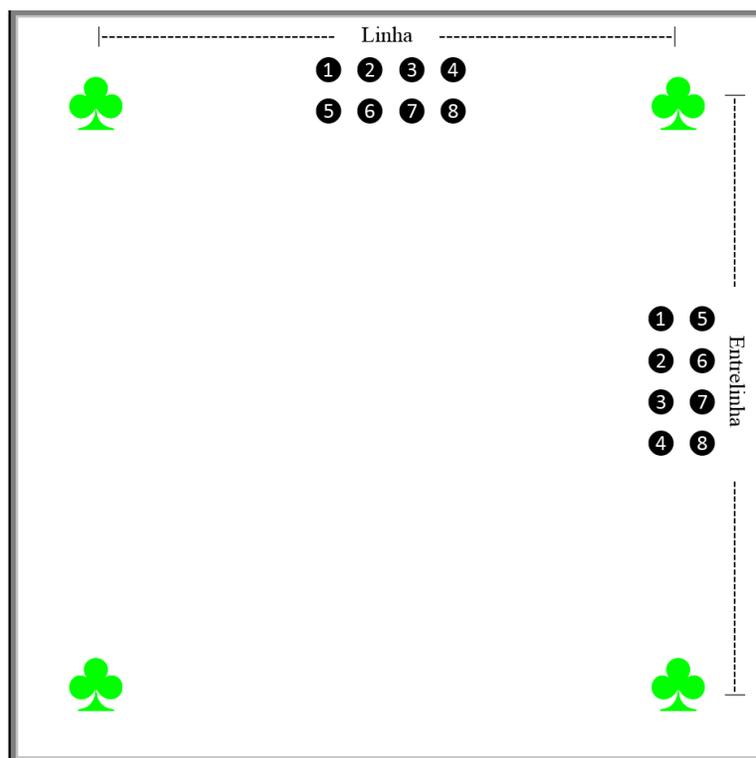


Figura 4 - Esquema dos locais de coleta de solo

As coletas em Bofete, SP, foram realizadas no mês de setembro de 2012, quando o povoamento estava com a idade de sete anos e sete meses. Em Luiz Antônio e Itatinga, SP, as coletas foram realizadas em novembro de 2012, estando os povoamentos com sete anos e nove meses e com três anos (referentes à segunda rotação de cultivo), respectivamente. Por último, realizou-se a coleta de solo em Santana do Paraíso, MG, em janeiro de 2013, seis meses após a colheita do povoamento, que foi realizada quando o mesmo estava com sete anos e oito meses.



Figura 5 - (a) Locais de coletas na entrelinha de plantio e (b) Buracos após a coleta de solo

Em campo, o solo foi colocado, separadamente, em sacos plásticos devidamente identificados. Após a coleta, as amostras foram encaminhadas imediatamente para o laboratório, colocadas em estufa de circulação e renovação de ar a 45 °C, até alcançar peso constante. Posteriormente, as amostras foram destorroadas e passadas em peneira de 2 mm de malha. Depois, elas foram armazenadas em sacos plásticos, até a realização das análises químicas e físicas.

### 3.3 Análises químicas dos solos

As análises químicas dos solos foram realizadas conforme metodologia descrita por Silva (2009), sendo avaliados os seguintes atributos: pH em  $\text{CaCl}_2$  – Relação 1:2,5; P – K – Fe – Zn – Mn – Cu, Extrator Melhich-1; Ca – Mg – Al, Extrator KCl –  $1\text{ mol L}^{-1}$ ; B - Extrator água quente; SB – Soma de bases trocáveis;  $\text{CTC}_e$  – Capacidade de troca catiônica efetiva. O P remanescente (P-rem) foi determinado na solução de equilíbrio, após agitação de uma amostra de 5,0 g de terra fina seca ao ar, pelo período de 1 h, com solução de 50 mL de  $\text{CaCl}_2$   $0,01\text{ mol L}^{-1}$ , que continha  $60\text{ mg L}^{-1}$  de P, na proporção 1:10 (ALVAREZ V. et al. 2000).

Para a determinação dos teores totais de C (Ct) e N (Nt), as amostras de solo foram moídas em cadinhos de porcelana e passadas em peneiras de 60 mesh. Os teores foram determinados por combustão a seco, no analisador elementar LECO TruSpec® CHNS Micro. Com os valores dos teores de Ct e Nt, foi calculada a relação C/N.

### 3.4 Fracionamento de P no solo

O principal enfoque do presente estudo foi avaliar o efeito dos plantios mistos na labilidade das frações de P e as frações inorgânicas e orgânicas de P no solo. Para tanto, realizou-se o fracionamento do P em todas as amostras de solo, de todas as unidades experimentais, seguindo metodologia proposta por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condrón, Goh e Newman (1985) e Gatiboni (2003), que é amplamente difundida em estudos da dinâmica de P em sistemas agrícolas e florestais. Optou-se por esse procedimento, por ser um dos protocolos mais usados em trabalhos científicos sobre o assunto e, também, pela presença da resina trocadora de ânions, como o primeiro extrator, método amplamente aceito como indicador do P disponível para as plantas no estado de São Paulo (GATIBONI et al., 2013).

O método de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com modificações de Condrón, Goh e Newman (1985) e Gatiboni (2003) determina as seguintes frações de P, extraídas sequencialmente:  $P_i$  extraído com resina trocadora aniônica ( $P_{iRTA}$ );  $P_i$  e  $P_o$  extraídos com  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iBIC}$  e  $P_{oBIC}$ );  $P_i$  e  $P_o$  extraídos com  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iHID-0,1}$  e  $P_{oHID-0,1}$ );  $P_i$  extraído com  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iHCl}$ );  $P_i$  e  $P_o$  extraídos com  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$  ( $P_{iHID-0,5}$  e  $P_{oHID-0,5}$ ); além do P residual ( $P_{Residual}$ ), obtido após digestão do solo ao final de todas as extrações. Esse esquema de fracionamento, com as modificações supracitadas, pode ser observado na Figura 6.

Resumidamente, a sequência do fracionamento é assim descrita: amostras de 0,5 g de solo foram submetidas a diferentes extratores em ordem sequencial (relação solo: solução de 1:20), sendo eles:

**Extrato A)** resina de troca aniônica - RTA (lâmina de RTA de dimensões de  $1,0 \times 2,5 \text{ cm}$  imersa em 10 mL de  $\text{H}_2\text{O}$ , em contato direto com o solo), extraído  $P_{iRTA}$  (inorgânico);

**Extrato B)** 10 mL de  $\text{NaHCO}_3$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , extraído  $P_{BIC}$  (inorgânico e orgânico);

**Extrato C)** 10 mL de  $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ , extraído  $P_{HID-0,1}$  (inorgânico e orgânico);

**Extrato D)** 10 mL de  $\text{HCl}$   $1,0 \text{ mol L}^{-1}$ , extraído  $P_{iHCl}$  (inorgânico);

**Extrato E)** 10 mL de  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , extraído  $P_{HID-0,5}$  (inorgânico e orgânico).

Dos extratos B, C e E, retirou-se uma alíquota para análise do Pt, visando estimar o Po de cada fração, sendo este obtido por diferença entre o Pt e o Pi de cada extrato. O solo residual foi submetido à digestão com  $\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ , para obtenção do P residual ( $P_{RESIDUAL}$ ). O P dos

extratos A e D, além das digestões totais de B, C e E foi quantificado conforme metodologia proposta por Murphy e Riley (1962). Para os extratos alcalinos (B, C e E), a determinação do P inorgânico foi feita segundo Dick e Tabatabai (1977).

As frações de P do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982) por si só não correspondem às formas de P no solo. Entretanto, a partir do trabalho de Cross e Schlesinger (1995), as formas de P no solo puderam ser explicadas pelo fracionamento de Hedley. Assume-se, a partir de então, que, de maneira geral, a RTA extrai formas lábeis de  $P_i$ , assim como o  $\text{NaHCO}_3$ , o qual extrai formas inorgânicas e orgânicas de P lábil, mas que não foram acessadas pela resina. O P moderadamente lábil compreende o P extraído na etapa do  $\text{NaOH}$  ( $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e ao P extraído com  $\text{HCl}$ . O  $\text{NaOH}$  extrai o P quimiosorvido a óxidos de Fe e Al, além do P orgânico de labilidade moderada, enquanto o  $\text{HCl}$  remove o P ligado a fosfatos de Ca (fortemente adsorvido, porém considerado, na maioria das situações, como moderadamente lábil). Por sua vez, as frações não lábeis de P são compostas pela fração extraída com  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , acrescida do  $P_{\text{Residual}}$ . Essa segunda extração com  $\text{NaOH}$  remove  $P_i$  e  $P_o$ , que estariam química ou fisicamente protegidos internamente aos agregados, enquanto que a digestão residual extrai o P recalcitrante ( $P_i$  e  $P_o$ ) remanescente no solo (RODRIGUES, 2013; GATIBONI et al., 2013).

As frações de P quantificadas foram ainda agrupadas segundo a labilidade do P predita pelos extratores. O P lábil foi composto pelo  $P_{\text{RTA}}$ , somado ao  $P_{\text{BIC}}$  (inorgânico e orgânico); o P moderadamente lábil constituiu-se nos teores de  $P_{\text{HID-0,1}}$  ( $P_i$  e  $P_o$ ), somados ao  $P_{\text{HCl}}$  e ao P não lábil, composto pela soma do  $P_{\text{HID-0,5}}$  ( $P_i$  e  $P_o$ ) e do  $P_{\text{Residual}}$  ( $P_i$  e  $P_o$ ). Destaca-se que a opção por agrupamento do  $P_{\text{HID-0,5}}$  na fração não lábil se deve à mudança na ordem de extração do procedimento, sendo observado que a extração com  $\text{HCl}$ , intercalando as extrações com  $\text{NaOH}$  potencializa a segunda extração com o hidróxido, restando menos  $P_{\text{Residual}}$  ao solo (P não lábil). Ainda, sabendo que a extração com  $\text{NaOH}$   $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ , responsável por substituir a ultrassonificação do solo, também remove o P protegido por intra-agregados do solo, proporção de P que apenas seria considerada de labilidade moderada em casos de exaurimento de formas mais lábeis de P, presume-se que o  $P_{\text{HID-0,5}}$  seria de labilidade moderada, o que acarretaria possíveis equívocos na interpretação da dinâmica do P no solo (RODRIGUES, 2013).

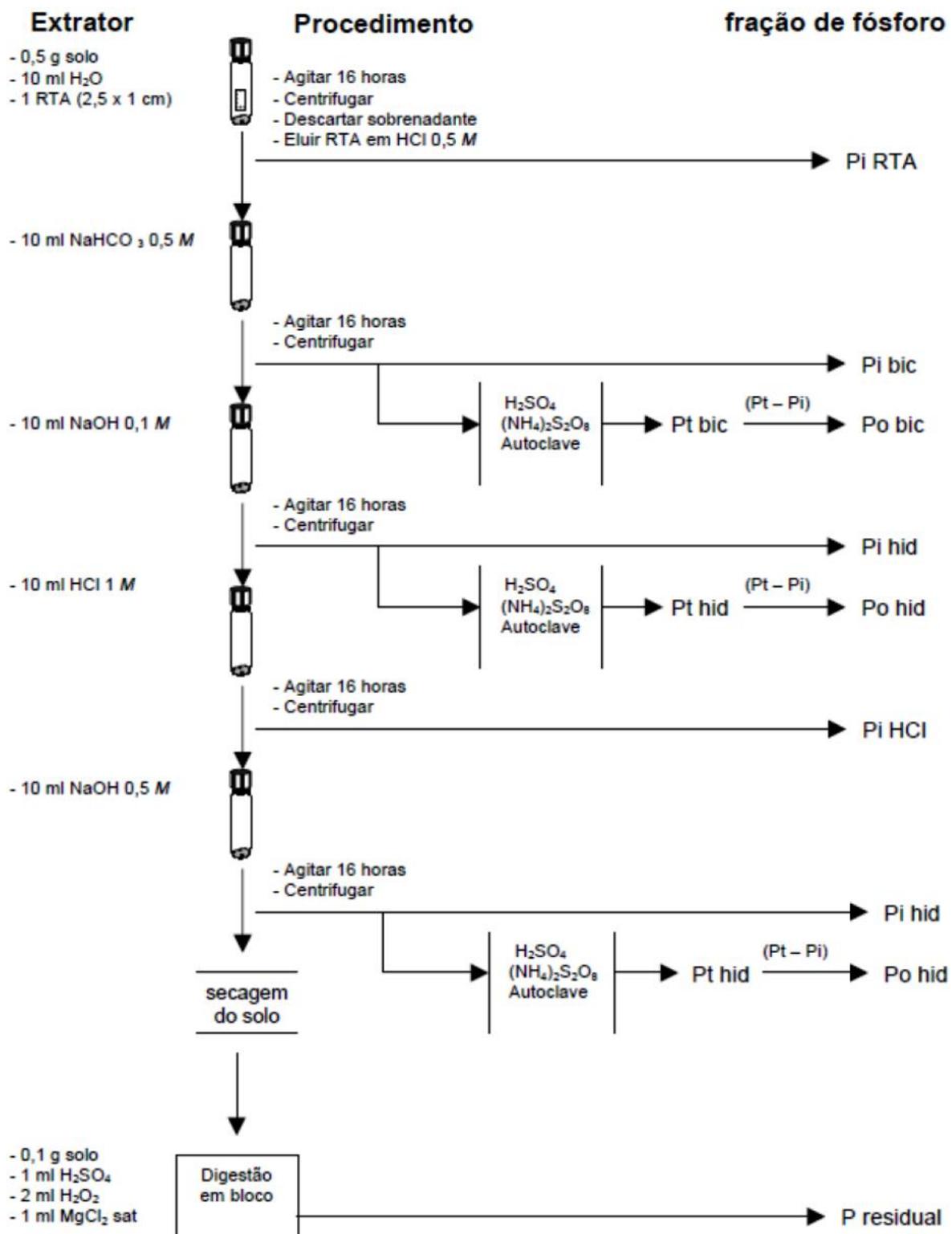


Figura 6 – Esquema da técnica do fracionamento de P proposto por Hedley, Stewart e Chauhan (1982), com as modificações de Condon, Goh e Newman (1985) e Gatiboni (2003)

A labilidade do P, independentemente de sua natureza química, significa que o P é agrupado de acordo com a facilidade com que repõe a solução do solo. A divisão em formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis tem embasamento científico. O conceito de labilidade está associado a uma escala de tempo, pois segundo Guo e Yost (1998), em longo prazo não há P não lábil. As formas lábeis, moderadamente lábeis e não lábeis podem ser entendidas como as formas extraídas pelo fracionamento, numa sequência de forças de extração proporcional ao potencial de retenção de P no solo, partindo de frações mais solúveis e, portanto, teoricamente mais biodisponíveis, para as formas mais recalcitrantes, consideradas indisponíveis por um período (RODRIGUES, 2013). As reações de transformação de P lábil em formas moderadamente e não lábil ocorrem em duas fases distintas, sendo a primeira fase de rápida adsorção, caracterizada por uma atração eletrostática, seguida de uma fase mais lenta, que se processa por longos períodos de tempo, em que há troca de ligantes e difusão do P para o interior dos óxidos (NOVAIS; SMYTH, 1999; ARAI; SPARKS, 2007).

### 3.5 Ataque sulfúrico no solo

Realizou-se também o ataque sulfúrico nas amostras de solo, conforme metodologia da EMBRAPA (1997), pois a solubilização de amostras de solo com o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 1:1 visa à determinação de relações moleculares (K<sub>i</sub> e K<sub>r</sub>), permitindo a avaliação do estágio de intemperização do solo. O extrato sulfúrico produzido por essa força iônica pressupõe que somente minerais secundários (argilominerais) são dissolvidos, e assim os percentuais de ferro (Fe), alumínio (Al), silício (Si), manganês (Mn) e titânio (Ti) são próximos aos da fração coloidal do solo.

O K<sub>i</sub> é calculado em função dos valores expressos em % de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, divididos pelos seus respectivos pesos moleculares (eq. 1).

$$K_i = \frac{\% \text{ de SiO}_2 \times 1,7}{\% \text{ de Al}_2\text{O}_3} \quad (1)$$

O Kr é calculado em função dos valores expressos em % de SiO<sub>2</sub> e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, divididos pelos seus respectivos pesos moleculares (eq. 2).

(2)

$$Kr = \frac{\frac{\% \text{ de SiO}_2}{0,60}}{\left(\frac{\% \text{ de Al}_2\text{O}_3}{1,02}\right) + \left(\frac{\% \text{ de Fe}_2\text{O}_3}{1,60}\right)}$$

Para a determinação do SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, MnO e das relações moleculares Ki e Kr, em cada área do estudo, as amostras dos blocos 1 e 2 nas profundidades de 0 - 5 cm e de 5 - 10 foram unidas, formando uma amostra composta, assim como as dos blocos 3 e 4 (Tabela 5).

Tabela 5 – Teores de óxidos de Si, Al, Fe, Ti e Mn e relações moleculares Ki e Kr nos solos, nas diferentes áreas experimentais

Área	Bloco	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO	Ki	Kr
		%						
Itatinga, SP	1 + 2	9,00	3,83	5,03	0,74	0,0074	4,00	2,17
	3 + 4	5,70	4,80	2,46	0,66	0,0077	2,02	1,52
Bofete, SP	1 + 2	7,50	3,47	1,36	0,64	0,0052	3,67	2,94
	3 + 4	7,70	2,81	2,49	0,55	0,0052	4,66	2,97
Luiz Antônio, SP	1 + 2	6,70	3,42	1,40	0,32	0,0052	3,33	2,64
	3 + 4	6,10	3,52	1,40	0,27	0,0052	2,95	2,35
Santana do Paraíso, MG	1 + 2	19,60	17,81	14,33	1,31	0,0052	1,87	1,23
	3 + 4	20,90	19,60	14,83	1,27	0,0052	1,81	1,22

Si – extração com solução de NaOH<sub>2</sub>O e determinação gravimétrica; Al – complexometria pelo EDTA; Ti – Oxidação da matéria orgânica e determinação por colorimetria; Fe e Mn extração por ataque sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> a 50%)

### 3.6 Análise granulométrica do solo

Para a determinação granulométrica dos solos, utilizou-se o método do densímetro (EMBRAPA, 1997). O princípio do método baseia-se na sedimentação das partículas que compõem o solo. Após a adição de um dispersante químico, fixou-se um tempo único para a determinação da densidade da suspensão que se admite ser a concentração total de argila. As frações grosseiras (areia fina e grossa) foram separadas por tamisação e pesadas. O silte foi obtido pela diferença entre os teores de argila e areia (Tabela 6).

Tabela 6 – Análise granulométrica de duas camadas do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais

Área	Tratamento	Areia Grossa	Areia Fina g kg <sup>-1</sup>	Silte	Argila	
Itatinga, SP			<b>0 – 5 cm</b>			
	Acácia	410,1 <sup>A</sup>	437,1	19,2	133,7	
	Eucalipto	447,6	407,9	23,3	121,2	
	Misto	433,0	411,0	44,1	111,9	
				<b>5 – 10 cm</b>		
	Acácia	454,0	395,5	11,8	138,7	
Bofete, SP	Eucalipto	380,1	469,7	12,3	138,0	
	Misto	449,6	391,7	7,1	151,6	
				<b>0 – 5 cm</b>		
	Acácia	322,0	543,5	32,3	102,3	
	Eucalipto	324,5	538,8	32,0	104,8	
	Misto	313,5	561,7	21,1	103,7	
Luiz Antônio, SP			<b>5 – 10 cm</b>			
	Acácia	293,9	566,6	13,3	126,2	
	Eucalipto	311,1	559,8	25,5	103,7	
	Misto	298,4	566,8	32,3	102,6	
				<b>0 – 5 cm</b>		
	Acácia	304,0	579,8	26,8	89,4	
Santana do Paraíso, MG	Eucalipto	327,7	545,6	33,0	93,7	
	Misto	348,9	553,5	8,2	89,4	
				<b>5 – 10 cm</b>		
	Acácia	256,4	486,5	159,2	98,0	
	Eucalipto	245,5	470,2	193,8	90,5	
	Misto	301,9	606,0	19,2	73,0	
Santana do Paraíso, MG			<b>0 – 5 cm</b>			
	Acácia	164,2	177,2	108,1	550,5	
	Eucalipto	159,7	169,9	142,5	528,0	
	Misto	177,0	178,0	137,8	507,3	
				<b>5 – 10 cm</b>		
	Acácia	149,7	166,0	133,1	551,3	
Santana do Paraíso, MG	Eucalipto	146,9	175,7	86,1	591,3	
	Misto	155,0	172,1	94,1	578,8	

<sup>A</sup> Média de quatro repetições (blocos)

### 3.7 Produtividade florestal

Os dados de produtividade foram avaliados em todos os tratamentos e todas as áreas experimentais do presente estudo, em que o crescimento das árvores foi monitorado até o final da rotação de cultivo. A altura e a circunferência à altura do peito à 1,30 m (CAP) foram medidas excluindo-se duas linhas da bordadura em cada parcela, e, em várias idades até a idade de colheita (cerca de seis anos de idade). A altura foi medida por meio de vara telescópica e posteriormente com aparelho Vertex, a CAP foi determinada com fita métrica. A maioria das árvores de acácia tinha vários caules e a circunferência de todos os caules com um diâmetro à altura do peito maior do que 2 cm foram medidas. Para as árvores com vários caules, as áreas basais à altura do peito

foram somadas e calculou-se uma circunferência equivalente, que depois foram transformada para diâmetro.

A biomassa acima do solo foi estimada por amostragem de 10 árvores de cada espécie, distribuídas em todas as classes diamétricas (BOUILLET et al., 2013). As árvores foram separadas nos componentes: folhas, galhos vivos, galhos mortos, lenho e casca. O tronco de cada árvore foi cortado em seções de três metros. Os comprimentos, as massas e os diâmetros foram mensurados no campo e medida a CAP, com e sem casca, a cada metro. As folhas foram coletadas em três diferentes estratos da copa das árvores (inferior, médio e superior). Secaram-se, a 65 °C, subamostras de cada compartimento, até a massa constante, para determinar a umidade e estimar a massa seca.

### **3.8 Análises estatísticas**

O estudo dos atributos e das frações de P no solo foi analisado segundo o delineamento em blocos ao acaso, com três tratamentos e quatro blocos, totalizando 12 parcelas, em cada profundidade, por área de estudo (Figura 2). Os tratamentos consistiram nos plantios puros Acácia e Eucalipto ou Misto; e as profundidades de 0 – 5 e 5 – 10 cm do solo. Os dados foram submetidos ao teste de normalidade (Shapiro-Wilk) e homocedasticidade (Box-Cox). Atendidas essas suposições, procedeu-se à análise das variâncias por meio do teste F. Quando significativo, efetuou-se o teste LSD para estimativa da diferença mínima significativa e comparação das médias.

No presente trabalho, não foram considerados os locais de estudo como fator, tendo em vista que os locais possuem condições edafoclimáticas distintas, o que poderia causar equívoco na interpretação dos resultados, pois não satisfaz, como pressuposto da experimentação, a casualização. Assim, os resultados são interpretados para cada um dos locais, separadamente.

Para identificação da interação dos atributos edáficos com as frações de P no solo, independentemente do tratamento adotado, foram realizadas análises de correlação de Spearman para cada área em estudo, e, posteriormente, uma análise envolvendo todos os dados. Foram calculadas as correlações de Spearman entre os atributos do solo, as frações de P no solo e a produtividade florestal, a fim de elucidar os efeitos dos fatores avaliados na produtividade florestal.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Atributos químicos dos solos

Em geral, poucas diferenças entre tratamentos foram encontradas dentre os atributos químicos dos solos (Tabela 7). Portanto, foi dada ênfase nos atributos que tiveram maiores diferenças e são mais importantes. Após o plantio das mudas, em função do acelerado crescimento da parte aérea e do sistema radicular da planta, e da aplicação dos fertilizantes em sincronia com o ritmo de crescimento das plantas, os nutrientes no solo foram rapidamente absorvidos. Assim, alteram apenas temporariamente o teor de nutrientes no solo, retornando aos teores similares do status original, mas causam expressivos aumentos nos teores de nutrientes nas plantas. Os atributos químicos do solo tiveram pequenas mudanças, possivelmente, em função do pouco tempo de consórcio, sendo necessário maior tempo de avaliação para obter resultados significativamente distintos.

Na área experimental de Itatinga, na camada de 0 – 5 cm do solo, os atributos pH,  $K^+$ ,  $Mg^{2+}$  e  $CTC_e$  tiveram valores diferentes entre os tratamentos. O pH foi maior no tratamento Eucalipto em comparação ao Misto. O  $K^+$  teve o maior teor no tratamento Acácia, e o  $Mg^{2+}$ , no Acácia em comparação ao Misto. A  $CTC_e$  foi maior no tratamento Misto, quando comparada ao Eucalipto (Tabela 7). É provável que os maiores teores dos nutrientes no tratamento Acácia sejam devidos à maior taxa de decomposição da serapilheira, resultante de sua menor relação C/N. Bini et al. (2013b), no mesmo experimento da área experimental de Itatinga, relatou relações C/N de 21, 48, 28 e 34, na serapilheira dos tratamentos Acácia, Eucalipto, acácia no plantio Misto e eucalipto no plantio Misto, respectivamente, aos 20 meses de idade.

Conforme detectado nesse estudo, a acidificação do solo pode ser considerada um processo comum em plantios de acácia. A *Acacia mangium*, devido à grande extrusão radicular de  $H^+$ , causada pela elevada absorção de cátions, tem a capacidade de acidificar rapidamente o solo que apresenta um elevado pH (BINKLEY; GIARDINA, 1997; YAMASHITA; HARDJONO, 2008).

Na área experimental de Itatinga, houve maior número de diferenças entre os atributos avaliados. Os resultados estão diretamente relacionados à mineralização dos resíduos florestais, consequentemente, à ciclagem de nutrientes, bem como ao maior período experimental, pois os

tratamentos estão na segunda rotação de cultivo com os mesmos tratamentos. A qualidade da MO também interfere nos teores de alguns nutrientes nos solos.

As árvores podem manter ou aumentar a fertilidade das camadas superficiais do solo por causa da adição de MO, da ciclagem de nutrientes, da fixação biológica de  $N_2$ , do aumento da atividade biológica e da melhoria das propriedades físicas do solo (GONÇALVES, 2011). Com a ciclagem dos nutrientes presentes nos resíduos vegetais, esperam-se maiores teores de  $K^+$  e  $Mg^{2+}$  na superfície, pois, em geral, o teor de K nos resíduos está entre 65 e 75% do total de K absorvido pela planta (MALAVOLTA, 2006). Isso demonstra que os resíduos da colheita constituem uma importante fonte de K para as culturas subsequentes. A média do teor de  $K^+$  de todos os tratamentos em Itatinga, na camada de 0 – 5 cm, foi de  $0,70 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ , e, na camada de 5 – 10 cm, de  $0,57 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ .

Os teores de Ct no tratamento Acácia, na área experimental de Bofete, nas duas camadas estudadas, foram maiores do que os encontrados para o Eucalipto. O mesmo ocorreu para os teores de  $Mg^{2+}$ , na camada de 0 – 5 cm (Tabela 7). Os tratamentos influenciaram diretamente os teores de Ct em Bofete, sendo essas alterações mais expressivas nas camadas superficiais do solo (Tabela 7). No cultivo mínimo, Almeida et al. (2005) observaram o aumento do teor de COS nas camadas superficiais, conseqüentemente, nos teores de nutrientes oriundos das frações orgânicas. Os resíduos vegetais, junto com as raízes, são as principais fontes de CO para o solo. Segundo Voigtlaender (2012), no mesmo experimento da área experimental de Bofete, o tratamento Eucalipto depositou maior quantidade de serapilheira em comparação ao Acácia. No primeiro caso, a relação C/N da serapilheira do eucalipto era de 67,4 e da acácia de 31,6. Mesmo com uma maior deposição de serapilheira no tratamento Eucalipto, os teores de Ct nas duas camadas e do  $Mg^{2+}$  na camada de 0 – 5 cm foram menores em relação ao tratamento Acácia. A menor relação C/N no tratamento Acácia pode ter favorecido o aumento dos teores de Ct e  $Mg^{2+}$  no solo.

No solo da área experimental de Luiz Antônio foi encontrada diferença somente no teor de P-mel na camada de 0 – 5 cm, sendo maior no solo sob tratamento Acácia, não diferindo do Misto (Tabela 7). Esse aumento no teor de P-mel no solo nos tratamentos que continham acácia, provavelmente foi oriundo da mineralização do CO. Mesmo não havendo diferença entre os tratamentos, o teor de Ct foi mais elevado nos solos sob os tratamentos que continham a acácia (Tabela 7). A competição dos ácidos orgânicos com os íons de fosfatos pelos sítios de adsorção, na camada superficial, pode resultar em maior teor de P disponível (SOUZA FILHO, 2014). Bini

et al. (2013b) verificaram na área experimental de Itatinga, aos 20 meses de idade, que a relação C/P na serapilheira do tratamento Acácia era de 63 e, no tratamento Eucalipto, de 121, ocasionando liberação mais rápida do P contido nos resíduos vegetais no tratamento Acácia.

Outro fator que interfere nos baixos teores de P-mel no solo sob Eucalipto é a elevada capacidade de retranslocação dos nutrientes móveis na planta (ciclagem bioquímica). A eficiente ciclagem bioquímica no eucalipto faz com que a serapilheira produzida em seus plantios seja pobre em nutrientes, especialmente em N e P, sendo, portanto, de difícil decomposição (GAMA-RODRIGUES; BARROS, 2002).

Na área experimental de Santana do Paraíso, o valor de pH foi maior no tratamento Eucalipto na camada de 0 – 5 cm, em comparação ao Acácia e, na de 5 – 10 cm, foi menor no solo sob Acácia. A acidez do solo é avaliada, geralmente, por meio do seu pH, determinando-se a atividade de  $H^+$  em uma suspensão de solo com água ou soluções salinas. Portanto, o pH está relacionado com a concentração dos  $H^+$  na solução do solo, que determina a acidez ativa do solo. Como em Santana do Paraíso, a concentração de  $H^+$  era menor do que nas demais áreas, a acácia proporcionou maiores alterações nos valores de pH. Esta redução no pH reforça a possibilidade de leguminosas induzirem acidificação do solo.

Os teores médios de  $K^+$  em Itatinga, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso foram de 0,6; 0,6; 0,7 e 1,5  $mmol_c dm^{-3}$ , respectivamente, considerando todos os tratamentos e camadas estudadas. De acordo com Gonçalves (2011), para a cultura do eucalipto, esses teores são interpretados como sendo baixo em Itatinga, Bofete e Luiz Antônio e médio em Santana do Paraíso.

Para o  $Ca^{2+}$ , os teores médios em Itatinga, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso foram de 12,1; 4,8; 15,8 e 44,3  $mmol_c dm^{-3}$ , respectivamente, considerando todos os tratamentos e camadas estudadas. De acordo com Gonçalves (2011), para a cultura do eucalipto, esses teores são interpretados como sendo médio em Bofete e alto em Itatinga, Luiz Antônio e Santana do Paraíso.

Em relação ao  $Mg^{2+}$ , os teores médios em Itatinga, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso foram de 4,9; 1,4; 2,8 e 6,6  $mmol_c dm^{-3}$ , respectivamente, considerando todos os tratamentos e camadas estudadas. De acordo com Gonçalves (2011), para a cultura do eucalipto, esses teores são interpretados como sendo baixo em Bofete, médio em Luiz Antônio e alto em Itatinga e Santana do Paraíso.

Considerando a SB, os teores médios em Itatinga, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso foram de 17,8; 7,0; 19,6 e 52,9  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente, considerando todos os tratamentos e camadas estudadas. De acordo com Gonçalves (2011), para a cultura do eucalipto, esses teores são interpretados como sendo baixo em Bofete e alto em Itatinga, Luiz Antônio e Santana do Paraíso.

Avaliando a CTC<sub>e</sub>, os teores médios em Itatinga, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso foram de 26,8; 19,4; 26,8 e 56,3  $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$ , respectivamente, considerando todos os tratamentos e camadas estudadas. De acordo com Gonçalves (2011), para a cultura do eucalipto, esses teores são interpretados como sendo médio em Itatinga, Bofete e Luiz Antônio e alto em Santana do Paraíso.

Os baixos teores desses nutrientes indicam alto potencial de resposta à fertilização. Para os teores médios, há moderada resposta, e nenhuma resposta à fertilização, quando os teores dos atributos estão altos no solo. Em decorrência da considerável exportação de nutrientes com produtos florestais, o cultivo mínimo e a fertilização são práticas essenciais para garantir a sustentabilidade da produtividade em longo prazo. Práticas de manejo do solo conservacionistas, como o cultivo mínimo, potencializam os processos de ciclagem do P e aumentam a eficiência de seu uso (BAZANI et al., 2014).

Tabela 7 – Atributos químicos dos solos em duas camadas (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais

Área	Tratamento	g kg <sup>-1</sup>			pH	mg dm <sup>-3</sup>		mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>			CTC <sub>e</sub>	P-rem	
		Ct	Nt	C/N		P-mel	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>			SB
Itatinga, SP		<b>0 – 5 cm</b>											
	Acácia	16,2 <sup>A ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>	16,0 <sup>ns</sup>	4,1 ab <sup>p=9,6</sup>	2,8 <sup>ns</sup>	0,8 a <sup>**</sup>	16,7 <sup>ns</sup>	6,2 a <sup>p=9,4</sup>	7,9 <sup>ns</sup>	24,0 <sup>ns</sup>	31,9 ab <sup>*</sup>	35,8 <sup>ns</sup>
	Eucalipto	15,2	0,9	15,9	4,1 a	2,8	0,6 b	14,5	5,4ab	8,6	20,7	29,3 b	35,8
	Misto	15,8	1,0	15,1	4,0 b	3,3	0,7 b	17,8	5,2 b	9,4	23,9	33,3 a	37,3
		<b>5 – 10 cm</b>											
	Acácia	14,2 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>	12,8 <sup>ns</sup>	4,0 <sup>ns</sup>	2,8 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	8,2 <sup>ns</sup>	4,6 <sup>ns</sup>	9,4 <sup>ns</sup>	13,6 <sup>ns</sup>	22,9 <sup>ns</sup>	37,3 <sup>ns</sup>
Eucalipto	12,4	1,0	12,0	4,1	2,7	0,6	7,7	4,2	9,0	12,6	21,6	36,3	
Misto	13,3	1,0	12,9	4,0	3,0	0,5	7,6	4,1	9,4	12,4	21,8	36,5	
Bofete, SP		<b>0 – 5 cm</b>											
	Acácia	13,2 a <sup>p=11,2</sup>	0,8 <sup>ns</sup>	15,2 <sup>ns</sup>	3,8 <sup>ns</sup>	10,8 <sup>ns</sup>	0,7 <sup>ns</sup>	5,9 <sup>ns</sup>	1,5 a <sup>p=10,2</sup>	13,3 <sup>ns</sup>	8,2 <sup>ns</sup>	21,4 <sup>ns</sup>	39,0 <sup>ns</sup>
	Eucalipto	9,8 b	0,7	12,9	3,8	10,0	0,6	4,8	1,1 b	12,4	6,7	19,1	40,0
	Misto	10,5 ab	0,7	14,1	3,8	9,7	0,6	5,1	1,3 ab	11,8	7,3	19,0	38,9
		<b>5 – 10 cm</b>											
	Acácia	14,7 a <sup>*</sup>	1,1 <sup>ns</sup>	13,8 <sup>ns</sup>	3,8 <sup>ns</sup>	10,2 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	4,7 <sup>ns</sup>	1,7 <sup>ns</sup>	12,4 <sup>ns</sup>	7,2 <sup>ns</sup>	19,5 <sup>ns</sup>	40,8 <sup>ns</sup>
Eucalipto	11,3 b	1,2	9,4	3,8	9,8	0,5	3,6	1,3	12,8	5,7	18,4	41,3	
Misto	13,1 ab	1,3	10,0	3,8	10,0	0,6	4,5	1,6	12,1	6,9	19,0	41,8	
Luiz Antônio, SP		<b>0 – 5 cm</b>											
	Acácia	10,4 <sup>ns</sup>	1,0 <sup>ns</sup>	9,7 <sup>ns</sup>	4,1 <sup>ns</sup>	15,9 a <sup>*</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	20,9 <sup>ns</sup>	2,7 <sup>ns</sup>	6,9 <sup>ns</sup>	24,8 <sup>ns</sup>	31,7 <sup>ns</sup>	42,8 <sup>ns</sup>
	Eucalipto	9,8	1,0	9,6	4,2	11,5 b	0,6	22,1	3,1	6,1	26,3	32,4	42,1
	Misto	11,2	1,0	10,4	4,2	14,2 ab	0,7	22,7	3,2	5,9	26,8	32,6	42,0
		<b>5 – 10 cm</b>											
	Acácia	12,4 <sup>ns</sup>	1,5 <sup>ns</sup>	7,9 <sup>ns</sup>	4,0 <sup>ns</sup>	15,2 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	10,1 <sup>ns</sup>	2,5 <sup>ns</sup>	8,1 <sup>ns</sup>	13,4 <sup>ns</sup>	21,5 <sup>ns</sup>	43,8 <sup>ns</sup>
Eucalipto	11,1	1,5	7,2	4,1	12,9	0,7	9,7	2,7	7,6	13,2	20,8	45,3	
Misto	13,6	1,5	8,9	4,1	22,0	0,7	9,5	2,9	8,5	13,1	21,6	44,4	
Santana do Paraíso, MG		<b>0 – 5 cm</b>											
	Acácia	26,8 <sup>ns</sup>	1,8 <sup>ns</sup>	14,4 <sup>ns</sup>	4,8 b <sup>*</sup>	13,1 <sup>ns</sup>	1,9 <sup>ns</sup>	55,6 <sup>ns</sup>	7,1 <sup>ns</sup>	3,5 <sup>ns</sup>	65,4 <sup>ns</sup>	68,9 <sup>ns</sup>	24,7 <sup>ns</sup>
	Eucalipto	28,1	1,9	14,4	5,9 a	28,7	1,6	73,9	8,6	0,8	85,1	85,9	24,7
	Misto	27,7	1,7	15,8	5,5 ab	14,0	1,2	60,7	8,1	1,0	70,6	71,6	24,0
		<b>5 – 10 cm</b>											
	Acácia	23,6 <sup>ns</sup>	2,0 <sup>ns</sup>	11,3 <sup>ns</sup>	4,2 b <sup>*</sup>	10,1 <sup>ns</sup>	1,7 <sup>ns</sup>	21,3 <sup>ns</sup>	4,9 <sup>ns</sup>	7,3 <sup>ns</sup>	28,2 <sup>ns</sup>	35,4 <sup>ns</sup>	25,9 <sup>ns</sup>
Eucalipto	22,0	1,8	11,7	4,7 a	7,9	1,3	28,7	5,5	3,1	35,9	39,0	26,7	
Misto	21,5	1,9	11,0	4,7 a	8,3	1,1	25,5	5,4	4,5	32,3	36,8	26,2	

<sup>A</sup> Média de quatro repetições (blocos). pH em CaCl<sub>2</sub>; Relação 1:2,5; P-mel - K: Extrator Mehlich-1; Ca - Mg - Al: Extrator KCl - 1mol L<sup>-1</sup>; SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; Ct - Nt: Combustão a seco no analisador elementar LECO TruSpec® CHNS Micro. Médias seguidas por letra diferente na coluna, em cada profundidade e em cada local, diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste LSD; \* p<0,05; \*\* p<0,01; e <sup>ns</sup> Não significativo ao nível de 5% pelo teste F

De modo geral, não houve efeito dos tratamentos nos teores dos micronutrientes, nas diferentes áreas experimentais e camadas do solo, com exceção do B na camada de 5 – 10 cm, em Bofete; do Zn na camada de 5 – 10 cm, em Luiz Antônio; e do Fe na camada de 0 – 5 cm, em Santana do Paraíso (Tabela 8). Quando encontradas diferenças entre os teores dos micronutrientes, os solos sob o tratamento Eucalipto continham os menores valores, quando comparados ao Acácia. Com uma alta taxa de acúmulo de biomassa no tratamento Eucalipto, grandes quantidades de nutrientes são absorvidos do solo, e por causa de sua alta eficiência na absorção de nutrientes, esses podem ter menores teores no solo ao final de um ciclo de cultivo.

Segundo Gonçalves (2011), os teores de B, Zn, Cu, Mn e Fe seriam classificados como altos para a cultura do eucalipto, pois tiveram valores médios iguais ou maiores que 0,7; 1,3; 0,9; 5,1 e 13,0 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Assim, os teores dos micronutrientes foram suficientes para o pleno crescimento das plantas. Como os solos em geral tiveram baixos valores de pH, os teores dos micronutrientes metálicos (Zn, Fe e Cu) foram altos.

Tabela 8 – Teores de micronutrientes nos solos em duas camadas (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais

Área	Tratamento	Zn	Fe	Mn	Cu	B	
<b>mg dm<sup>-3</sup></b>							
<b>0 – 5 cm</b>							
Itatinga, SP	Acácia	1,13 <sup>A ns</sup>	113,60 <sup>ns</sup>	5,60 <sup>ns</sup>	0,59 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,03	133,85	6,18	0,66	0,55	
	Misto	1,00	115,55	5,88	0,62	0,63	
	<b>5 – 10 cm</b>						
	Acácia	0,70 <sup>ns</sup>	110,98 <sup>ns</sup>	3,63 <sup>ns</sup>	0,89 <sup>ns</sup>	0,55 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	0,63	119,68	3,30	1,07	0,45	
Bofete, SP	Misto	0,68	114,85	3,38	0,97	0,48	
	<b>0 – 5 cm</b>						
	Acácia	1,70 <sup>ns</sup>	91,00 <sup>ns</sup>	4,53 <sup>ns</sup>	0,54 <sup>ns</sup>	0,95 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,55	93,88	2,85	0,64	0,80	
	Misto	1,53	89,40	5,40	0,49	0,78	
	<b>5 – 10 cm</b>						
Luiz Antônio, SP	Acácia	1,30 <sup>ns</sup>	88,33 <sup>ns</sup>	4,25 <sup>ns</sup>	0,58 <sup>ns</sup>	0,98 a*	
	Eucalipto	1,10	93,80	2,43	0,77	0,75 b	
	Misto	1,25	93,68	4,85	0,56	0,83 ab	
	<b>0 – 5 cm</b>						
	Acácia	1,83 <sup>ns</sup>	141,23 <sup>ns</sup>	44,30 <sup>ns</sup>	0,67 <sup>ns</sup>	0,53 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,53	134,78	48,00	0,60	0,50	
Santana do Paraíso, MG	Misto	2,05	149,23	42,13	0,60	0,53	
	<b>5 – 10 cm</b>						
	Acácia	1,23 a*	131,68 <sup>ns</sup>	36,25 <sup>ns</sup>	0,68 <sup>ns</sup>	0,70 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	0,90 b	120,65	38,33	0,68	0,63	
	Misto	1,15 a	138,70	36,03	0,65	0,68	
	<b>0 – 5 cm</b>						
Santana do Paraíso, MG	Acácia	4,40 <sup>ns</sup>	107,38 a**	25,50 <sup>ns</sup>	0,50 <sup>ns</sup>	1,05 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	5,73	71,70 b	40,50	0,83	0,95	
	Misto	4,40	87,80 b	34,95	1,10	0,78	
	<b>5 – 10 cm</b>						
	Acácia	1,63 <sup>ns</sup>	93,80 <sup>ns</sup>	13,95 <sup>ns</sup>	0,43 <sup>ns</sup>	1,38 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,78	80,93	16,48	0,52	1,23	
Misto	1,98	85,33	18,40	0,56	0,95		

<sup>A</sup> Média de quatro repetições (blocos). Fe - Zn - Mn - Cu: Extrator Mehlich-1; B: Extrator água quente. Médias seguidas de diferente letra na coluna, em cada profundidade e em cada local, diferem entre si, ao nível de 5% de probabilidade pelo teste LSD. \* p<0,05; \*\* p<0,01; e <sup>ns</sup> Não significativo ao nível de 5% pelo teste F

## 4.2 Frações de P nos solos

Poucas diferenças foram observadas em relação às frações de P no solo (Tabela 9). Essas infrequentes diferenças demonstram que os tratamentos não foram capazes de gerar modificações expressivas nas frações de P, raramente alterando a labilidade deste nutriente no solo.

Na área experimental de Itatinga, na profundidade de 0 – 5 cm, foram encontradas diferenças entre os tratamentos para os teores da fração P<sub>IRTA</sub> e para teores totais de Pi lábil (Pi-L). O tratamento que proporcionou os maiores teores na fração P<sub>IRTA</sub> e no Pi-L foi o Misto. Entretanto, no teor de Pi-L, o Misto não diferiu do tratamento Acácia. Para a fração moderadamente

lável  $P_{iHCl}$ , o tratamento Misto também ocasionou o maior teor na camada de 0 – 5 cm, não diferindo do Eucalipto. Na camada de 5 – 10 cm, o tratamento Misto proporcionou o menor teor da fração  $P_{iHCl}$  e do  $P_{i-ML}$ , desta vez, ambos não diferindo do Acácia. Ainda na camada de 5 – 10 cm, o teor da fração inorgânica considerada como não lábil ( $P_{iHID-0,5}$ ) foi menor no tratamento Acácia, e da fração orgânica, considerada como não lábil ( $P_{oHID-0,5}$ ), o menor teor foi verificado no Misto.

De acordo com Bini et al. (2013b), na mesma área experimental de Itatinga, no tratamento Misto, houve menor teor de C total na serapilheira comparativamente aos tratamentos Acácia e Eucalipto, a partir de 14 meses do plantio. Em contrapartida, maior valor de P total na serapilheira foi encontrado na área do tratamento Misto, até 14 meses do plantio. Essas características inerentes ao tratamento Misto favoreceram menores relações C/N e C/P na serapilheira comparativamente ao Eucalipto. Deduz-se que a presença de acácia diminui as relações C/N e C/P na serapilheira. Esses resultados são indicativos da maior rapidez na decomposição da serapilheira, conseqüentemente, maior disponibilidade de P, como verificado neste estudo. Forrester, Bauhus e Cowie (2005a) verificaram aumento nos teores de  $P_i$  lábil em plantios consorciados, na presença de leguminosas, além de favorecer a diminuição da relação C/N da serapilheira (FORRESTER; BAUHUS; COWIE, 2005b).

O menor teor da fração  $P_{iHID-0,5}$ , considerada não lábil, no tratamento Acácia, sugere que, de alguma forma, esta espécie consegue absorver o P oriundo dessa fração, talvez devido às associações com fungos micorrízicos, diminuindo os seus teores no solo. O tratamento Eucalipto, por gerar a formação de serapilheira mais recalcitrante, também pode aumentar os teores dessa fração de P. Segundo Binkley et al. (1992), Giardina e Bashkin (2000) e Kaye et al. (2000), em plantações consorciadas de *Facaltaria moluccana* e *Eucalyptus saligna*, a disponibilidade de P no solo diminuiu em proporções crescentes, à medida que se aumentava a população de *F. moluccana*. Por outro lado, esses autores verificaram que o teor de P na serapilheira aumentou com proporções crescentes de *F. moluccana*. Neste caso, a absorção de P por *F. moluccana* ocorreu devido à associação com fungos micorrízicos (BINKLEY; RYAN, 1998; BINKLEY; GIARDINA; BASHKIN, 2000) e a utilização de P que não estava disponível para *E. saligna* (BINKLEY; GIARDINA; BASHKIN, 2000). Resultados semelhantes também foram verificados por Forrester, Bauhus e Cowie (2005b), fato este que, de modo geral, demonstra o estímulo da ciclagem de P em plantios consorciados.

Como relatado por Negassa e Leinweber (2009), o efeito do uso do solo e dos sistemas de cultivos sob as frações de P são influenciados pela intensidade de uso e pelo tempo de implantação dos sistemas. O maior tempo de cultivo do solo em Itatinga pode explicar o maior número de diferenças entre os teores das frações, pois, a área se encontra na segunda rotação de cultivo sob os mesmos tratamentos, sendo que as demais áreas estavam no final da primeira rotação no momento das amostragens de solo.

Tabela 9 – Frações de P em duas camadas do solo (0 – 5 e 5 – 10 cm), nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nas diferentes áreas experimentais

Local	Trat.	Pi-L			Po-L	Pi-ML			Po-ML	Pi-ÑL	Po-ÑL	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	
		Pi <sub>RTA</sub>	Pi <sub>BIC</sub>	Pi <sub>RTA</sub> +Pi <sub>BIC</sub>	Po <sub>BIC</sub>	Pi <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HCl</sub>	Pi <sub>HID-0,1</sub> +Pi <sub>HCl</sub>	Po <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HID-0,5</sub>	Po <sub>HID-0,5</sub>			
mg kg <sup>-1</sup>														
<b>0 – 5 cm</b>														
Itatinga, SP	Acácia	1,9 <sup>A</sup> b*	9,5 <sup>ns</sup>	11,4 ab*	5,8 <sup>ns</sup>	22,2 <sup>ns</sup>	0,4 b <sup>p=7,9</sup>	22,7 <sup>ns</sup>	30,1 <sup>ns</sup>	89,7 <sup>ns</sup>	39,1 <sup>ns</sup>	120,3 <sup>ns</sup>	319,1 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	2,2 b	8,9	11,2 b	7,9	23,8	0,6 ab	24,4	26,8	106,5	31,8	108,2	316,7	
	Misto	2,9 a	10,1	13,0 a	5,7	23,3	0,7 a	24,0	20,8	99,2	21,4	109,1	293,1	
	<b>5 – 10 cm</b>													
	Acácia	1,5 <sup>ns</sup>	10,6 <sup>ns</sup>	12,1 <sup>ns</sup>	2,8 <sup>ns</sup>	15,7 <sup>ns</sup>	0,9 ab*	16,6 ab <sup>p=8,9</sup>	36,2 <sup>ns</sup>	94,3 b*	55,7 a*	120,3 <sup>ns</sup>	338,0 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,6	10,0	11,6	4,3	16,6	1,5 a	18,1 a	37,5	126,8 a	32,0 a	105,8	336,1	
Misto	1,6	9,8	11,4	3,6	14,3	0,5 b	14,8 b	40,5	144,6 a	4,2 b	89,0	308,0		
<b>0 – 5 cm</b>														
Bofete, SP	Acácia	5,0 <sup>ns</sup>	10,7 <sup>ns</sup>	15,8 <sup>ns</sup>	11,5 <sup>ns</sup>	23,5 <sup>ns</sup>	0,8 <sup>ns</sup>	24,3 <sup>ns</sup>	23,0 <sup>ns</sup>	70,4 <sup>ns</sup>	42,4 <sup>ns</sup>	61,3 <sup>ns</sup>	248,7 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	5,2	9,9	15,1	16,8	21,9	0,9	22,8	23,4	72,0	56,4	79,0	285,5	
	Misto	4,2	10,1	14,3	12,8	24,7	0,9	25,6	28,9	77,7	42,3	105,7	307,2	
	<b>5 – 10 cm</b>													
	Acácia	6,2 <sup>ns</sup>	16,5 <sup>ns</sup>	22,7 <sup>ns</sup>	10,3 <sup>ns</sup>	30,7 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>	31,5 <sup>ns</sup>	16,5 <sup>ns</sup>	82,8 <sup>ns</sup>	45,0 a*	98,7 <sup>ns</sup>	307,5 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	5,4	16,2	21,6	9,5	28,3	0,7	29,0	22,3	101,1	24,2 b	80,5	288,1	
Misto	5,6	15,9	21,5	10,6	31,1	0,8	31,9	21,4	101,5	29,4 ab	86,7	302,9		
<b>0 – 5 cm</b>														
Luiz Antônio, MG	Acácia	4,4 <sup>ns</sup>	15,9 <sup>ns</sup>	20,3 <sup>ns</sup>	11,7 ab*	36,3 <sup>ns</sup>	7,9 <sup>ns</sup>	44,2 <sup>ns</sup>	31,6 a*	51,3 b <sup>p=6,4</sup>	81,4 <sup>ns</sup>	101,8 <sup>ns</sup>	342,2 a*	
	Eucalipto	3,7	14,8	18,5	9,7 b	33,8	7,4	41,3	23,7 b	52,5 ab	60,8	65,6	272,0 b	
	Misto	4,9	15,8	20,7	13,7 a	37,2	8,3	45,5	39,0 a	83,0 a	55,6	94,6	352,2 a	
	<b>5 – 10 cm</b>													
	Acácia	4,8 <sup>ns</sup>	17,4 <sup>ns</sup>	22,2 <sup>ns</sup>	15,6 a <sup>p=11,0</sup>	30,5 <sup>ns</sup>	10,8 <sup>ns</sup>	41,3 <sup>ns</sup>	44,2 <sup>ns</sup>	95,7 <sup>ns</sup>	50,0 <sup>ns</sup>	103,5 <sup>ns</sup>	372,4 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	4,3	16,6	20,9	12,6 ab	29,8	9,8	39,5	46,8	97,4	45,7	131,8	394,6	
Misto	5,7	18,6	24,3	10,1 b	31,2	10,6	41,8	52,7	119,1	78,9	112,3	439,2		
<b>0 – 5 cm</b>														
Santana do Paraíso, MG	Acácia	3,1 <sup>ns</sup>	13,2 a*	16,3 ab <sup>p=9,4</sup>	5,4 <sup>ns</sup>	45,4 <sup>ns</sup>	1,9 ab <sup>p=8,3</sup>	47,3 <sup>ns</sup>	54,2 <sup>ns</sup>	247,0 <sup>ns</sup>	65,2 a <sup>p=6,3</sup>	284,4 <sup>ns</sup>	719,9 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	3,5	13,0 a	16,5 a	6,1	49,7	2,3 a	52,0	40,4	244,4	55,3 ab	270,3	684,9	
	Misto	2,2	11,3 b	13,5 b	5,7	47,7	0,9 b	48,6	54,2	264,5	37,5 b	286,2	710,3	
	<b>5 – 10 cm</b>													
	Acácia	3,1 <sup>ns</sup>	16,0 <sup>ns</sup>	19,1 <sup>ns</sup>	3,0 b*	38,0 <sup>ns</sup>	0,5 <sup>ns</sup>	38,4 <sup>ns</sup>	87,7 a*	83,9 <sup>ns</sup>	122,3 <sup>ns</sup>	303,4 <sup>ns</sup>	657,9 <sup>ns</sup>	
	Eucalipto	1,9	14,8	16,7	1,1 b	34,3	0,6	34,9	64,3 b	111,5	90,3	303,9	622,8	
Misto	1,4	12,9	14,3	9,2 a	35,1	1,7	36,8	55,8 b	93,4	93,8	328,2	631,6		

<sup>A</sup> Médias de quatro repetições. Pi-L: P inorgânico lábil; Po-L: P orgânico lábil; Pi-ML: P inorgânico moderadamente lábil; Po-ML: P orgânico moderadamente lábil; Pi-ÑL: P inorgânico não lábil; Po-ÑL: P orgânico não lábil; Pi<sub>RTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; Pi<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>BIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total. Médias seguidas por diferentes letras na coluna, dentro de cada camada e em cada área, diferem significativamente entre si pelo Teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade; \* p<0,05; e <sup>ns</sup> Não significativo ao nível de 5% pelo teste F

Na área experimental de Itatinga, foi possível verificar a influência negativa do teor de argila nos teores das frações lábeis de P ( $Pi_{RTA}$  e  $PO_{BIC}$ ) e na soma das frações lábeis (P-L). Para as frações moderadamente lábeis, o teor de argila influenciou negativamente a fração inorgânica ( $Pi_{HID-0,1}$ ) e, positivamente, a fração orgânica ( $PO_{HID-0,1}$ ) (Tabela 10). Tais resultados indicam a proteção do P pela formação de complexos argilo minerais. Rheinheimer (2000) estudou as frações de P em solos do Rio Grande do Sul, com diferentes teores de argila, conduzidos sob plantio convencional e cultivo mínimo, com distintas rotações de culturas agrícolas anuais. Em todos os solos, o cultivo mínimo resultou em aumento dos teores de P nas camadas superficiais, principalmente de frações inorgânicas lábeis ( $Pi_{RTA}$  e  $Pi_{BIC}$ ) e moderadamente lábeis ( $Pi_{HID-0,1}$  e  $Pi_{HCl}$ ). Isso possibilitou a manutenção de teores mais elevados de P na solução do solo neste sistema de cultivo. Observou-se ainda acúmulo de frações orgânicas de P, devido à maior adição de palhada. No presente estudo, não foi encontrado resultado similar, pois o Ct não se correlacionou com nenhuma fração de P na área experimental de Itatinga.

Tabela 10 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Itatinga/SP

Atri. <sup>1</sup>	P <sub>IRTA</sub>	P <sub>BIC</sub>	P <sub>OBIC</sub>	P <sub>IHID-0,1</sub>	P <sub>OHID-0,1</sub>	P <sub>IHCl</sub>	P <sub>IHID-0,5</sub>	P <sub>OHID-0,5</sub>	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	P-L	P-ML	P- $\tilde{N}L$	P <sub>O</sub>	P <sub>i</sub>
Ct	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Nt	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C/N	ns	-0,445*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pH	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P-mel	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,418*	ns
K	ns	ns	ns	0,545**	ns	ns	-0,555**	ns	ns	-0,458*	ns	ns	-0,452*	ns	-0,530**
Ca	0,571**	ns	0,424*	0,697**	ns	ns	-0,415*	ns	ns	ns	0,517**	ns	ns	ns	ns
Mg	0,563**	ns	ns	ns	ns	ns	-0,456*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,448*
Al	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SB	0,617**	ns	ns	0,656**	ns	ns	-0,474*	ns	ns	ns	0,476*	ns	ns	ns	-0,410*
CTC <sub>e</sub>	0,642**	ns	ns	0,683**	ns	ns	-0,403*	ns	ns	ns	0,530**	ns	ns	ns	ns
P-rem	ns	ns	-0,659**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,540**	-0,414*	ns	ns	-0,407*
Zn	0,487*	ns	ns	0,673**	-0,418*	ns	-0,400*	ns	ns	ns	0,410*	ns	ns	ns	ns
Fe	ns	ns	0,504**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,431*	ns	ns	ns	ns
Mn	0,733**	ns	ns	0,612**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,503**	ns	ns	ns	ns
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B	ns	ns	ns	0,457*	ns	ns	-0,575**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,521**
Areia	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Silte	0,528**	ns	ns	0,428*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,427*	ns	ns	ns	-0,420*
Argila	-0,416*	ns	-0,402*	-0,451*	0,421*	ns	ns	ns	ns	ns	-0,451*	ns	ns	ns	ns

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade; <sup>1</sup> SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-mel: P extraído por Mehlich-1; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; P<sub>IRTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; P<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OBIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P- $\tilde{N}L$ : P não lábil; P<sub>O</sub>: P orgânico; e, P<sub>i</sub>: P inorgânico

Diferenças entre os teores das frações de P na área experimental de Bofete foram identificadas somente na fração  $P_{OHID-0,5}$ , na camada de 5 – 10 cm, em que o menor teor foi no tratamento Eucalipto relativamente ao Acácia (Tabela 9). O menor teor dessa fração pode estar relacionado aos menores teores de Ct no solo sob Eucalipto, que foi o menor entre os tratamentos (Tabela 7). Na área experimental, realizou-se a aplicação de 3.000 kg ha<sup>-1</sup> de cinzas de caldeira de biomassa, que contém alto teor de Ca (Tabela 3). Entretanto, a aplicação de cinzas não acarretou no aumento dos teores de  $P_{HCl}$ , talvez pelo baixo pH do solo (Tabela 9) (Tabela 7).

O incremento nos teores de Ct na área experimental de Bofete foram proporcionais aos dos teores das frações lábeis inorgânicas ( $P_{IRTA}$  e  $P_{IBIC}$ ) (Tabela 11). Thomas et al. (1999) indicam que o P extraído pela resina é originário da mineralização da MOS. As próprias frações  $P_{IRTA}$  e  $P_{IBIC}$ , além da soma do P lábil, foram correlacionadas positivamente com o P extraído por Mehlich-1, indicando que os extratores agiram de modo semelhante no solo, podendo ambos serem usados, com eficiência equivalente, para estimar a disponibilidade de P (Tabela 11). Embora haja alta e significativa correlação entre os métodos, eles não se substituem, pois não são comparáveis em seus valores absolutos. Por isso, seus níveis críticos serão diferentes.

Tabela 11 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Bofete/SP

Atri. <sup>1</sup>	P <sub>IRTA</sub>	P <sub>IBIC</sub>	P <sub>OBIC</sub>	P <sub>IHID-0,1</sub>	P <sub>OHID-0,1</sub>	P <sub>IHCl</sub>	P <sub>IHID-0,5</sub>	P <sub>OHID-0,5</sub>	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	P-L	P-ML	P- $\bar{N}L$	P <sub>o</sub>	P <sub>i</sub>
Ct	0,481*	0,434*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Nt	ns	0,598**	-0,561**	ns	ns	ns	0,459*	-0,418*	ns	ns	ns	ns	ns	-0,600**	0,657**
C/N	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,433*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,432*	-0,512**
pH	-0,419*	ns	-0,431*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P-mel	0,762**	0,402*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,500**	ns	ns	ns	ns
K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ca	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mg	ns	0,488*	-0,465*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,516**
Al	0,589**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SB	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
CTC <sub>e</sub>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P-rem	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn	ns	-0,476*	ns	-0,487*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,501**	ns
Fe	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mn	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,458*	ns
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,515**	ns	ns	ns
B	0,430*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Areia	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,444*	ns	ns	-0,400*	ns	ns
Silte	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Argila	ns	ns	ns	0,425*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade; <sup>1</sup> SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-mel: P extraído por Mehlich-1; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; P<sub>IRTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; P<sub>IBIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OBIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P- $\bar{N}L$ : P não lábil; P<sub>o</sub>: P orgânico; e, P<sub>i</sub>: P inorgânico

A fração lábil de P orgânico ( $P_{OBIC}$ ) na área experimental de Luiz Antônio foi diferente nas duas camadas de solo entre os tratamentos. Na camada de 0 – 5 cm, o maior teor foi verificado no tratamento Misto, não diferindo do Acácia, e, na camada 5 – 10 cm, o maior teor foi obtido no Acácia, desta vez, não diferindo do Eucalipto (Tabela 9). Conforme relatado por Voigtlaender (2012) em experimento realizado na mesma área experimental de Luiz Antônio, a produção de serapilheira no tratamento Acácia foi menor do que no Eucalipto e Misto. Entretanto, a relação C/N na serapilheira do tratamento Acácia foi de 35,9; no Misto, 60,0; e no Eucalipto, 76,8. Essa menor relação C/N no tratamento Acácia e Misto explica os maiores teores de  $P_{OBIC}$ , que também foi constatado com a extração de P por Mehlich-1. Consequentemente, com este extrator, na camada de 0 – 5 cm, foi encontrado o menor teor de P-mel no tratamento Eucalipto (Tabela 7).

Na camada de solo de 0 – 5 cm, também foram identificadas diferenças nas frações orgânica moderadamente lábil ( $P_{OHID-0,1}$ ), inorgânica não lábil ( $P_{IHID-0,5}$ ) e no teor de  $P_{TOTAL}$ . Na fração  $P_{OHID-0,1}$  e no  $P_{TOTAL}$ , os menores teores estavam no tratamento Eucalipto, e na fração  $P_{IHID-0,5}$ , no Acácia, não diferindo do Eucalipto, o que demonstra o incremento das frações orgânicas nos solos sob Acácia (Tabela 9).

O teor de argila correlacionou-se positivamente com os teores de  $P_{OBIC}$  (Tabela 12). Isso indica que a estabilização de complexos argilo-orgânicos é diretamente proporcional a esse componente granulométrico. A fração lábil de Pi ( $P_{IRTA}$ ) correlacionou-se positivamente com os teores de Ct, Nt e P-mel e, negativamente, com o pH. O teor de Nt correlacionou-se positivamente com quase todas as frações de P estudadas, só correlacionando-se negativamente com a fração  $P_{IHID-0,1}$ , indicando grande interação deste nutriente na disponibilidade do P. O Nt não deve ser tratado isoladamente, pois a relação C/N também influencia a disponibilidade do P, conforme pode ser observado na correlação positiva entre as frações inorgânica moderadamente lábil  $P_{IHID-0,1}$  e a orgânica não lábil  $P_{OHID-0,5}$  com a relação C/N (Tabela 12).

Tabela 12 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Luiz Antônio/SP

Atri. <sup>1</sup>	Pi <sub>RTA</sub>	Pi <sub>BIC</sub>	Po <sub>BIC</sub>	Pi <sub>HID-0,1</sub>	Po <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HCl</sub>	Pi <sub>HID-0,5</sub>	Po <sub>HID-0,5</sub>	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	P-L	P-ML	P- $\bar{N}L$	Po	Pi
Ct	0,669**	ns	ns	ns	ns	ns	0,403*	ns	ns	ns	0,405*	0,410*	ns	ns	0,476*
Nt	0,425*	0,472*	ns	-0,426*	0,684**	ns	0,539**	ns	0,479**	0,588**	0,472*	0,521**	0,559**	ns	0,574**
C/N	ns	ns	ns	0,576**	ns	ns	ns	0,440*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
pH	-0,514**	ns	ns	0,495**	-0,658**	ns	ns	ns	-0,445*	-0,517**	ns	-0,442*	-0,515**	ns	ns
P-mel	0,541**	ns	ns	ns	ns	ns	0,441*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,518**
K	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Ca	ns	-0,432*	ns	0,718**	-0,569**	ns	-0,438*	ns	-0,476**	-0,509**	ns	ns	-0,528**	ns	-0,403*
Mg	ns	ns	ns	0,403*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Al	ns	ns	ns	ns	0,494**	ns	0,444*	ns	0,437*	0,483*	ns	ns	0,474*	ns	0,422*
SB	ns	-0,458*	ns	0,701**	-0,575**	ns	-0,456*	ns	-0,477*	-0,507**	ns	ns	-0,529**	ns	-0,427*
CTC <sub>e</sub>	ns	-0,452*	ns	0,718**	-0,597**	ns	-0,465*	ns	-0,401*	-0,495**	ns	-0,409*	-0,503**	ns	-0,435*
P-rem	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn	ns	ns	ns	0,510**	-0,577**	ns	ns	ns	ns	-0,473*	ns	-0,403*	-0,449*	ns	ns
Fe	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mn	-0,461*	ns	ns	ns	-0,545**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B	0,489*	ns	ns	-0,511**	0,539**	ns	0,535**	ns	ns	0,432*	ns	ns	0,411*	ns	0,509**
Areia	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Silte	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Argila	ns	ns	0,606**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; ns Não significativo a 5% de probabilidade; <sup>1</sup> SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-mel: P extraído por Mehlich-1; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; Pi<sub>RTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; Pi<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>BIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Po<sub>HID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P- $\bar{N}L$ : P não lábil; Po: P orgânico; e Pi: P inorgânico

Na área experimental de Santana do Paraíso, na camada do solo de 0 – 5 cm, foram observadas diferenças nas frações  $P_{iBIC}$  e  $P_{OHID-0,5}$ , sendo os maiores teores encontrados no tratamento Acácia, ambos não diferindo do Eucalipto. Diferenças também foram encontradas nos teores de  $P_{iRTA} + P_{iBIC}$  e na fração  $P_{iHCl}$ , constituindo os maiores teores no tratamento Eucalipto, os quais não diferiram do Acácia. Na camada de 5 – 10 cm, a fração  $P_{OBIC}$  foi maior no tratamento Misto. Nessa mesma camada, a fração moderadamente lábil  $P_{OHID-0,1}$  teve o maior teor no tratamento Acácia. Observa-se um gradiente de concentração no teor médio de  $P_{iHID-0,5}$ , em que o valor médio, considerando todos os tratamentos na profundidade de 0 – 5 cm, foi 162%, maior do que ao da camada de 5 – 10 cm (Tabela 9).

Quando comparado às áreas experimentais avaliadas ao final da primeira rotação de cultivo, Bofete, Luiz Antônio e Santana do Paraíso, observa-se que mais diferenças nos teores das frações de P foram encontradas em Santana do Paraíso (Tabela 9). Além do diferente tipo de solo em Santana do Paraíso, a precipitação pluvial anual é semelhante à dos demais locais. Entretanto, a temperatura do ar é mais elevada, o que influencia diretamente a taxa de mineralização dos resíduos vegetais, sendo mais acelerada e, conseqüentemente, disponibilizando os nutrientes de forma mais rápida. Ressalta-se que em Santana do Paraíso, as coletas de solo foram realizadas seis meses após a colheita do povoamento florestal, portanto houve uma contribuição da decomposição dos resíduos da colheita nos teores das frações de P.

O teor de Ct correlacionou-se positivamente com o teor da fração  $P_{iRTA}$  e negativamente com os teores das frações  $P_{OHID-0,5}$  e  $P_{RES}$  e como teor total de Po. A relação C/N correlacionou-se positivamente com os teores das frações inorgânicas  $P_{iRTA}$ ,  $P_{iHID-0,1}$ ,  $P_{iHCl}$  e  $P_{iHID-0,5}$ , e com o teor total de P inorgânico; e negativamente com os teores das frações orgânicas  $P_{OHID-0,1}$  e  $P_{OHID-0,5}$  e com o teor total de P orgânico (Tabela 13).

A composição e ocorrência em formas inorgânicas de P, em associações com Fe, Al e Ca variam de acordo com o pH do solo, sendo pouco solúveis (BINKLEY, 1986). Os resultados alcançados corroboram com a afirmação relatada acima, de que o pH correlacionou-se positivamente com os teores das frações  $P_{iHID-0,1}$  (P associado com óxidos de Fe e Al),  $P_{iHCl}$  (fosfatos de Ca) e  $P_{iHID-0,5}$ , e com o teor de  $P_{TOTAL}$ ,  $P_{-NL}$  e com o total de P inorgânico.

Observa-se que o teor de argila foi negativamente correlacionado com as frações inorgânicas  $P_{iRTA}$ ,  $P_{iHID-0,1}$ ,  $P_{iHID-0,5}$  e, conseqüentemente, com o P inorgânico total. Gama-Rodrigues et al. (2014) salientaram que em solos tropicais, especialmente aqueles muito

intemperizados e argilosos, a capacidade de fixação do P é alta, reduzindo a disponibilidade de P para as plantas. A formação de compostos organominerais entre a argila e o P orgânico pode ter originado um aumento no teor da fração de Po não lábil ( $P_{O_{HID-0,5}}$ ) e no teor de P orgânico total. Isso é deduzido devido a correlação positiva entre o teor de argila e o teor da fração  $P_{O_{HID-0,5}}$  e com o teor de P orgânico total (Tabela 13).

Os teores da fração de  $P_{i_{HCl}}$  foram positivamente correlacionadas com os teores de Ca (Tabela 13). Segundo Rheinheimer (2000), existe a possibilidade de neoformação de fosfatos de Ca pela adição localizada de fertilizantes fosfatados em solos com alta disponibilidade de Ca, como na camada superficial dos solos sob cultivo mínimo. Na avaliação dos teores das frações de P em um Argissolo na Amazônia Peruana, Beck e Sanches (1994) encontraram aumentos significativos nos teores de  $P_{i_{HCl}}$  na camada superficial das áreas cultivadas. Eles atribuíram este comportamento à aplicação de fertilizantes fosfatados associados à aplicação de calcário. Em trabalho realizado por Motta et al. (2002), utilizando o fracionamento modificado de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), houve aumento na relação  $[P \text{ ligado a Ca} / (P \text{ ligado a Al} + P \text{ ligado a Fe})]$ , indicando que o uso da calagem e das adubações fosfatadas elevadas, situação comum na região do cerrado, contribuem para tal aumento.

Tabela 13 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, na área experimental de Santana do Paraíso/MG

Atri. <sup>1</sup>	P <sub>IRTA</sub>	P <sub>BIC</sub>	P <sub>OBIC</sub>	P <sub>IHID-0.1</sub>	P <sub>OHID-0.1</sub>	P <sub>IHCl</sub>	P <sub>IHID-0.5</sub>	P <sub>OHID-0.5</sub>	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	P-L	P-ML	P- $\bar{N}L$	P <sub>o</sub>	P <sub>i</sub>
Ct	0,611**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,541**	-0,511**	ns	ns	ns	ns	-0,536**	ns
Nt	ns	0,522**	ns	ns	ns	ns	-0,414*	ns	-0,455*	-0,662**	0,429*	ns	-0,630**	ns	ns
C/N	0,509**	ns	ns	0,543**	-0,488*	0,400*	0,751**	-0,733**	ns	ns	ns	ns	ns	-0,786**	0,741**
pH	ns	-0,485*	ns	0,700**	-0,732**	0,450*	0,656**	ns	ns	0,520**	ns	-0,537**	0,626**	-0,594**	0,685**
P-mel	0,479*	ns	ns	0,562**	-0,626**	ns	0,488*	ns	ns	ns	ns	-0,463*	0,480*	-0,434*	0,532**
K	0,792**	0,482*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,509**	ns	0,466*	ns	ns	ns	ns
Ca	ns	-0,475*	0,398*	0,822**	-0,679**	0,520**	0,846**	-0,473*	ns	0,587**	ns	-0,424*	0,636**	-0,680**	0,878**
Mg	0,451*	ns	ns	0,755**	-0,506**	0,419*	0,722**	-0,408*	ns	0,481*	ns	ns	0,481*	-0,536**	0,762**
Al	ns	0,469*	ns	-0,686**	0,625**	ns	-0,555**	ns	ns	-0,548**	ns	0,407*	-0,610**	0,427*	-0,598**
SB	0,412*	-0,404*	ns	0,805**	-0,654**	0,469*	0,824**	-0,452*	ns	0,560**	ns	-0,404*	0,601**	-0,652**	0,859**
CTC <sub>e</sub>	0,507**	-0,407*	ns	0,793**	-0,605**	0,499**	0,856**	-0,528**	ns	0,538**	ns	ns	0,562**	-0,695**	0,892**
P-rem	-0,490*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	0,445*	0,409*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Zn	0,643**	ns	ns	0,697**	-0,489*	0,550**	0,780**	-0,593**	ns	ns	ns	ns	ns	-0,666**	0,780**
Fe	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mn	ns	ns	0,541**	0,820**	-0,506**	0,529**	0,730**	-0,571**	ns	0,406*	ns	ns	0,415*	-0,653**	0,754**
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B	0,480*	0,703**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	-0,459*	-0,646*	0,450*	ns	-0,641**	ns	ns
Areia	ns	-0,563**	ns	0,410*	ns	ns	0,431*	ns	ns	0,418*	ns	ns	ns	ns	0,418*
Silte	0,485*	ns	ns	0,518**	ns	ns	ns	-0,429*	-0,421*	ns	ns	ns	ns	-0,443*	ns
Argila	-0,497**	ns	ns	-0,688**	ns	ns	-0,435*	0,526**	0,428*	ns	ns	ns	ns	0,473*	-0,485*

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; ns Não significativo a 5% de probabilidade; <sup>1</sup> SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-mel: P extraído por Mehlich-1; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; P<sub>IRTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; P<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OBIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0.1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0.1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>IHID-0.5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0.5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P- $\bar{N}L$ : P não lábil; P<sub>o</sub>: P orgânico; e, P<sub>i</sub>: P inorgânico

Nesse estudo não foi possível verificar a formação de um gradiente de concentração das frações de P e do  $P_{TOTAL}$  no solo, na camada mais superficial (0 – 5 cm), pois se avaliou as frações somente até dez centímetros de profundidade. A ciclagem de P via serapilheira e raízes, possivelmente, contribuiu para o aumento de P em profundidade, fazendo com que não houvesse um gradiente de concentração. Por se tratar de um elemento móvel na planta, o P absorvido pelas raízes da camada com maior teor de P é redistribuído para as raízes mais profundas (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). Após a colheita, as raízes entram em processo de decomposição e mineralização, ocorrendo liberação de P em profundidade.

Quando a correlação de Spearman foi realizada considerando todas as áreas experimentais, a fração lábil de P extraída pela resina ( $P_{IRTA}$ ) correlacionou-se positivamente com a extraída por Mehlich-1 (P-mel) e, negativamente, com o teor de argila (Tabela 14). Solos com teores mais elevados de argila devem receber maiores doses de P via fertilização, devido à maior capacidade produtiva e à possível adsorção causada pela argila, resultante da interação com os óxidos de Fe e Al presentes no solo (SILVEIRA; GAVA, 2004).

O equilíbrio entre a mineralização e a imobilização de P nos solos está diretamente relacionado aos teores de Ct e  $P_{TOTAL}$  desses solos. Quando consideradas as duas profundidades e todas as áreas experimentais estudadas, a relação  $Ct/P_{TOTAL}$  no solo do tratamento Acácia foi de 39,8; no Eucalipto, de 37,5; e no Misto, 37,9. Bini et al. (2013b), em um experimento realizado na mesma área experimental de Itatinga, relataram uma relação C/P na serapilheira, aos 20 meses de idade, de 63, 121, 67 e 86, nos tratamentos Acácia, Eucalipto, serapilheira da acácia no tratamento Misto e serapilheira do eucalipto no tratamento Misto, respectivamente. Em áreas com grandes quantidades de resíduos lenhosos, como nas áreas de reforma florestal, a biomassa de material vegetal com alto teor de C é elevada. Em condições em que a relação C/P se torna maior que 300, o solo tende a dispor de menores teores de P, o qual passa a ser imobilizado pelos microrganismos, para a decomposição do material vegetal. Para a relação C/P na faixa de 200 a 300, há um equilíbrio dinâmico de imobilização e mineralização, na qual não há ganhos ou perdas, e na faixa abaixo de 200, há uma maior mineralização de P e, com isso, há ganhos nos teores de P inorgânico no solo (STEVENSON; COLE, 1999).

Mesmo com uma menor relação C/P na serapilheira da acácia, em geral, não se observou incremento nos valores de P disponível, e nem decaimento da relação  $Ct/P_{TOTAL}$  no solo, nos tratamentos que continham essa espécie arbórea. Bacheга (2012), em estudo realizado na área

experimental de Itatinga, no período em que o plantio encontrava-se entre um a dois anos, relatou que a adição de espécies fixadoras de  $N_2$  em uma monocultura de eucalipto pode influenciar a decomposição de serapilheira. Entretanto, esse fato depende do estabelecimento de uma comunidade microbiana capaz de quebrar os constituintes de ambos os materiais. A área de estudo em Itatinga passou sucessivos anos com cobertura vegetal apenas de eucalipto, o que levou a especialização do solo e a sua comunidade de microorganismos decompositores a agirem sobre sua própria serapilheira, considerada recalcitrante e com alta relação C/N. A serapilheira de acácia, apesar de apresentar maior quantidade de N, não foi facilmente decomponível nesse local, mesmo que em segunda rotação de cultivo.

As associações micorrízicas, podem ser alternativas para absorção de P nesses sistemas de solo de baixa fertilidade (VANCE; UHDE-STONE; ALLAN, 2003; MENDES-FILHO et al., 2009). Por meio de associações com fungos micorrízicos, comuns em ambientes florestais, pode haver assimilação direta de frações orgânicas de P pelas plantas (LINDAHL; TAYLOR; FINLAY, 2002). Entretanto, podemos considerar esse maior fornecimento de P via serapilheira como fonte futura para uso deste nutriente, visto que, com o manejo adequado e com o passar do tempo, este P adsorvido pode ser liberado lentamente para a solução do solo e se tornar disponível às plantas, principalmente em cultivos de maior tempo, como os florestais.

O menor teor da fração  $P_{iHID-0,1}$  ocorreu no tratamento Misto, profundidade 5 – 10 cm, na área experimental de Itatinga, onde foi verificado um dos menores valores de pH (4,0) (Tabela 7 e 9). O maior teor da fração  $P_{iHID-0,1}$  ocorreu no tratamento Eucalipto, profundidade de 0 – 5 cm, na área experimental de Santana do Paraíso, onde foi observado o maior pH (5,9). Assim, houve alta correlação positiva entre o pH e o  $P_{iHID-0,1}$ . O pH correlaciona-se positivamente com os teores totais de P orgânico, inorgânico e total (Tabela 14). A variação do pH pode promover a dissolução e a formação de novos compostos fosfatados (PARFITT, 1978; FIXEN; LUDWICK, 1982). A estabilidade dos minerais fosfatados é dependente do pH do solo: em pH baixo (menor que 5,0), há ocorrência, principalmente, do P nos minerais que contém Fe e Al; enquanto em pH maior que 5,0, ocorre preferencialmente naqueles com Ca. No entanto, nesse estudo, o pH não teve correlação com a fração  $P_{iHCl}$ . A maior disponibilidade de P é encontrada com o pH mais próximo da zona ideal que é de 6,5.

A fração  $P_{iHCl}$  representou nas áreas experimentais de Itatinga, Bofete e Santana do Paraíso menos de 1% do  $P_{TOTAL}$ , chegando ao máximo de 2,9% em Luiz Antônio, no tratamento Acácia,

na profundidade de 5 – 10 cm do solo (Tabela 9). Os baixos teores da fração  $P_{iHCl}$  estão relacionados aos baixos valores de pH encontrados nos solos tropicais e subtropicais, onde existe pouca formação do P ligado a Ca. Em Santana do Paraíso foi detectado os maiores teores de  $Ca^{2+}$ , mas os maiores teores da fração  $P_{iHCl}$  foram encontrados em Luiz Antônio, pois em Santana do Paraíso o teor de  $Ca^{2+}$  na  $CTC_e$  é mais elevado. Em Luiz Antônio a saturação por  $Ca^{2+}$  na  $CTC_e$  foi de 59 % e de 79 % em Santana do Paraíso, considerando todos os tratamentos e profundidades avaliadas. Estes resultados estão de acordo com os observados por Pavinato, Merlin e Rosolem (2009), os quais, trabalhando com Latossolos de cerrado submetidos a diferentes sistemas de manejo, também não detectaram presenças significativas de P ligado a Ca.

A fração inorgânica de P no solo extraída com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> ( $P_{iHID-0,5}$ ) é composta de formas de P similares às extraídas por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> ( $P_{iHID-0,1}$ ). No entanto, na extração com NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>, não foi verificada nenhuma diferença entre os tratamentos e, na extração com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>, foram detectadas diferenças nas áreas experimentais localizadas em Itatinga e Luiz Antônio (Tabela 9). As frações extraídas com o NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> não foram removidas pelo extrator usado anteriormente (NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>), por estarem protegidas no interior de microagregados do solo (CROSS; SCHLESINGER, 1995). Deste modo, a utilização dessa fração complementa a fração anterior, com a remoção do P adicional proporcionada pela maior concentração do extrator, pelo processo de acidificação intermediário, pelo tempo adicional que a amostra fica submetida à agitação e, conseqüentemente, às reações de remoção de P do solo (CONDRON; GOH; NEWMAN, 1985). Diante disso, o P extraído nessa fração é considerado como não lábil, pois se encontra no solo protegido no interior dos microagregados, sendo de difícil reversibilidade (CROSS; SCHLESINGER, 1995).

No geral, considerando todos os tratamentos e todas as áreas experimentais avaliadas, o teor médio da fração  $P_{OBIC}$ , na camada de 0 – 5 cm, foi 21 % superior em relação à camada de 5 – 10 cm (Tabela 9). O menor revolvimento do solo no cultivo mínimo, expondo menos o P dos fertilizantes às reações de adsorção, aliado ao maior teor de Ct no solo da camada superficial, pode resultar em diminuição dos sítios de adsorção de P por meio da competição exercida pelos ácidos orgânicos de baixo peso molecular (HUE, 1991). Maquère et al. (2005) verificaram, no horizonte A<sub>1</sub> de um solo cultivado com eucalipto por mais de 60 anos, que a disponibilidade de cargas positivas era próxima de zero, enquanto a de cargas negativas, era máxima.

A percentagem de P orgânico em relação ao P total do solo variou entre 16 e 36%, sendo os 16% encontrado em Itatinga, no Misto, nas duas profundidades avaliadas e os 36% em Luiz Antônio, tratamento Acácia, na profundidade de 0 – 5 cm (Figura 7). Estudando uma mata nativa e uma plantação de eucalipto (*Corymbia citriodora*), Cunha et al. (2007) registraram que, em média, 83% e 70% do P lábil estava na forma orgânica, respectivamente. Sistemas conservacionistas, como o cultivo mínimo, alteram a dinâmica do P no solo. Esses, promovem o acúmulo na camada superficial, que pode ter concentrações de P de 4 a 7 vezes superiores às encontradas no plantio convencional (MUZILLI, 1983), com altos níveis de P orgânico, que podem compreender de 3 a 90% do P total do solo, e de 1 a 3% da MOS. Além disso, o cultivo mínimo pode promover incrementos nas frações orgânicas lábeis de P (RHEINHEIMER; ANGHINONI; KAMINSKI, 2000; OLIBONE, 2005).

Avaliando as frações de P orgânico do solo sob diferentes sistemas de manejo, Tiecher, Rheinheimer e Calegari (2012) observaram que o maior teor de CO e do P total, somados à grande quantidade de biomassa residual depositada na superfície e à grande atividade microbiana na camada superficial em sistemas de cultivo mínimo favoreceram a transformação do P inorgânico do fertilizante em P orgânico. Esse acúmulo ocorreu em todas as frações avaliadas de P orgânico ( $P_{OBIC}$ ,  $P_{OHID-0,1}$  e  $P_{OHID-0,5}$ ). Igualmente, no presente estudo, os tratamentos promoveram diferenças nos teores de todas as frações de Po. Uma correlação alta e positiva foi encontrada entre o teor de Ct e  $P_{TOTAL}$  (Tabelas 9 e 14).

Não foram detectadas diferenças nos teores de  $P_{RESIDUAL}$  entre os tratamentos, nas duas profundidades avaliadas, em nenhum dos experimentos. O teor de argila teve correlação positiva com essa fração (Tabela 14). A fração  $P_{RESIDUAL}$  é classificada como não disponível às plantas, sendo composta de frações orgânicas e inorgânicas, consideradas altamente recalitrantes, portanto, não participando ativamente da disponibilidade de P para as plantas (STEWART; SHARPLEY, 1987). Entretanto, Gatiboni et al. (2007) relataram que, após 12 cultivos sucessivos sem fertilização, houve diminuição dessa fração no solo, indicando que até mesmo o  $P_{RESIDUAL}$  em longo prazo pode se tornar fonte às plantas, quando há deficiência expressiva de P.

Gama-Rodrigues et al. (2014), trabalhando com modelagem de ampla variedade de solos tropicais (N= 81), sob diferentes manejos, encontraram baixa correlação entre os teores das frações de P com o teor de argila. Entretanto, os autores supracitados relatam que as frações orgânicas ( $P_{OBIC}$  e  $P_{OHID-0,1}$ ) tiveram alta correlações com os teores de Ct e N.

Tabela 14 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos e as frações de P no solo, considerando todas as áreas experimentais

Atri. <sup>1</sup>	Pi <sub>RTA</sub>	Pi <sub>BIC</sub>	PO <sub>BIC</sub>	Pi <sub>HID-0,1</sub>	PO <sub>HID-0,1</sub>	Pi <sub>HCl</sub>	Pi <sub>HID-0,5</sub>	PO <sub>HID-0,5</sub>	P <sub>RES</sub>	P <sub>TOTAL</sub>	P-L	P-ML	P-ÑL	Po	Pi
Ct	-0,296**	ns	-0,554**	0,352**	0,352**	-0,295**	0,491**	ns	0,642**	0,581**	-0,430**	0,382**	0,640**	ns	0,473**
Nt	ns	0,453**	-0,287**	0,565**	0,580**	ns	0,375**	0,281**	0,622**	0,692**	ns	0,685**	0,636**	0,441**	0,534**
C/N	-0,208*	-0,556**	-0,332**	ns	ns	-0,386**	0,254**	ns	ns	ns	-0,471**	-0,225*	ns	-0,217*	ns
pH	-0,410**	ns	-0,378**	0,600**	0,459**	ns	0,375**	0,315**	0,577**	0,652**	-0,276**	0,604**	0,627**	0,414**	0,471**
P-mel	0,603**	0,657**	0,416**	0,641**	ns	0,580**	ns	0,337**	ns	0,291**	0,656**	0,397**	ns	0,337**	0,235*
K	-0,223*	ns	-0,333**	0,564**	0,462**	ns	0,226*	0,367**	0,627**	0,597**	ns	0,580**	0,591**	0,452**	0,293**
Ca	-0,306**	ns	-0,302**	0,650**	0,414**	ns	0,275**	0,340**	0,561**	0,621**	-0,214*	0,589**	0,578**	0,422**	0,377**
Mg	-0,560**	ns	-0,629**	0,279**	0,392**	ns	0,487**	ns	0,611**	0,571**	-0,586**	0,391**	0,643**	ns	0,435**
Al	0,320**	ns	0,281**	-0,593**	-0,462**	-0,264**	-0,247*	-0,393**	-0,516**	-0,620**	ns	-0,609**	-0,572**	-0,483**	-0,374**
SB	-0,356**	ns	-0,368**	0,606**	0,422**	ns	0,305**	0,321**	0,582**	0,626**	-0,285**	0,572**	0,601**	0,402**	0,383**
CTC <sub>e</sub>	-0,338**	ns	-0,380**	0,574**	0,363**	ns	0,300**	0,276**	0,567**	0,580**	-0,319**	0,504**	0,568**	0,342**	0,349**
P-rem	0,532**	0,383**	0,637**	ns	-0,347**	0,488**	-0,508**	ns	-0,602**	-0,481**	0,639**	-0,285**	-0,587**	ns	-0,364
Zn	ns	0,210*	ns	0,673**	ns	ns	ns	0,377**	0,328**	0,415**	ns	0,411**	0,339**	0,403**	0,227*
Fe	ns	ns	ns	ns	ns	0,312**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Mn	ns	0,443**	ns	0,668**	0,382**	0,582**	ns	0,389**	0,309**	0,490**	0,274**	0,634**	0,350**	0,502**	0,271**
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	0,213*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B	0,350**	0,281**	ns	0,290**	ns	ns	ns	ns	0,203*	ns	0,242*	ns	ns	0,201*	ns
Areia	0,479**	0,205*	0,524**	-0,244*	-0,316**	0,370**	-0,395**	ns	-0,586**	-0,474**	0,482**	-0,322**	-0,554**	ns	-0,327**
Silte	ns	ns	ns	0,505**	0,301**	0,213*	0,257**	0,298**	0,492**	0,512**	ns	0,454**	0,493**	0,375**	0,316**
Argila	-0,585**	-0,222*	-0,628**	0,217*	0,338**	-0,451**	0,469**	ns	0,610**	0,495**	-0,578**	0,303**	0,593**	ns	0,377**

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; ns Não significativo a 5% de probabilidade; <sup>1</sup> SB: Soma de bases trocáveis; CTC<sub>e</sub>: Capacidade de troca catiônica efetiva; P-mel: P extraído por Mehlich-1; P-rem: P remanescente ou de equilíbrio; Pi<sub>RTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; Pi<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; PO<sub>BIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; PO<sub>HID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; Pi<sub>HID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; PO<sub>HID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RES</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P-ÑL: P não lábil; Po: P orgânico; e, Pi: P inorgânico

A média geral do teor de  $P_{TOTAL}$  na camada de solo de 0 – 10 cm, em todas as áreas experimentais e tratamentos avaliados, foi de  $410 \text{ mg kg}^{-1}$  (Figura 7). Rodrigues (2013) e Souza Filho (2014), estudando cinco diferentes áreas no cerrado brasileiro, relataram que o teor de  $P_{TOTAL}$  nos solos sob o cerrado nativo foi em média de  $417 \text{ mg kg}^{-1}$ , na camada de 0 – 10 cm. De modo geral, espera-se um incremento no  $P_{TOTAL}$  do solo em superfície com a adoção de cultivo mínimo em relação ao plantio convencional. Mesmo com as áreas sendo exploradas por décadas, com a exportação constante de nutrientes, verificou-se no presente estudo que os teores de  $P_{TOTAL}$  nos solos são elevados, devido às adubações realizadas e a eficiência na utilização dos nutrientes pelo eucalipto. Conforme relatado por Tokura et al. (2002), tal fato é atribuído às constantes deposições superficiais de P no sistema.

Os teores de P na camada de 0 – 10 cm, nas áreas experimentais localizadas no estado de São Paulo foram, em média, de  $324 \text{ mg kg}^{-1}$  de  $P_{TOTAL}$ . No solo da área experimental localizada em Minas Gerais, onde observou-se os maiores teores de Ct, pH e argila, obteve-se, em média, um teor de  $P_{TOTAL}$  de  $671 \text{ mg kg}^{-1}$ . Negassa e Leinweber (2009) salientaram que a prática contínua da monocultura, sem a aplicação de P via fertilizantes diminui todas as frações deste nutriente. Dessa forma, a disponibilidade de P varia em função da mineralogia, do manejo e do histórico de uso do solo. A compreensão dessas interações pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias de manejo que proporcionarão melhoria na aquisição de P pela planta e, por conseguinte, maior produtividade nos solos tropicais.

No município de Itatinga, SP, Laclau et al. (2010) verificaram que a entrada de P, via deposição atmosférica, é inferior a  $1,0 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$  e não garante a sustentabilidade das plantações de eucalipto de rápido crescimento ao longo de várias rotações de cultivo. Os solos são altamente intemperizados, com elevada capacidade de adsorção de P (BARROS; COMERFORD; BARROS, 2005), em condições de baixos teores de MOS, o que torna a fertilização a principal via de entrada de nutrientes nas áreas de produção intensiva de madeira (LACLAU et al., 2010). Entretanto com a adoção do cultivo mínimo, como no presente trabalho, a contribuição do  $P_o$  é muito importante. Desconsiderando o P residual, a percentagem de  $P_o$ , variou entre 22 e 60% (Figura 7).

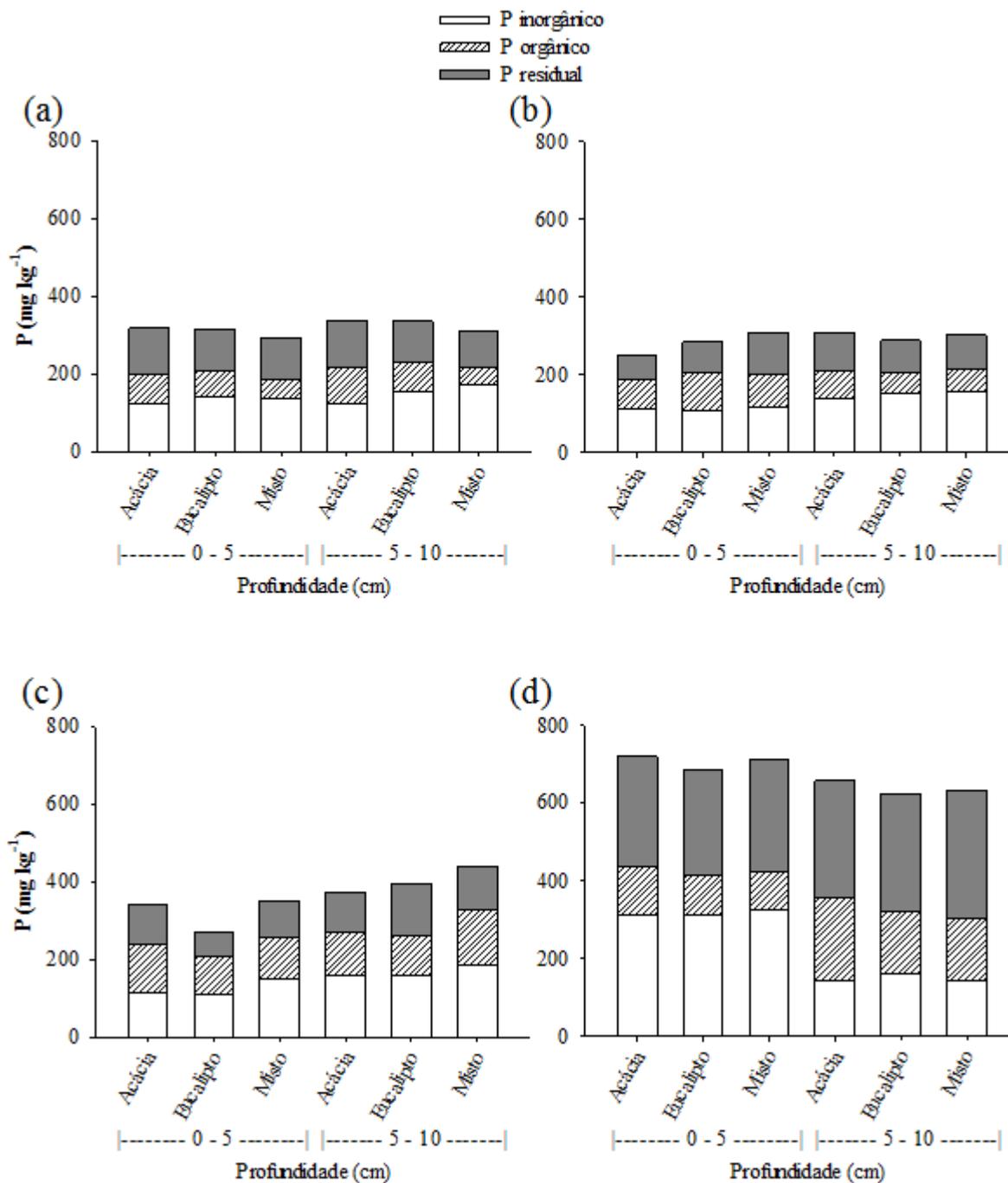


Figura 7 – Distribuição de P inorgânico, orgânico e residual, em duas camadas no solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nos experimentos localizados em (a) Itatinga/SP, (b) Bofete/SP, (c) Luiz Antônio/SP e (d) Santana do Paraíso/MG

### 4.3 Labilidade das frações de P

A quantidade das frações de P, de acordo com sua labilidade, em todas as áreas experimentais, nas duas profundidades estudadas para os tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto foram, respectivamente, 6,2; 6,2; e 6,1% para as frações lábeis; 17,8; 17,1; e 17,4% para as frações moderadamente lábeis; e 75,9; 76,7; e 76,5% para as frações não lábeis. Os

tratamentos não foram capazes de gerar modificações expressivas na labilidade do P no solo, sendo tais modificações mais correlacionadas com os atributos químicos e físicos dos solos. O curto tempo de aplicação dos tratamentos nas áreas experimentais, provavelmente pouco influenciou as quantidades de P nas diferentes frações.

Quando se avaliou cada profundidade separadamente, na área experimental de Luiz Antônio, foram verificadas diferenças nos teores de P moderadamente lábil na camada de 0 – 5 cm, com o maior teor no tratamento Misto e, o menor, no Eucalipto (Figura 8). Os teores de P moderadamente lábil foram positivamente correlacionados com o teor de Ct (Tabela 12). O teor de Ct foi de 11,2 g kg<sup>-1</sup> no tratamento Misto e de 9,8 g kg<sup>-1</sup> no Eucalipto (Tabela 7). Em Santana do Paraíso, na camada de 0 – 5 cm, a fração lábil de P foi maior no tratamento Eucalipto, relativamente ao tratamento Misto, e, na camada de 5 – 10 cm, a fração moderadamente lábil foi maior no Acácia (Figura 8). Em Santana do Paraíso, a fração de P no solo moderadamente lábil foi negativamente correlacionada com o pH (Tabela 13), sendo a fração de P moderadamente lábil na camada de 5 – 10 cm maior no tratamento Acácia (Figura 8), assim como o menor pH no mesmo tratamento (Tabela 7).

A fração de P não lábil não diferiu entre os tratamentos em nenhuma das áreas experimentais (Figura 8). A não modificação dos teores de P dessa fração sugere que as plantas de eucalipto e acácia não foram capazes de acessar as diferentes frações de P não lábil ou que o P ainda não é deficiente para as culturas, o que poderia gerar escassez das frações mais lábeis e, posteriormente, transformações das frações não lábeis para lábeis. As práticas florestais com baixa aplicação de P, em diferentes tipos de solos tropicais, esgotam as frações lábeis e moderadamente lábeis de P. No entanto, a intensidade de depleção depende das propriedades do solo, tais como a textura, pH, Ct, teor inicial de P total e a quantidade de P aplicado via fertilização, que afetam o poder tampão de P no solo (DUFFERA; ROBARGE, 1996). A atividade de organismos do solo, os tipos de plantas cultivadas e os sistemas de manejos também podem influenciar a transformação interna e o ciclo do P original e do aplicado (NEGASSA; LEINWEBER, 2009). Caso o balanço entre as entradas e as saídas de P do sistema seja negativo, as frações lábeis tamponam o P absorvido pelas plantas e, posteriormente, as frações de menor labilidade. Quando o balanço entre a adição e saídas é positivo, o P é acumulado no solo, principalmente nas frações inorgânicas lábeis e moderadamente lábeis (GATIBONI et al., 2013).

Verificou-se que a quantidade média de P lábil em relação ao P<sub>TOTAL</sub>, nas duas camadas e nos três tratamentos, foi de 5,3% na área experimental de Itatinga, 10,5% em Bofete, 9,6% em Luiz Antônio e 3,2% em Santana do Paraíso (Figura 8). Do total de P no

solo, apenas uma pequena porção do P lábil estava em equilíbrio com a solução do solo, devido às interações químicas de alta energia que podem ocorrer entre o fosfato e os constituintes do solo (NOVAIS; SMYTH, 1999). Muitos fatores podem alterar a amplitude do compartimento P lábil, incluindo as características do solo, os fatores ambientais, o manejo do solo e os tipos de plantas (GATIBONI et al., 2013).

Nas áreas experimentais de Itatinga, de Bofete, de Luiz Antônio e de Santana do Paraíso, as quantidades médias de P moderadamente lábil em relação ao  $P_{TOTAL}$  foram de 16,3; 17,7; 22,9; e 15,3%; e de P não lábil, de 78,4; 72,2; 67,5; e 81,6%, respectivamente. Verificou-se que, de modo geral, os solos avaliados têm tendência a acumular P em frações não lábeis. Este efeito é amplamente difundido em estudos sobre a dinâmica do P em solos intemperizados, sendo que as maiores proporções de P são identificadas em frações não lábeis (NOVAIS; SMYTH, 1999).

O solo que teve a maior diferença entre os demais foi o da área experimental de Santana do Paraíso (Figura 8). Observou-se menor quantidade das frações lábeis e maior quantidade das não lábeis e do  $P_{TOTAL}$  nesse solo. As características do solo alteram a amplitude dos compartimentos das frações de P, de acordo com a labilidade (GATIBONI et al., 2013). Os teores de Ct e de argila foram os atributos mais correlacionados com as quantidades de P nos diferentes compartimentos (Tabela 14). Quanto maior foi o teor de Ct ou argila, menor foi o teor de P lábil, maior foi o de P não lábil e do  $P_{TOTAL}$ . Muitos solos encontrados no Brasil, apesar de apresentarem altos teores de argila, comportam-se, em termos de CTC, de modo semelhante a solos arenosos. Isto é explicado pelo fato dessas argilas serem, predominantemente, de baixa atividade (caulinita, sesquióxidos de Fe e Al, etc.). A maioria dos Latossolos sob “cerrado” se enquadram nessa categoria (LOPES; GUILHERME, 2004). Como nos solos usados para fins de florestamento, a composição mineralógica das argilas é predominantemente de natureza sesquioxídica, o teor de argila está diretamente relacionado com o potencial de fixação de P (GONÇALVES, 2011). O conceito de labilidade está associado a uma escala de tempo, em longo prazo não há P não lábil.

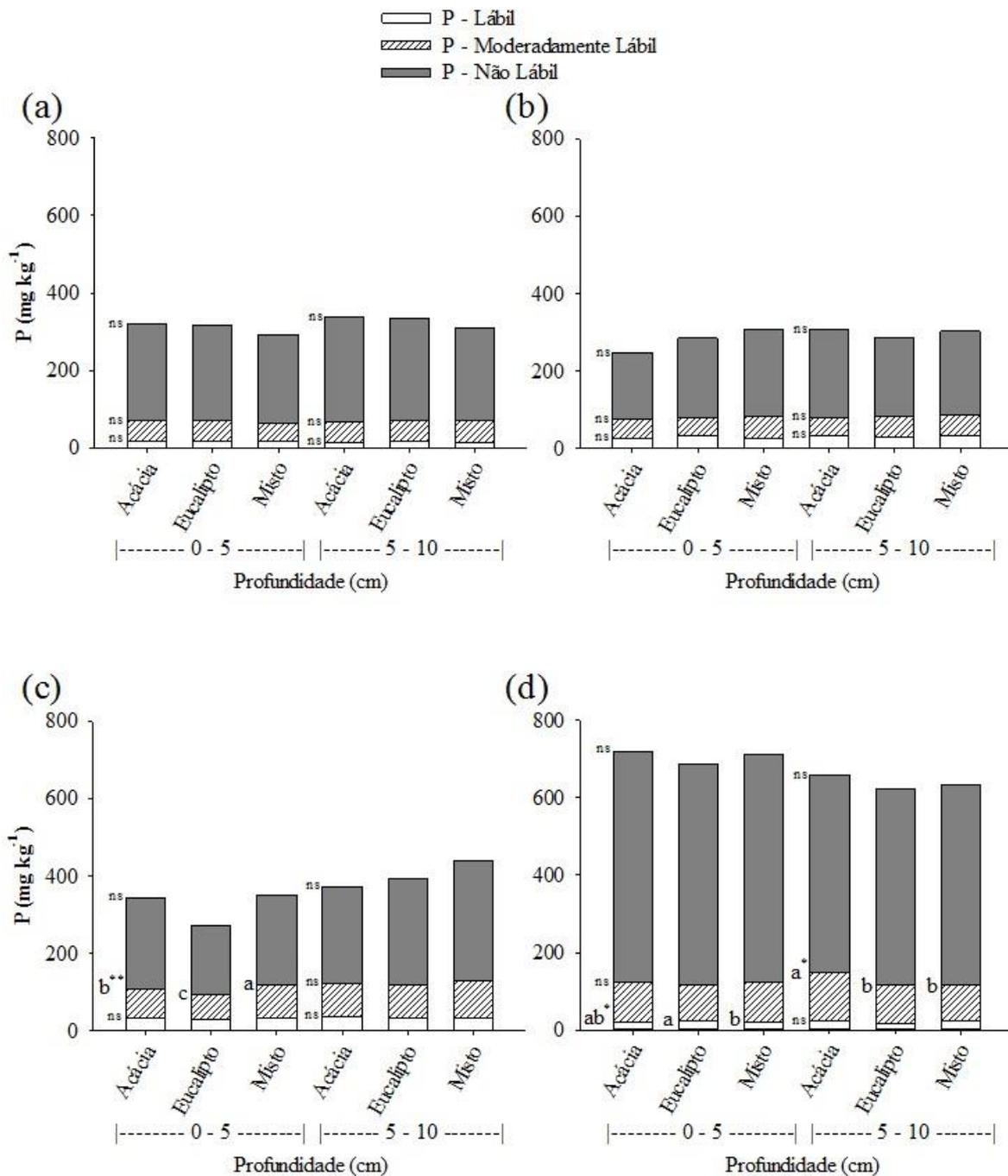


Figura 8 – Distribuição das frações de P quanto à sua labilidade, em duas camadas no solo (0 – 5 e 5 – 10 cm) nos três tratamentos (Acácia, Eucalipto e Misto), nos experimentos localizados em (a) Itatinga/SP, (b) Bofete/SP, (c) Luiz Antônio/SP e (d) Santana do Paraíso/MG. Valores seguidos de diferentes letras, dentro de cada camada, nos diferentes experimentos, diferem entre si pelo Teste LSD, ao nível de 5% de probabilidade; <sup>ns</sup> não significativo ao nível de 5% pelo teste F; \*  $p < 0,05$ ; e \*\*  $p < 0,01$  pelo teste F

Negassa e Leinweber (2009), em revisão acerca do uso do fracionamento de Hedley para estudo de agroecossistemas com diferentes usos e manejos do solo, concluíram que todas as frações inorgânicas e orgânicas de P podem atuar como fonte ou dreno do nutriente disponível, dependendo do manejo e da fertilização. A produção de resíduos vegetais, ainda

que seja omitida a fertilização do solo, é promovida pelo tamponamento do P da solução, pelas frações orgânicas de P, que são mais expressivas nesta situação. Em contrapartida, quando a fertilização é realizada em níveis satisfatórios, ocorre o acúmulo de P em frações inorgânicas, as quais estariam atuando como tamponantes da solução do solo, resultando em acumulação das frações orgânicas de P menos solúveis. Segundo esses autores, a redistribuição das frações de P tende a ocorrer para todas as frações de  $P_i$  e  $P_o$ , entretanto, os efeitos de acúmulo são mais pronunciados nas frações inorgânicas lábeis. Tokura et al. (2002) avaliaram as frações de P no solo por uma modificação do fracionamento de Hedley, Stewart e Chauhan (1982), e descreveram que as frações de P não lábeis tendem a diminuir com o passar do tempo sob cultivo mínimo, indicando que esse sistema proporciona maior disponibilidade de P.

#### **4.4 Produtividade florestal**

Em todas as áreas experimentais, as árvores de acácias foram dominadas pelas árvores de eucalipto no tratamento Misto, desde o estágio inicial de desenvolvimento (Figura 9). A produtividade de lenho no tratamento Eucalipto foi maior do que no Acácia, em todas as áreas experimentais de estudo. Nas áreas experimentais de Bofete e Santana do Paraíso, a biomassa de lenho do tratamento Eucalipto foi igual a biomassa de lenho da soma das espécies no Misto. Essa grande produtividade, em média  $126 \text{ Mg ha}^{-1}$  de lenho no tratamento Eucalipto, se deve à adaptação da espécie às condições climáticas das áreas experimentais. As menores diferenças entre a altura e a CAP das árvores de eucalipto e acácia ocorreram em Santana do Paraíso, MG, onde ocorre a maior temperatura média do ar (Tabela 2). Condições climáticas mais frias e a falta de melhoramento genético da acácia podem explicar as diferenças de produção entre as árvores de acácia e eucalipto nos tratamentos Acácia e Eucalipto, nas áreas experimentais de Itatinga, de Bofete e de Luiz Antônio (VOIGTLAENDER, 2012). No Brasil, grandes investimentos em pesquisa e tecnologia foram empregados para a cultura do eucalipto (GONÇALVES, 2011).

Na área experimental de Luiz Antônio, as árvores de acácia tiveram uma mortalidade de 34%. As condições de baixa umidade do ar e de precipitações pluviométricas concentradas (Tabela 2) em solos arenosos (Tabela 6) levaram a um intenso estresse hídrico, o que resultou em baixo incremento da espécie (Figura 9). Em Santana do Paraíso, as acácias do plantio puro tiveram alta mortalidade (árvores tombadas pelo vento) no fim da rotação.

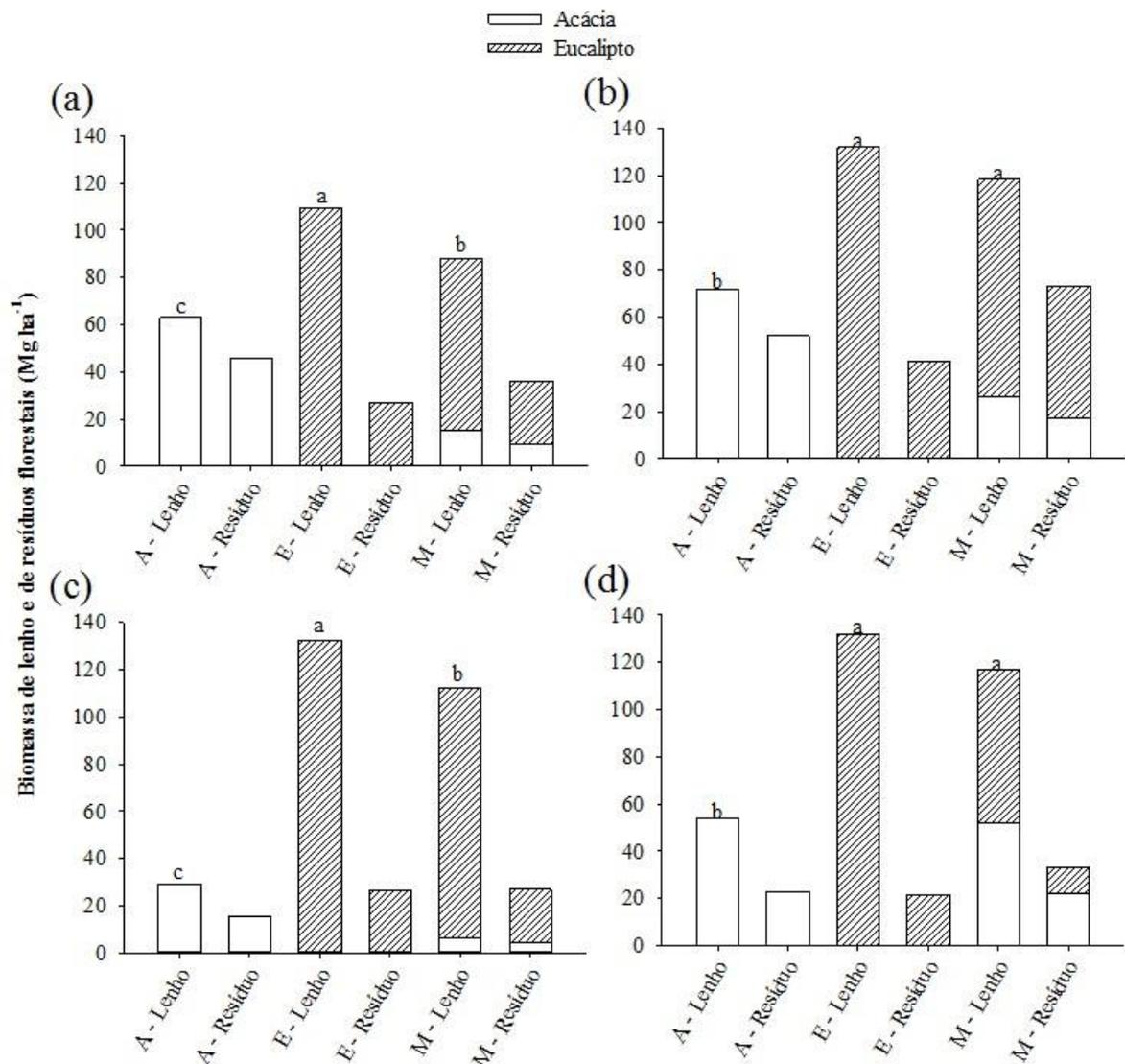


Figura 9 – Produtividade de lenho e resíduos da colheita (folhas, galhos vivos, galhos mortos e casca) nos tratamentos Acácia (A), Eucalipto (E) e Misto (M), nos experimentos localizados em Itatinga/SP, aos 72 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (a); em Bofete/SP, aos 75 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (b); em Luiz Antônio/SP, aos 73 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (c); e, em Santana do Paraíso/MG, aos 76 meses de idade, na primeira rotação de cultivo (d). Letras diferentes nas colunas das biomassas do lenho indicam diferença significativa entre os tratamentos na mesma área ( $p < 0,05$ )

O teor de Ct correlacionou-se positivamente com a altura da acácia, tanto no tratamento Acácia como no Misto, com a circunferência à altura do peito (CAP) no Acácia, e com a altura do eucalipto no tratamento Eucalipto. Assim como o Ct, o Nt correlacionou-se positivamente com a altura da acácia no tratamento Acácia e com a altura do eucalipto no Eucalipto. A relação C/N se correlacionou positivamente com o CAP da acácia, no tratamento Acácia e Misto, e negativamente com o CAP do eucalipto, no Eucalipto e Misto (Tabela 15). A correlação positiva entre C/N e a CAP da acácia, nos tratamentos Acácia e Misto, e negativa com a CAP do eucalipto, nos tratamentos Eucalipto e Misto, indica que, com o

aumento dessa relação, o N poderia ser um fator limitante ao desenvolvimento do eucalipto. Tal fator não seria limitante ao incremento do CAP da acácia, pois a espécie fixa N<sub>2</sub> da atmosfera.

O pH e a CTC<sub>e</sub> correlacionaram-se positivamente com a altura da acácia no tratamento Acácia e Misto e, com a altura do eucalipto, no tratamento Eucalipto. O teor de argila teve altas e positivas correlações com a altura e a CAP da acácia, no tratamento Acácia e Misto, e altura do eucalipto, no Eucalipto. Entretanto, a CAP do eucalipto, tanto no tratamento Eucalipto como no Misto, teve correlação negativa com o teor de argila. Solos mais argilosos normalmente são mais produtivos, pois contêm um teor mais elevado de Ct e uma maior retenção de água e nutrientes em relação aos solos mais arenosos. Em solos tropicais e subtropicais altamente intemperizados, o Ct do solo tem grande importância no fornecimento de nutrientes às culturas, retenção de cátions, complexação de elementos tóxicos e de micronutrientes, estabilidade da estrutura, infiltração e retenção de água, aeração e atividade microbiana, constituindo-se em componente fundamental da sua capacidade produtiva (BAYER; MIELNICZUK, 1999).

Tabela 15 – Coeficientes de correlação de Spearman entre os atributos do solo, a altura total e a circunferência à altura do peito das árvores nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto, em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG)

Atributos	Acácia		Eucalipto		Misto			
					Acácia		Eucalipto	
	Altura	CAP	Altura	CAP	Altura	CAP	Altura	CAP
Ct	0,754**	0,750**	0,574*	-0,703**	0,546*	ns	ns	ns
Nt	0,658**	ns	0,849**	ns	ns	ns	ns	ns
C/N	ns	0,646**	ns	-0,655**	ns	0,553*	ns	-0,552*
pH	0,652**	ns	0,918**	ns	0,546*	ns	ns	ns
P-mel	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
K	0,814**	0,524*	0,752**	ns	ns	ns	ns	ns
Ca	0,589*	ns	0,950**	ns	ns	ns	ns	ns
Mg	0,766**	0,607*	0,783**	ns	0,650**	ns	ns	ns
Al	ns	ns	-0,920**	ns	ns	ns	ns	ns
SB	0,582*	ns	0,931**	ns	ns	ns	ns	ns
CTC <sub>e</sub>	0,757**	ns	0,947**	ns	0,507*	ns	ns	ns
P-rem	-0,822**	-0,825**	ns	0,728**	-0,803**	-0,821**	ns	0,705**
Zn	ns	ns	0,538*	ns	0,592*	0,510*	ns	-0,516*
Fe	ns	ns	ns	0,567*	ns	-0,703**	ns	0,881**
Mn	ns	ns	0,738**	ns	ns	ns	ns	ns
Cu	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
B	ns	ns	ns	ns	ns	0,580*	ns	-0,729**
Areia	-0,804**	-0,767*	-0,541*	0,560*	-0,767**	-0,867**	ns	0,734**
Silte	ns	ns	ns	ns	0,639**	0,775**	ns	-0,634**
Argila	0,815**	0,916**	0,511*	-0,682**	0,807**	0,798**	ns	-0,698**

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; e <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade

Os teores das frações lábeis de P ( $P_{IRTA}$  e  $P_{OBIC}$ ) e o P lábil total, quando se correlacionaram com o desenvolvimento da acácia, tanto no tratamento Acácia como no Misto, foram correlações negativas. Para a fração moderadamente lábil ( $P_{OHID-0,1}$ ), não lábeis ( $P_{IHID-0,5}$ ,  $P_{OHID-0,5}$  e  $P_{RESIDUAL}$ ), a soma das frações moderadamente lábeis (P-ML) e das frações não lábeis (P-ÑL), as correlações foram positivas com o desenvolvimento da acácia (Tabela 16). Essas correlações negativas com as frações lábeis e positivas com as moderadamente e não lábeis evidenciam a absorção de frações não prontamente disponíveis de P pela acácia. Portanto, os extratores utilizados rotineiramente para a determinação do P disponível, a resina ou o Mehlich-1, não são eficientes para determinar a disponibilidade do nutriente para a cultura da acácia (Tabela 15 e 16).

Diferentes sistemas de uso e manejo dos solos podem interferir na dinâmica do P, podendo promover alterações em seus compartimentos (MATOS et al., 2006). O Po no solo é bastante relevante, pois, de acordo com Condrón e Tiessen (2005), parece provável que a aquisição de P pelas plantas que crescem em solos altamente intemperizados, como os solos deste estudo, é regulada pela mineralização do Po. O total de Po correlacionou-se positivamente com a altura das árvores de acácia e eucalipto, nos tratamentos Acácia e Eucalipto, respectivamente (Tabela 16). Há evidências indiretas de que o Po em solos tropicais cultivados pode ser relativamente lábil (NZIGUHEBA; BÜNEMANN, 2005), sendo bastante influenciado pelo histórico de uso do solo (GUGGENBERGER et al., 1996).

No tratamento Eucalipto, várias frações de P correlacionaram-se positivamente com a altura do eucalipto. Somente o  $P_{OBIC}$  teve correlação negativa. No tratamento Misto, nenhuma fração de P teve correlação com o desenvolvimento do eucalipto, demonstrando que o P não foi fator limitante ao desenvolvimento vegetal. Em relação aos demais atributos químicos do solo, a altura do eucalipto no tratamento Misto também não se correlacionou com nenhum dos atributos avaliados (Tabela 15). A não correlação do desenvolvimento do eucalipto no tratamento Misto pode estar relacionada com a adequada fertilização, ciclagem eficiente de nutrientes, associações micorrízicas e com o franco crescimento radicular da espécie. As espécies florestais, quando expostas à baixa disponibilidade de P, aumentam a intensidade das associações micorrízicas, a produção e exsudação de fosfatases e ácidos orgânicos de baixa massa molecular, que solubilizam frações menos lábeis de Pi e Po presentes no solo (SCHACHTMAN; REID; AYLING, 1998; PLASSARD; DELL, 2010; CAIRNEY, 2011; HINSINGER et al., 2011).

Tabela 16 – Coeficientes de correlação de Spearman entre as frações de P no solo, a altura total e a circunferência à altura do peito das árvores nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG)

Frações de P	Acácia		Eucalipto		Misto			
	Altura	CAP	Altura	CAP	Acácia		Eucalipto	
					Altura	CAP	Altura	CAP
P <sub>IRTA</sub>	ns	ns	ns	ns	-0,741**	-0,782**	ns	ns
P <sub>BIC</sub>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>OBIC</sub>	-0,704**	-0,825**	-0,679**	0,525*	ns	ns	ns	ns
P <sub>HID-0,1</sub>	ns	ns	0,731**	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>OHID-0,1</sub>	0,739**	ns	0,782**	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>HCl</sub>	ns	-0,768**	0,519*	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>HID-0,5</sub>	0,813**	0,677**	ns	-0,667**	0,900**	0,671**	ns	ns
P <sub>OHID-0,5</sub>	0,594*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>RESIDUAL</sub>	0,759**	0,656**	0,689**	ns	ns	0,575*	ns	ns
P <sub>TOTAL</sub>	0,758**	0,575*	0,731**	ns	ns	ns	ns	ns
P-L	ns	-0,694**	ns	ns	ns	-0,553*	ns	ns
P-ML	0,640**	ns	0,823**	ns	ns	ns	ns	ns
P-ÑL	0,780**	0,643**	0,638**	ns	0,553*	ns	ns	ns
P <sub>o</sub>	0,625**	ns	0,595*	ns	ns	ns	ns	ns
P <sub>i</sub>	0,755**	0,521*	0,586*	ns	0,778**	ns	ns	ns

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade. P<sub>IRTA</sub>: P inorgânico extraído por resina de troca aniônica; P<sub>BIC</sub>: P inorgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OBIC</sub>: P orgânico extraído por NaHCO<sub>3</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>HID-0,1</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>HCl</sub>: P inorgânico extraído por HCl 1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,1</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>HID-0,5</sub>: P inorgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>OHID-0,5</sub>: P orgânico extraído por NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup>; P<sub>RESIDUAL</sub>: P residual; P<sub>TOTAL</sub>: P total; P-L: P lábil; P-ML: P moderadamente lábil; P-ÑL: P não lábil; P<sub>o</sub>: P orgânico; e P<sub>i</sub>: P inorgânico

Após o fechamento das copas, a ciclagem de nutrientes está estabelecida, diminuindo ou neutralizando a resposta à fertilização, pois as disponibilidades de luz e água passam a ser mais limitantes que a de nutrientes (GONÇALVES et al., 2000; GONÇALVES, 2011; GROVE; THOMSON; MALAJCSUK, 1996). No plantio consorciado, o desenvolvimento vegetal está mais relacionado à competição interespecífica, em que o desenvolvimento do eucalipto acarretou menor desenvolvimento da acácia, comprovado pela correlação negativa entre a CAP do eucalipto com a CAP e a altura da acácia no tratamento Misto (Tabela 17).

Nos tratamentos Acácia e Misto, a CAP e a altura das árvores de acácia tiveram correlações positivas, o que não foi verificado para as árvores de eucalipto, tanto no tratamento Eucalipto, como no Misto. Conforme relatado anteriormente, no plantio Misto, houve competição interespecífica (Tabela 17). Diante disso, a estratificação do sistema radicular se faz importante para a coexistência entre as espécies, essencialmente se os recursos disponíveis são limitantes (FORRESTER et al., 2006).

Existe semelhança nos efeitos entre os recursos (nutrientes e água) direcionados às folhas e à distribuição das raízes finas, na plantação consorciada. As folhas da acácia situam-se abaixo da copa do eucalipto e uma baixa densidade de raízes de acácia situa-se nas camadas mais superficiais do solo, rica em recursos (LACLAU et al., 2013). A competição

interespecífica para o eucalipto foi fraca, por exibir forte plasticidade e tornar possível, com uma densidade de eucalipto 50% menor que nas plantações homogêneas, o desenvolvimento de quase a mesma biomassa de órgãos de absorção (folhas e raízes finas) (LE MAIRE et al., 2013). Por outro lado, o desenvolvimento das árvores de acácia foi fortemente influenciado pela competição interespecífica. A sua copa abaixo da copa do eucalipto, prejudicando a absorção de luz (LE MAIRE et al., 2013), e a densidade de raízes finas maior nas camadas profundas, como forma de compensar a exclusão parcial na camada superficial pelas raízes de eucalipto, podem ter prejudicado seu desenvolvimento no cultivo misto (VOIGTLAENDER, 2012).

Tabela 17 – Coeficientes de correlação de Spearman entre a altura total e a circunferência à altura do peito das árvores, nos tratamentos Acácia, Eucalipto e Misto, em quatro áreas de cultivo (Itatinga, Bofete, Luiz Antônio/SP e Santana do Paraíso/MG)

	Acácia		Eucalipto		Misto			
	Altura	CAP	Altura	CAP	Acácia		Eucalipto	
					Altura	CAP	Altura	CAP
Altura Acácia	1,000	0,736**	-	-	1,000	0,764**	ns	-0,595*
CAP Acácia	0,736**	1,000	-	-	0,764**	1,000	ns	-0,832**
Altura Eucalipto	-	-	1,000	ns	ns	ns	1,000	ns
CAP Eucalipto	-	-	ns	1,000	-0,595*	-0,832**	ns	1,000

\* Significativo a 5% de probabilidade; \*\* Significativo a 1% de probabilidade; <sup>ns</sup> Não significativo a 5% de probabilidade

Há grande interesse no estudo entre relações de diversidade de espécies vegetais e de suas funcionalidades nos ecossistemas, visto que, é reconhecido que a biodiversidade influencia fortemente algumas dessas funções, estando a produtividade de biomassa e a estabilidade dos ecossistemas entre as principais (McGRADY-STEED; HARRIS; MORIN, 1997; TILMAN et al., 2001). No entanto, outras informações devem ser buscadas sobre os sistemas florestais que priorizem a diversidade de espécies, principalmente em sistemas com fins comerciais, a fim de avaliar e de validar novos sistemas de manejo e plantio, com objetivos de manter ou elevar a produção, diminuir a fertilização e proporcionar a incorporação de MOS de melhor qualidade (BINI et al. 2013a, 2013b).

A capacidade de fixação biológica de N<sub>2</sub> tem importante papel nesse processo. Considerando que a relação C/N de um solo é praticamente estável, e por volta de 10 a 12 (POST et al., 1985), não existe a possibilidade de aumento do estoque de Ct do solo sem o aumento de N, numa proporção aproximada de 10 para 1. Assim, ampliar a disponibilidade de N e P nos solos, por meio de espécies fixadoras de N<sub>2</sub>, permitirá ganhos em produtividade e redução dos custos com adubações em relação aos plantios puros.



## 5 CONCLUSÕES

O curto período de consórcio entre as espécies não permitiu verificar se houve tendência no incremento dos teores dos nutrientes e nas frações de P. No entanto, para os plantios que estavam na segunda rotação de cultivo sob os mesmos tratamentos, as diferenças foram maiores, indicando que, com os anos de cultivo consorciados este acréscimo dos teores dos nutrientes e nas frações de P possam ser mais significativos.

A percentagem de P orgânico em relação ao P total do solo variou entre 16 e 36%, desconsiderando o P residual, a percentagem de  $P_o$ , variou entre 22 e 60%. Sob cobertura florestal, a fertilidade do solo é determinada por processos ecológicos naturais, predominando os ambientes distróficos. A demanda de nutrientes das árvores é, em grande parte, garantida pelas ciclagens biogeoquímica e bioquímica. O P está associados aos processos de ciclagem e grande parte dele se encontra em formas orgânicas. Com a adoção do cultivo mínimo, como no presente trabalho, a contribuição do  $P_o$  foi expressiva.

Correlações significativas e positivas foram encontradas entre os atributos e as frações de P no solo, com a produtividade das culturas. Esses resultados indicam melhor manutenção nutricional nos plantios que contém a *A. mangium* (Acácia e Misto), pela capacidade de melhorar a fertilidade do solo e, ainda, aumentar a diversidade das culturas.

A não correlação do crescimento da *A. mangium* com as frações lábeis de P e a correlação positiva de seu crescimento com as frações moderadamente lábeis e não lábeis sugerem que a espécie é capaz de absorver o P oriundo de frações não prontamente disponíveis. O eucalipto teve alta competição com a *A. mangium* nos plantios mistos, principalmente nas áreas experimentais de clima mais ameno (Itatinga, Bofete e Luiz Antônio), acarretando em menor crescimento da *A. mangium*.



## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J.A.A.; BERTOL, I.; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLTAN JUNIOR, W.A. Propriedades químicas de um cambissolo húmico sob preparo convencional e semeadura direta após seis anos de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 437-445, 2005.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. **Determinação e uso do fósforo remanescente**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 27-32 (Boletim Informativo, 25).
- ANDRADE, A.B.; COSTA, G.S.; FARIA, S.M. Deposição e decomposição da serapilheira em povoamentos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Acacia mangium* e *Acacia holosericea* com quatro anos de idade em Planossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 777-785, 2000.
- ARAI, Y.; SPARKS, D.L. Phosphate reaction dynamics in soils and soil components: a multiscale approach. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 94, p. 135-179, 2007.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTA PLANTADA. **Anuário Estatístico da Associação Brasileira de Produtores de Floresta Plantada: ano base 2012**. Brasília, 2013. 148 p.
- BACHEGA, L.R. **Efeito das espécies na decomposição da serapilheira e na transferência de N entre folhas em plantios mistos de *Eucalyptus grandis* e *Acácia mangium***. 2012. 107 p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura e Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- BALIEIRO, F.C.; DIAS, L.E; FRANCO, A.A.; CAMPELLO, E.F.C.; FARIA, S.M. Acúmulo de nutrientes na parte aérea, na serrapilheira acumulada sobre o solo e decomposição de filódios de *Acácia mangium* Wild. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 1, p. 59-65, 2004.
- BARBER, S.A. **Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach**. New York: Wiley-Interscience, 1984. 398 p.
- BARROS, N.F.; COMERFORD, N.B.; BARROS, N.F. Phosphorus sorption, desorption and resorption by soils of the Brazilian Cerrado supporting eucalypt. **Biomass & Bioenergy**, New York, v. 28, p. 229-236, 2005.
- BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F.; NEVES, J.C.L. Fertilização e correção do solo para o plantio de eucalipto. In: BARROS, N.F.; NOVAIS, R.F. (Ed.). **Relação solo-eucalipto**. Viçosa: Ed. Folha de Viçosa, 1990. p. 127-186.
- BATJES, N.H. A world data set of derived soil properties by FAO\_UNESCO soil unit for global modeling. **Soil Use Management**, Bedfordshire, v. 13, n. 1, p. 9-16, 1997.

BAUHUS, J.; VAN DER MEER, P.J.; KANNINEN, M. **Ecosystem goods and services from plantation forests**. London: Earthscan, 2010. 240 p.

BAUHUS, J.; VAN WINDEN, A.P.; NICOTRA, A.B. Above-ground interactions and productivity in mixed-species plantations of *Acacia mearnsii* and *Eucalyptus globulus*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 34, p. 686-694, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo**: ecossistemas tropicais e subtropicais. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.

BAZANI, J.H.; GONÇALVES, J.L.M.; ROCHA, J.H.T.; MELO, E.A.S.C.; PRIETO, M.R. Nutrição fosfatada em plantações de eucalipto. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 148, p. 1-11, 2014.

BECK, M.A.; SANCHEZ, P.A. Soil phosphorus fraction dynamics during 18 years of cultivation on a Typic Paleudult. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, p. 1424-1431, 1994.

BELLOTE, A.F.J.; SILVA, H.D. Técnicas de amostragem e avaliações nutricionais em plantios de *Eucalyptus*. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. p. 106-133.

BINI, D.; FIGUEIREDO, A.F.; SILVA, M.C.P.; VASCONCELLOS, R.L.F.; CARDOSO, E.J.B.N. Microbial biomass and activity in litter during the initial development of pure and mixed plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 76-85, 2013.

BINI, D.; SANTOS, C.A.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; CARDOSO, E.J.B.N. *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in monoculture and intercropped plantations: evolution of soil and litter microbial and chemical attributes during early stages of plant development. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 63, p. 57-66, 2013.

BINKLEY, D. **Forest nutrition management**. New York: Wiley, 1986. 304 p.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C. Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: NAMBIAR, E.K.S.; BROWN, A.G. (Ed.). **Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests**. Canberra: ACAIR; CSIRO; CIFOR, 1997. p. 297-337.

BINKLEY, D.; RYAN, M.G. Net primary production and nutrient cycling in replicated stands of *Eucalyptus saligna* and *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 112, p. 79-85, 1998.

BINKLEY, D.; GIARDINA, C.; BASHKIN, M.A. Soil phosphorous pools and supply under the influence of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Albizia facaltaria*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 128, p. 241-247, 2000.

BINKLEY, D.; DUNKIN, K.A.; DEBELL, D.; RYAN, M.G. Production and nutrient cycling in mixed plantations of *Eucalyptus* and *Albiza* in Hawaii. **Forestry Science**, Dordrecht, v. 38, p. 398-408, 1992.

- BINKLEY, D.; SENOCK, R.; BIRD, S.; COLE, T.G. Twenty years of stand development in pure and mixed stands of *Eucalyptus saligna* and nitrogen-fixing *Falcataria moluccana*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 182, p. 93–102, 2003.
- BOLAN, N.S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 134, n. 2. p. 189-207, 1991.
- BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; MOREIRA, M.Z.; TRIVELIN, P.; JOURDAN, C.; GALIANA, A. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in Brazil. 2. Nitrogen accumulation in the stands and N<sub>2</sub> biological fixation. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 3918-393, 2008.
- BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; VOIGTLAENDER, M.; GAVA, J.L.; LEITE, F.P.; HAKAMADA, R.; MARESCHAL, L.; MABIALA, A.; TARDY, F.; LEVILLAIN, J.; DELEPORTE, P.; EPRON, .D.; NOUVELLON, Y. Eucalyptus and Acacia tree growth over entire rotation in single- and mixed-species plantations across five sites in Brazil and Congo. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 89-101, 2013.
- BOYDEN, S.; BINKLEY, D.; SENOCK, R. Competition and facilitation between *Eucalyptus* and nitrogen-fixing *Falcataria* in relation to soil fertility. **Ecology**, Tempe, v. 86, p. 992–1001, 2005.
- CAIRNEY, J.W.G. Ectomycorrhizal fungi: the symbiotic route to the root for phosphorus in forest soils. **Plant and Soil**, The Hague, v. 344, p. 51-71, 2011.
- CONDON, L.M.; GOH, K.M. Effects of long-term phosphatic fertilizer applications on amounts and forms of phosphorus in soils under irrigated pasture in New Zealand. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 40, p. 383-395, 1989.
- CONDON, L.M.; TIESSEN, H. Interactions of organic phosphorus in terrestrial ecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Oxford: CABI, 2005. p. 295-307.
- CONDON, L.M.; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by <sup>31</sup>P nuclear magnetic resonance analysis. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 36, p. 199-207, 1985.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Fósforo da biomassa microbiana e atividade de fosfatase ácida pela aplicação de fosfato em solo no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 4, p. 925-930, 2002.
- CONTE, E.; ANGHINONI, I.; RHEINHEIMER, D.S. Frações de fósforo acumulada em latossolo argiloso pela aplicação de fosfato no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 5, p. 893-900, 2003.
- CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: global food security and food for thought. **Global Environmental Change**, London, v. 19, n. 2, p. 292–305, 2009.

CROSS, A.F.; SCHLESINGER, W.H. A literature review and evaluation of the Hedley fractionation: applications to the biogeochemical cycle of soil phosphorus in natural ecosystems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 64, p. 197-214, 1995.

CUNHA, G.M.; GAMA-RODRIGUES, A.C. da; COSTA, G.S.; VELLOSO, A.C.X. Fósforo orgânico em solos sob florestas montanas, pastagens e eucalipto no norte fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 667-672, 2007.

DALAL, R.C. Soil organic phosphorus. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 29, p. 83-117, 1977.

DEBELL, D.S.; COLE, T.C.; WHITESELL, C.D. Growth, development, and yield of pure and mixed stands of Eucalyptus and Albizia. **Forest Science**, Washington, v. 43, p. 286-298, 1997.

DICK, W.A.; TABATABAI, M.A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 6, p. 82-84, 1977.

DUFFERA, M.; ROBARGE, W.P. Characterization of organic and inorganic phosphorus in the highland plateau soils of Ethiopia. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, n. 15/17, p. 2799-2814, 1996.

ELSER, J.J.; ELSER, T.J.; CARPENTER S.R.; BROCK, W.A. Regime shift in fertilizer commodities indicates more turbulence ahead for food security. **Plos One**, San Francisco, v. 9, p. e93998, 2014.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

\_\_\_\_\_. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 306 p.

ESSINGTON, M.E. **Soil and water chemistry: an integrative approach**. Boca Raton: CRC Press, 2004. 534 p.

EVANS, J.; TURNBULL, J.W. **Plantation forestry in the tropics, the role, silviculture and use of planted forests for industrial, social, environmental and agroforestry purposes**. 3<sup>rd</sup> ed. New York: Oxford University Press, 2004. 467 p.

FIRN, J.; ERSKINE, P.D.; LAMB, D. Woody species diversity influences productivity and soil nutrient availability in tropical plantations. **Oecologia**, Berlin, v. 154, p. 521-533, 2007.

FIXEN, P.E.; LUDWICK, A.E. Residual available phosphorus in near-neutral and alkaline soils: I. Solubility and capacity relationships. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, p. 332-334, 1982.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L. Nutrient cycling in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 35, p. 2942-2950, 2005a.

\_\_\_\_\_. On the success and failure of mixed-species tree plantations: lessons learned from a model system of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 209, p. 147-155, 2005b.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; KHANNA, P.K. Growth dynamics in a mixed-species plantation of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 193, p. 81-85, 2004.

FORRESTER, D.I.; BAUHUS, J.; COWIE, A.L.; VANCLAY, J.K. Mixed-species plantations of *Eucalyptus* with nitrogen-fixing trees: a review. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, p. 211–230, 2006.

FORTES, J.L.O. **Reabilitação de depósito de rejeito do refino de bauxita com o uso de resíduos industriais e leguminosas arbóreas**. 2000. 185 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000.

FRANCO, A.A.; FARIA, S.M. The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 29, n. 5/6, p. 897-903, 1997.

FRANCO, A.A.; DIAS, L.E.; FARIA, S.M.; CAMPELLO, E.F.C.; SILVA, E.M.R. Uso de leguminosas florestais noduladas e micorrizadas como agentes de recuperação e manutenção da vida do solo: um modelo tecnológico. In: ESTEVES, F. (Ed.). **Oecologica Brasiliensis: estrutura, funcionamento e manejo de ecossistemas**. Rio de Janeiro: UFRJ, 1995. p. 459-467.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; BARROS, N.F. Ciclagem de nutrientes em floresta natural e em plantios de eucalipto e de dandá no sudeste da Bahia, Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 26, n. 2, p. 193-207, 2002.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; SALES, M.V.S. ; SILVA, P.S.D. ; COMERFORD, N.B.; CROPPER, W.P.; GAMA-RODRIGUES, E.F. An exploratory analysis of phosphorus transformations in tropical soils using structural equation modeling. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 117, p. 453-469, 2014.

GARAY, I.; PELLENS, R.; KINDEL, A.; BARROS, E.; FRANCO, A. Evaluation of soil conditions in fast-growing plantations of *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* in Brazil: a contribution to the study of sustainable land use. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v. 27, n. 2, p. 177-187, 2004.

GARAY, I.; KINDEL, A.; CARNEIRO, R.; FRANCO, A.A.; BARROS, E.; ABBADIE, L. Comparação da matéria orgânica e de outros atributos do solo entre plantações de *Acacia mangium* e *Eucalyptus grandis*. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 4, p. 705-712, 2003.

GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; RHEINHEIMER, D.S.; KAMINSKI, J. Fracionamento químico das formas de fósforo no solo: usos e limitações. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, 2013. v. 8, p. 141-187.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231 p. Tese (Doutorado em Biodinâmica dos Solos) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D.S.; FLORES, J.P.C.  
Biodisponibilidade de formas de fósforo acumuladas em solo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 691-699, 2007.

GIACOMINI, S.G.; AITA, C.; HÜBNER, A.P.; LUNKES, A.; GUIDINI, E.; AMARAL, E.B. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantios diretos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1097-1104, 2003.

GONÇALVES, J.L.M. Fertilização de plantações de eucalipto. In: ENCONTRO BRASILEIRO DE SILVICULTURA, 2., 2011, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: IPEF, 2011. p. 85-114.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L. Manejo de resíduos vegetais e preparo de solo. In: GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L. **Conservação e cultivo de solos para plantações de florestas**. Piracicaba: IPEF, 2002. p. 131-204.

GONÇALVES, J.L.M.; WICHERT, M.C.P.; GAVA, J.L.; SERRANO, M.I.P. Soil fertility and growth of *Eucalyptus grandis* in Brazil under different residue management practices. In: NAMBIAR, E.K. (Ed.). **Site management and productivity in tropical plantations forests**. Bogor: CIFOR, 2008a. p. 51-62.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; BENEDETTI, V.; FESSEL, V.A.G.; GAVA, J.L.; Reflexos do cultivo mínimo e intensivo do solo em sua fertilidade e nutrição das árvores. In: GONÇALVES, J.L.M.; BENEDETTI, V. (Ed.). **Nutrição e fertilização florestal**. Piracicaba: IPEF, 2000. cap. 1, p. 1-58.

GONÇALVES, J.L.M.; STAPE, J.L.; LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; RANGER, J. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast growing Eucalypt plantations: the Brazilian experience. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, Pretoria, v. 70, n. 2, p. 105-118, 2008b.

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

GUGGENBERGER, G.; CHRISTENSEN, B.T.; RUBAEK, G.; ZECH, W. Land-use and fertilization effects on P forms in two European soils: resin extraction and <sup>31</sup>P NMR. **European Journal of Soil Science**, New Jersey, v. 47, p. 231-239, 1996.

GUNES, A.; INAL, A.; CICEK, N.; ERASLAN, F. Role of phosphatases, iron reducing, and solubilizing activity on the nutrient acquisition in mixed cropped peanut and barley. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 30, p. 288-293, 2007.

GUO, F.; YOST, R.S. Partitioning soil phosphorus into three discrete pools of differing availability. **Soil Science**, Baltimore, v. 163, p. 822-833, 1998.

HEDLEY, M.J.; STEWART, J.W.B.; CHAUHAN, B.S. Changes in inorganic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 46, n. 4, p. 970-976, 1982.

HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V. Indicações de espécies para o reflorestamento. In: GALVÃO, A.P.M. (Org.). **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais: Um guia para ações municipais e regionais**. Brasília: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Colombo: Embrapa Florestas, 2000. p. 101-124.

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

HUE, N.V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v. 152, p. 463-471, 1991.

JOURDAN, C.; SILVA, E.; GONÇALVES, J.L.M.; RANGER, J.; MOREIRA, M.R.; LACLAU, J.P. Fine root production and turnover in Brazilian *Eucalyptus* plantations under contrasting nitrogen fertilization regimes. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 256, p. 396-404, 2008.

KAYE, P.J.; RESH, S.C.; KAYE, M.W.; CHIMNER, R.A. Nutrient and carbon dynamics in a replacement series of Eucalyptus and Albizia trees. **Ecology**, Washington, v. 81, n. 12, p. 3267-3273, 2000.

KELTY, M.J. The role of species mixtures in plantation forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 233, n. 1/2, p. 195-204, 2006.

KHANNA, P.K. Comparison of growth and nutrition of young monocultures and mixed stand of *Eucalyptus globulus* and *Acacia mearnsii*. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 94, p. 105-113, 1997.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; DELEPORTE, P.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; MARLET, S.; BOUILLET, J.P. Nutrient cycling in a clonal stand of eucalyptus and an adjacent savanna ecosystem in Congo. 3: Input-output budgets and consequences for the sustainability of the plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 210, p. 375-391, 2005.

LACLAU, J.P.; NOUVELLON, Y.; REINE, C.; GONÇALVES, J.L.M.; KRUSHE, A.V.; JOURDAN, C.; LE MAIRE, G.; BOUILLET, J.P. Mixing Eucalyptus and Acacia trees leads to fine root over-yielding and vertical segregation between species. **Oecologia**, Berlin, v. 172, p. 903-913, 2013.

LACLAU, J.P.; BOUILLET, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; SILVA, E.V.; JOURDAN, C.; CUNHA, M.C.S.; MOREIRA, M.R.; SAINT-ANDRÉ, L.; MAQUÈRE, V.; NOUVELLON, Y.; RANGER, J. Mixed-species plantations of *Acacia mangium* and *Eucalyptus grandis* in

Brazil: biomass allocation and net primary production. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 255, p. 3905-3917, 2008.

LACLAU, J.P.; RANGER, J.; GONÇALVES, J.L.M.; MAQUÈRE, V.; KRUSCHE, A.V.; M'BOU, A.T.; NOUVELLON, Y.; SAINT-ANDRÉ, L.; BOUILLET, J.P.; PICCOLO, M.C.; DELEPORTE, P. Biogeochemical cycles of nutrients in tropical *Eucalyptus* plantations. Main features shown by intensive monitoring in Congo and Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 259, p. 1771-1785, 2010.

LE MAIRE, G.; NOUVELLON, Y.; CHRISTINA, M.; PONZONI, F.J.; GONÇALVES, J.L.M.; BOUILLET, J.P.; LACLAU, J.P. Tree and stand light use efficiencies over a full rotation of single- and mixed-species *Eucalyptus grandis* and *Acacia mangium* plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 288, p. 31-42, 2013.

LEVY, E.T.; SCHLESINGER, W.H. A comparison of fractionation methods for forms of phosphorus in soils. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 47, p. 25-38, 1999.

LIMA, W.P. **O reflorestamento com eucalipto e seus impactos ambientais**. São Paulo: Artpress, 1987. 114 p.

LINDAHL, B.O.; TAYLOR, A.F.S.; FINLAY, R.D. Defining nutrition constraints on carbon cycling in boreal forests – toward a less ‘phytcentric’ perspective. **Plant Soil**, The Hague, v. 242, p. 123-135, 2002.

LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G. **Interpretação de análise de solo: conceitos e aplicações**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos, 2004. 50 p. (Boletim Técnico, 2).

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. Piracicaba: Ceres, 2006. 638p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. de. (Ed.). **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MAQUÈRE, V.; LACLAU, J.P.; GONÇALVES, J.L.M.; KRUSCHE, A.V.; PICCOLO, M.C.; ROSIAS, M.G.F.; RANGER, J. Influence of fertilizer inputs on soil solution chemistry in eucalypt plantations established on Brazilian sandy soils. In: SYMPOSIUM ON MANAGEMENT OF TROPICAL SANDY SOILS FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE, 1., 2005, Khon Kaen. **Proceedings...** Reading: International Union of Soil Sciences, 2005. p. 466-471.

MARTINAZZO, R.; SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; BRUNETTO, G.; KAMINSKI, J. Fósforo microbiano do solo sob sistema plantio em resposta à adição de fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 563-570, 2007.

MATOS, E.S.; MENDONÇA, E.S.; VILLANI, E.M.A.; LEITE, L.F.C.; GALVÃO, J.C.C. Formas de fósforo no solo em sistemas de milho exclusivo e consorciado com feijão sob adubação orgânica e mineral. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 625-632, 2006.

MCGRADY-STEED, J.; HARRIS, P.M.; MORIN, P.J. Biodiversity regulates ecosystem predictability. **Nature**, London, v. 390, p. 162-165, 1997.

MEDHURST, J.L.; PINKARD, E.A.; BEADLE, C.L.; WORLEDGE, D. Growth and stem form responses of plantation-grown *Acacia melanoxylon* (R. Br.) to form pruning and nurse-crop thinning. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 179, p. 183-193, 2003.

MENDES-FILHO, P.F.; VASCONCELLOS, R.L.F.; PAULA, A.M.; CARDOSO, E.J.B.N. Evaluating the potential of forest species under “microbial management” for the restoration of degraded mining areas. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 208, p. 79-89, 2009.

MONTAGNINI, F. Accumulation in above-ground biomass and soil storage of mineral in pure and mixed plantations in a humid tropical lowland. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 134, p. 257-270, 2000.

MONTAGNINI, F.; GONZALES, E.; PORRAS, C. Mixed and pure forest plantations in the humid neotropics: a comparison of early growth, pest damage and establishment costs. **Commonwealth Forest Review**, Oxford, v. 74, p. 306-314, 1995.

MORA, A.L.; GARCIA, C.H. **A Cultura do eucalipto no Brasil**. São Paulo: SBS, 2000. 112 p.

MOTTA, P.E.F.; CURI, N.; SIQUEIRA, J.O.; RAIJ, B. van; FURTINI NETO, A.E.; LIMA, J.M. Adsorção e formas de fósforo em Latossolos: influência da mineralogia e histórico de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 349-459, 2002.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution methods for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, Amsterdam, v. 27, p. 31-36, 1962.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 95-102, 1983.

NAMBIAR, E.K.S. Productivity and sustainability of plantation forests. **Bosque**, Valdivia, v. 20, p. 9-21, 1999.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fraction reflect impact of land use and management on soil phosphorus: a review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 172, p. 305-325, 2009.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 471-550.

NZIGUHEBA, G.; BÜNEMANN, E.K. Organic phosphorus dynamics in tropical agroecosystems. In: TURNER, B.L.; FROSSARD, E.; BALDWIN, D.S. (Ed.). **Organic phosphorus in the environment**. Oxford: CABI, 2005. p. 243-268.

- OLANDER L.P.; VITOUSEK P.M. Biological and geochemical sinks for phosphorus in soil from a wet tropical forest. **Ecosystems**, New York, v. 7, p. 404–419, 2004.
- OLIBONE, D. **Variabilidade vertical de formas de fósforo em função de fontes e doses de fosfatos em semeadura direta**. 2005. 100 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2005.
- PARFITT, R.L. Anion adsorption by soils and soil materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 30, p. 1-46, 1978.
- PARROTTA, J.A. Productivity, nutrient cycling, and succession in single- and mixed-species plantations of *Casuarina equisetifolia*, *Eucalyptus robusta*, and *Leucaena leucocephala* in Puerto Rico. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 124, p. 45–77, 1999.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2<sup>nd</sup> ed. Berkeley: Academic Press, 1996. 340 p.
- PAVINATO, P.S.; MERLIN, A.; ROSOLEM, C.A. Phosphorus fractions in Brazilian Cerrado soils as affected by tillage. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 149-155, 2009.
- PLASSARD, C.; DELL, B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. **Tree Physiology**, Oxford, v. 30, p. 1129-1139, 2010.
- POST, W.M.; PASTOR, J.; ZINKE, P.J.; STANGENBERGER, A.G. Global patterns of soil nitrogen storage, **Nature**, London, v. 317, p. 613–616, 1985.
- PRESCOTT, C.E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 101, p. 133-149, 2010.
- RESH, S.C.; BINKLEY, D.; PARROTTA, J.A. Greater soil carbon sequestration under nitrogen-fixing trees compared with *Eucalyptus* species. **Ecosystems**, New York, v. 5, p. 217-231, 2002.
- RHEINHEIMER, D.S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I. Accumulation of soil organic phosphorus by soil tillage and cropping systems in subtropical soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 2339-2354, 2003.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, n. 3, p. 589-597, 2000.
- RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; KAMINSKI, J. Depleção de fósforo inorgânico de diferentes frações provocadas pela extração sucessiva com resina em diferentes solos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 345-354, 2000.

- RIBEIRO, A.C; GUIMARÃES, P.T.G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Mina Gerais**. 5ª Aproximação. Viçosa: UFV, 1999. 359 p.
- RODRIGUES, M. **Sistemas de manejo e a dinâmica das formas de fósforo e da fertilidade em solos de cerrado**. 2013. 113p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.
- ROTHER, A.; BINKLEY, D. Nutritional interactions in mixed species forests: a synthesis. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v. 31, p. 1855-1870, 2001.
- SANTOS, D.R.; GATIBONI, L.C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solos sob sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 2, p. 576-586, 2008.
- SCHACHTMAN, D.P.; REID, R.J.; AYLING, S.M. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. **Plant Physiology**, Belmont, v. 116, p. 447-453, 1998.
- SILVA, F.C. da. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009. 627 p.
- SILVEIRA, R.L.V.A.; GAVA, J.L. Nutrição e adubação fosfatada em eucalipto. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S.R.S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafos, 2004. p. 495-536.
- SIMS, J.T.; PIERZYNSKI, G.M. Chemistry of phosphorus in soils. In: TABATABAI, M.A.; SPARKS, D.L. (Ed.). **Chemical processes in soils**. Madison: Soil Science Society of America Soil Science Society of America, 2005. p. 151-192. (Book Series, 8).
- SMECK, N.E. Phosphorus: an indicator of pedogenetic weathering processes. **Soil Science**, Baltimore, v. 115, p. 199-206, 1973.
- SOUZA FILHO, L.F.S. **Formas de fósforo em latossolo sob cerrado em função do tempo de uso agrícola**. 2014. 127p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2014.
- STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. New York: John Wiley, 1999. 427p.
- STEWART, J.W.B.; SHARPLEY, A.N. Controls on dynamics of soil and fertilizer phosphorus and sulfur. In: FOLLETT, R.F.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V.; POWER, J.F. (Ed.). **Soil fertility and organic matter as critical components the production systems**. Madison: SSSA, 1987. p. 101-121.
- TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D.S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 36, p. 271-281, 2012.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; COLE, C.V. Pathways of phosphorus transformation in soils of differing pedogenesis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 853-858, 1984.

TILMAN, D.; REICH, P.B.; KNOPS, J.; WEDIN, D.; MIELKE, T.; LEHMAN, C. Diversity and productivity in a long-term grassland experiment. **Science**, Washington, v. 294, p. 843-845, 2001.

TOKURA, A.M.; FURTINI NETO, A.E.; CURI, N.; FAQUIN, V.; KURIHARA, C.H.; ALOVISI, A.A. Formas de fósforo em solo sob plantio direto em razão da profundidade e tempo de cultivo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 10, p. 1467-1476, 2002.

THOMAS, S.M.; JOHNSON, A.H.; FRIZANO, J.; VANN, D.R.; ZARIN, D. J.; JOSHI, A. Phosphorus fractions in montane forest soils of the Cordillera de Piuché, Chile: biogeochemical implications. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 211, p. 139-148, 1999.

VANCE, C.P.; UHDE-STONE, C.; ALLAN, D.L. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. **New Phytologist**, Oxford, v. 157, p. 423-447, 2003.

VADEZ, V.; LIM, G.; DURAND, P.; DIEM, H.G. Comparative growth and symbiotic performance of *Acacia mangium* provenances from Papua New Guinea in response to the supply of phosphorus at various concentrations. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 19, p. 60-64, 1995.

VOIGTLAENDER, M. **Produção de biomassa aérea e ciclagem de nitrogênio em consórcio de genótipos de *Eucalyptus* com *Acacia mangium***. 2012. 95 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

WALKER, T.W.; SYERS, J.K. The fate of phosphorus during pedogenesis. **Geoderma**, Amsterdam, v. 15, p. 1-19, 1976.

WILLIAMS, J.D.H.; WALKER, T.W. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profiles: 1. **Soil Science**, Baltimore, v. 107, p. 22-30, 1969a.

\_\_\_\_\_. Fractionation of phosphate in a maturity sequence of New Zealand basaltic soil profiles: 2. **Soil Science**, Baltimore, v. 107, p. 213-219, 1969b.

YAMASHITA, O.S.; HARDJONO, A. Soil changes induced by *Acacia mangium* plantation establishment: comparison with secondary forest and Imperata cylindrical grassland soils in South Sumatra, Indonesia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 254, p. 362-370, 2008.